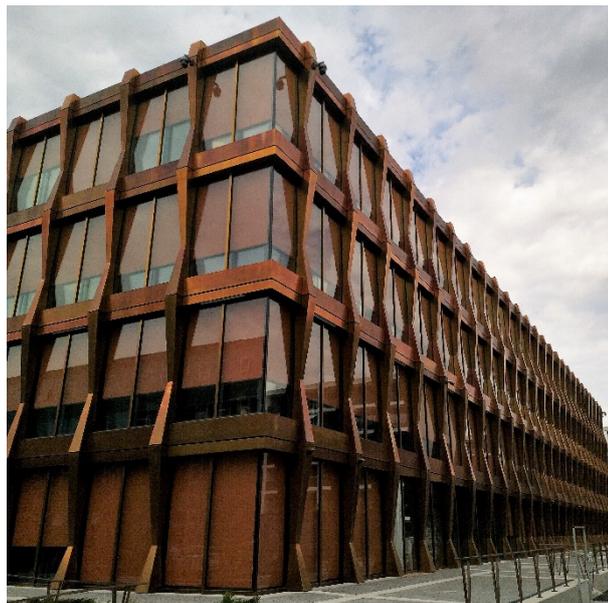


Abschwemmung von Metallflächen und Eintrag ins Grundwasser

Literaturrecherche und Messungen
unter Berücksichtigung von drei urbanen Pestiziden



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Rapperswil, 26. März 2019

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wasser, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC), Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

Autoren: Michael Burkhardt, Philipp Hodel

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zitiervorschlag: Burkhardt, M., Hodel, P. (2019): Abschwemmung von Metallflächen und Eintrag ins Grundwasser - Literaturrecherche und Messungen unter Berücksichtigung von drei urbanen Pestiziden. Bericht im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Umwelt (BAFU), Rapperswil, S. 44.

Zusammenfassung

Um den Wissenstand zur Abschwemmung von Kupfer- und Zinkflächen und den möglichen Stoffeintrag durch versickerndes Niederschlagswasser ins Grundwasser zusammenzutragen, wurden Literatur und Grundwasserdaten gesichtet sowie ergänzende Messungen durchgeführt. Der Schwerpunkt bei den Grundwasserdaten lag auf oberflächennahe Grundwasservorkommen mit urban geprägten Einzugsgebieten. Für das Grundwasser wurden auch die im Gebäudebereich verwendeten Pestizide Terbutryn, Diuron und Mecoprop einbezogen.

Bei der Abschwemmung von unbeschichteten Metallflächen treten gemäss KBOB und eco-devis mittlere Konzentrationen von 1.8 mg/L Kupfer und 3.6 mg/L Zink auf. Unter Berücksichtigung von 1000 mm Jahresniederschlag ergeben sich Abschwemmraten von 1.8 g/m² a Kupfer und 3.6 g/m² a Zink. Diese Angaben liegen über den aus der Literatur ermittelten durchschnittlich 1.3 g/m² a Kupfer und 3.3 g/m² a Zink und oberhalb der ergänzenden Messungen. Für Fassaden ist von einer 5- bis 10-fach geringeren Abschwemmraten auszugehen. Die abgeschwemmten Metalle liegen zu 70 bis 90 % in gelöster Form vor. Im Abfluss von Metallflächen treten hohe Anfangskonzentrationen über die ersten 10 mm (First Flush) auf, gefolgt von einem starken Konzentrationsrückgang. Bei kleinen Abflussereignissen nimmt dagegen die Konzentration über die Abflussdauer zu. Die Abschwemmung ist unabhängig vom Alter des Materials. Aufgrund der Datenkonsistenz steht ausser Frage, dass die Abschwemmung von Metallflächen zu einer hohen Boden- und Gewässerbelastung führt und Reduktionsmassnahmen im Sinne der KBOB- und VSA- Empfehlungen erforderlich sind.

Metallische oder organische Beschichtungen reduzieren die Abschwemmung um das 30- bis 100-fache, wie Angaben aus der Literatur, Untersuchungen beim KKL (2K PU-Lack) und Labortests (PE, vorpatiniert) zeigen. Über die Dauerhaftigkeit von Beschichtungen, vor allem organischen unter langjährigem Witterungseinfluss, ist aber wenig bekannt. Daher sollten Beschichtungen als Massnahme nur empfohlen werden, wenn ein experimenteller Nachweis zur Schutzdauer vorliegt.

Durch Niederschlagswasser von unbeschichteten Metallflächen werden auf Versickerungsflächen die Grenz- und Richtwerte, teils Sanierungswerte im Boden überschritten. Eine Verlagerung ins Grundwasser tritt auf, wenn die Rückhaltekapazität überschritten wird. Vor allem weniger gut adsorbierende organische Spurenstoffe könnten nach langjähriger Versickerung problematisch sein. Sickerschächte ohne Bodenpassage sind bei urban belastetem Niederschlagswasser zu vermeiden.

Die meisten Grundwasserdaten zeigen geringe Konzentrationen von Kupfer und Zink auf, sodass die Indikatorwerte nur in sehr wenigen Fällen überschritten wurden. Bei den Pestiziden waren sogar ca. 99% aller Analysen ohne Befund. Diuron wurde unter den Pestiziden am häufigsten, Terbutryn am wenigsten nachgewiesen.

Unter den 50 Messstellen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Modul TREND, sind 11 Messstellen der Hauptbodennutzung „Siedlung und Verkehr“ (SV) im Einzugsgebiet zugeordnet. In diesen Messstellen sind in 50 % aller Proben Kupfer und Zink nachweisbar und in 10 % der Proben werden die Indikatorwerte der BAFU-Wegleitung Grundwasserschutz überschritten. Diuron und Mecoprop wurde in wenigen Einzelproben nachgewiesen, obwohl fast 5-mal mehr Analysen als für die Metalle durchgeführt wurden. Besonders auffallend ist eine Messstelle mit mehrfachem Positivbefund von Kupfer, Diuron und Mecoprop. Terbutryn war an keiner der 50 Messstellen nachweisbar. Der Eintrag der Metalle und Pestizide Terbutryn, Diuron und Mecoprop ist auf versickertes Niederschlagswasser zurückzuführen. Andere Eintragswege lassen sich ausschliessen. Die Auswertung zu den Einzugsgebieten lässt aber keine direkten Rückschlüsse auf die Beeinflussung durch grössere Metallflächen bzw. durch einen Eintrag über Versickerungsanlagen zu.

Beim Vorkommen von anthropogenen Stoffen im Grundwasser haben belastete Standorte und Deponien sehr massgeblichen Einfluss, wie Daten aus Basel-Landschaft und –Stadt zeigen. Die Grundwasserdaten zeigen auch, dass die Zinkwerte häufig durch das Rohrmaterial der Messstellen beeinflusst sind. Einige Messstellen weisen darauf hin, dass urban belastetes Niederschlagswasser in das Grundwasser einsickert und die Grundwasserqualität beeinflusst. Deshalb sind vereinzelt Terbutryn, Diuron und Mecoprop nachweisbar. Aufgrund deren

spezifischer Anwendung im Gebäudebereich ist eine Hintergrundbelastung auszuschliessen. Ein Nachweis war nur mit sehr geringen Bestimmungsgrenzen möglich (2 - 5 ng/L). Die Konzentrationen liegen aber immer unter dem Anforderungswert der Gewässerschutzverordnung von 100 ng/L pro Pestizid. Die vereinzelt Belege heben hervor, dass auch gegen den Eintrag langlebiger Pestizide vorsorgende Massnahmen sinnvoll sind.

Die Kenntnisse in den Kantonen zum Vorkommen von Kupfer, Zink und den drei Pestiziden im oberflächennahen urbanen Grundwasser sind dürftig, weil (1) die Grundwasserqualität bei Trinkwassernutzung überwacht wird, aber selten im Au, Zu, S3 oder üB, (2) Messstellen an belasteten Standorten stehen, (3) auch verzinktes Rohrmaterial die Messwerte beeinflussen kann, und (4) eine nachweisstarke Spurenanalytik (mit tiefen Bestimmungsgrenzen) in wenigen Kantonen verfügbar ist. Zudem wurden die Grundwassermessstellen nicht ausgewählt, um dem möglichen Eintrag über Versickerungsanlagen nachzugehen.

Um die Relevanz der Abschwemmung von Metallflächen, des Eintrags von organischen Spurenstoffen und die Auswirkung urbaner Stoffeinträge durch versickerndes Niederschlagswasser auf die oberflächennahe Grundwasserqualität zukünftig besser beurteilen zu können, wird folgendes empfohlen:

- Die Abschwemmung von beschichteten Metallflächen lässt sich durch einen Auswaschtest im Labor (sog. DSLT) abschätzen. Werden auch gealterte Produkte untersucht, dürften sich Hinweise zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung ergeben.
- Grössere Dach- und Fassadenflächen aus Metall sollten wie im Kanton Thurgau in einer Datenbank erfasst und mit dem Versickerungskataster verknüpft werden. Vielleicht können grössere pestizidhaltige Flächen ebenfalls aufgenommen werden.
- Um die zeitliche Entwicklung einer Abschwemmung von beschichteten Metallflächen erkennen zu können, ist die Zinkkonzentration des Oberbodens in Versickerungsanlagen (0 bis 10 cm, bei der Einleitstelle) bestimmen zu lassen.
- Wenn regengetriebener Eintrag ins Grundwasser durch die Abschwemmung von urbanen Oberflächen erfasst werden soll, sind die Messstellen darauf ausgerichtet festzulegen und der Untersuchungsrythmus der Witterung anzupassen. Ein enger Beprobungsrythmus erleichtert Aussagen zur möglichen zeitlichen Belastungsänderung. Exemplarisch sollten bei Versickerungsanlagen mit bekanntem Einzugsgebiet der Zu- und Abstrom bei Trocken- und Regenwetter untersucht werden.
- Spurenstoffen wie Terbutryn, Diuron und Mecoprop sollte besondere Aufmerksamkeit im Grundwassermonitoring geschenkt werden. Darüber hinaus bieten sich Benzothiazol (Vulkanisationsbeschleuniger in Pneu, EPDM-Dachbahnen, Gummigranulat von Kunstrasen) und weitere persistente, mobile und toxische Substanzen mit Koc < 4.5 an.
- In den Einzugsgebieten der Messstellen NAQUA-TREND sind Versickerungsanlagen (z.B. aus kantonalen Katastern) und mögliche emissionsrelevante Quellen aufzunehmen. Zudem wäre vorteilhaft weitere Messstellen hinzuziehen, um den Einfluss von mit Stoffen aus Dach- und Fassadenmaterialien oder anderen urbanen Quellen belastetem Sickerwasser zu erfassen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Ziele	3
3 Vorgehen	3
4 Dach- und Fassadenwasser	3
4.1 <i>Literaturrecherche zu Kupfer und Zink</i>	3
4.1.1 Korrosions- und Abschwemmrate	3
4.1.2 Abschwemmung von Dächflächen	4
4.1.3 Neigung und Exposition	5
4.1.4 Abschwemmung von beschichteten Metallflächen	6
4.1.5 Abschwemmung vom KKL-Dach in Luzern	7
4.1.6 Modellierter Abschwemmung von Kupfer	8
4.2 <i>Messungen zur Abschwemmung von Metallflächen</i>	8
4.2.1 Zinkdach, unbeschichtet	8
4.2.2 Kupferdach, unbeschichtet	10
4.2.3 Laborversuche zur Abschwemmung	11
5 Grundwasser	13
5.1 <i>Rechtliche Grundlagen</i>	13
5.2 <i>Anreicherung von Metallen in Versickerungsanlagen</i>	14
5.3 <i>Recherche Grundwassermessdaten</i>	15
5.3.1 Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA, Modul TREND	15
5.3.2 Kanton Zürich	18
5.3.3 Kanton Basel-Stadt	18
5.3.4 Kanton Basel-Landschaft	22
5.3.5 Kanton Zug	25
6 Schlussfolgerung	26
7 Literaturverzeichnis	29
8 Abbildungsverzeichnis	32
9 Tabellenverzeichnis	35
10 Anhang	36

1 Einleitung

Unser Grundwasser steht unter hohem Nutzungsdruck durch Siedlung, Verkehr und Landwirtschaft. In den letzten drei Jahrzehnten (1982 bis 2015) sind schweizweit die Siedlungsflächen um 31 % auf rund 10 % gestiegen¹. Im Kanton Zürich bedecken Siedlungsflächen mehr als 20 %. Alleine Industrie-, Gewerbe- und Gebäudeareale haben in der Schweiz um fast 40 % zugenommen, entsprechend rund 1'500 Hektare pro Jahr. Der Zuwachs ging vorwiegend auf Kosten von Landwirtschaftsflächen.

Durch abfließendes Niederschlagswasser von versiegelten Flächen im Siedlungsraum gelangen Nährstoffe (z.B. Düngemittel), Schwermetalle (z.B. Metallflächen, Verkehr) oder organische Spurenstoffe (z.B. Biozide, Industriechemikalien) in Boden und Grundwasser. Eine weithin bekannte Belastung des Niederschlagswassers verbindet sich mit Zink aus Metallflächen, Korrosionsbeschichtungen, Pneumabrieb, Dichtungsbahnen oder Fassaden. In der Schweiz gelangen alleine von Kupferdächern und -fassaden mit dem Niederschlagswasser rund 30 bis 60 t Kupfer pro Jahr in die Umwelt (von Arx, 2006). Auch zahlreiche organische Stoffe treten im Niederschlagswasser auf. Die Herkunft der Stoffe lässt aber nicht immer eindeutig zuordnen.

Weil Niederschlagswasser von Metallflächen als belastet gilt, ist der Abfluss von unbeschichteten Metalldächern > 50 m² und Metallfassaden > 250 m² über eine Bodenpassage zu versickern oder mit einer Adsorberanlage zu behandeln, (VSA, 2019). Auch bei Dächern oder Fassaden mit pestizidhaltigen Materialien und beschichteten Metallflächen ist von einer mittleren Belastung auszugehen, es sei denn der Hersteller weist geringere Belastungen nach.

Wird Niederschlagswasser unter Umgehung einer Bodenschicht in unterirdischen Schachtanlagen geleitet, ist das Eintragsrisiko ins Grundwasser besonders hoch. Das gleiche ist erwarten, wenn in einem Boden mit hoher Wasserleitfähigkeit und geringem Grundwasserflurabstand versickert wird. So wurden Biozide aus Fassaden über eine Mulden-Rigolen-Versickerungsanlagen ins Grundwasser eingetragen (Lange, 2017).

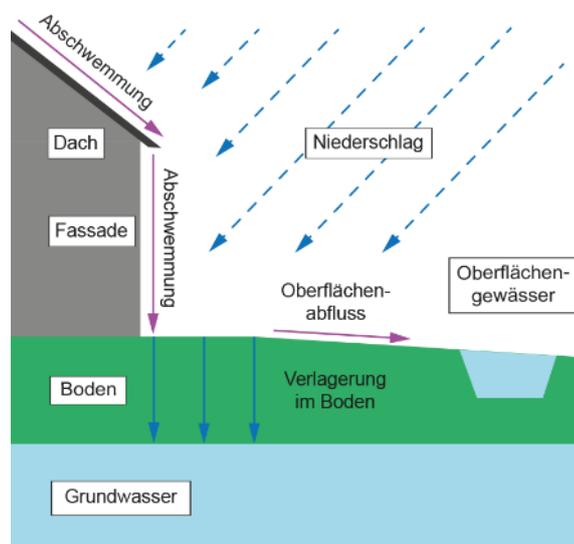


Abbildung 1: Schema zur Abschwemmung von Metallflächen und deren Eintrag in Boden und Gewässer. Der Oberflächenabfluss kann auch über den Regenwasseranal der Trennkanalisation abgeleitet werden und die Verlagerung ins Grundwasser über Versickerungsanlagen erfolgen.

¹ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/medienmitteilungen.assetdetail.6646451.html>

2 Ziele

Im Rahmen des Projekts wurden Kenntnisse zur Abschwemmung von Kupfer und Zink aus der Literatur und deren Vorkommen im oberflächennahen, urban beeinflussten Grundwasser aus kantonalen Messdaten zusammengetragen. Durch zusätzliche Analysen von Dachwasser und Laborversuche mit Metallblechen wurden die Daten ergänzt.

Um die möglichen Eintragswege von Metallflächen ins Grundwasser besser zu verstehen, wurden die organischen Stoffe Terbutryn, Diuron und Mecoprop in die Auswertung einbezogen, die im Siedlungsraum aus Baumaterialien ausgewaschen werden. Terbutryn und Diuron kommen in Aussenfarben und -putzen, Mecoprop in wurzelfesten Bitumenbahnen vor. Sollten Kupfer oder Zink zusammen mit diesen Stoffen im Grundwasser auftreten, ist ein Zusammenhang zum versickerten Niederschlagswasser sehr wahrscheinlich.

3 Vorgehen

Um einen Überblick über vorhandene Daten zur Abschwemmung von Kupfer und Zink zu erhalten, wurde eine breite Literaturrecherche durchgeführt. Der Fokus lag auf Fachartikeln und Berichten.

Die kantonalen Fachstellen wurden angefragt, um Daten zur Abschwemmung und urban beeinflussten, oberflächennahen Grundwassermessstellen zu erhalten. Aus den eingetroffenen Antworten lässt sich schliessen, dass einige Kantone keine Qualitätsmessungen durchführen, in anderen dagegen sehr viele (Anhang: Tabelle 10). Sofern regelmässig Daten erhoben werden, erfolgen die Beprobungen in Abständen von 6 oder 12 Monaten. Diese Messungen sind ausschliesslich für Grund- und nicht für Dachwasser bekannt.

Gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung (GSchV) und Wegleitung Grundwasserschutz (BAFU, 2004) ist die Konzentration für die gelöste Metallfraktion massgebend. Wird der Gesamtgehalt eingehalten, so sollte auch der Wert für die gelöste Konzentration eingehalten werden.

Unberücksichtigt bleibt, dass nach einer Filtration (0.45 µm) der Wasserproben auch in der gelösten Fraktion feinste Metallpartikel auftreten. Zudem werden nicht die Metallspezies erfasst, z.B. die Art der Metalloxide, -hydroxide, -komplexe, die die Mobilität und deren ökotoxikologisches Risiko bestimmen.

4 Dach- und Fassadenwasser

4.1 Literaturrecherche zu Kupfer und Zink

Zink- und Kupferbleche werden im Hochbau zur Dacheindeckung, als Fassadenbehang, für die Dachentwässerung (Regenrinnen, Fallrohre), für Abdeckungen von Gesimsen oder Aussenfensterbänken eingesetzt.

4.1.1 Korrosions- und Abschwemmrage

Im Wechsel von feuchten und trockenen Perioden entstehen Korrosionsprodukte. Dazu zählen Oxide und Hydroxide, die innerhalb weniger Sekunden bis Stunden gebildet werden. Relevante Faktoren für die Korrosion sind die Materialart (Kupfer, Zink), Art der Beschichtung und der Witterungseinfluss (SO₂-Gehalt, pH-Wert, Niederschlag, Ozon, Hagel, Dauer der Befeuchtung). Die durchschnittlich pro Jahr in Korrosionsprodukte umgewandelte Metallmenge ist die Korrosionsrate oder Abtragsrate. Mehrjährige Untersuchungen von Kupferblechen an verschiedenen Standorten der Schweiz ergaben Korrosionsraten von 1 bis 3 µm/a (Tabelle 1) (Oesch, 1996, Faller, 2005, eco-bau, 2010). Heute wird fast ausschliesslich Titanzink verwendet, welches korrosionsfester, weniger spröde und mechanisch belastbarer als Reinzink ist. Für das unedlere Zink liegen die Korrosionsraten stets höher als für Kupfer.

Die Korrosionsprodukte bilden eine stabile Deckschicht durch Reaktion des Metalls mit Sauerstoff an der Kontaktfläche. Diese passive Oxidschicht wird Passivschicht oder Patina

genannt und bei Zink deutlich schneller als bei Kupfer bildet. Trockenperioden verursachen Risse in der schützenden Patina, wodurch eine grössere Oberfläche entsteht. Mit stabiler werdender Patina nimmt die Korrosionsrate bis zur Näherung an die Abschwemmrate ab. Die jährliche Abschwemmrate ($\text{g/m}^2 \text{ a}$) beschreibt die durch den Niederschlag mobilisierte Metallfracht. Über einen langen Betrachtungszeitraum ist diese nahezu konstant. Als Abschwemmung wird die Fracht bezeichnet, welche durch den Niederschlag von Dach- und Fassadenflächen abgespült wird. Einzelne Abflussereignisse zeigen deutliche Schwankungen bei der Abschwemmung. Zudem ist häufig zu Beginn eines Ereignisses eine deutlich höhere Fracht (sog. First-Flush) zu beobachten als im weiteren Verlauf.

Die Korrosionsprodukte werden in folgenden Formen abgeschwemmt.

- Metallion (gelöst): chemisch gelöste Ionen (Cu^{2+} , Zn^{2+}) sind Lösungsprodukte, die gut adsorbieren, sich fällen lassen und ökotoxikologisch relevant sind.
- Primäre Metallpartikel (ungelöst): Die Korrosionsprodukte entstehen auf Metallflächen, lassen sich filtrieren und können bei pH-Absenkung in Lösung übergehen.
- Sekundäre Metallpartikel (ungelöst): Fällungsprodukte entstehen bei leicht alkalischen pH-Werten (Kupfer pH 7, Zink pH 8), lassen sich filtrieren und bei pH-Absenkung wieder auflösen.
- Adsorbierte Metalle (ungelöst): Adsorption von Metallen an Feststoffen, die mit dem Regen abgeschwemmt werden.

Der Anteil der partikulären Metallfraktion wird auch durch die mechanische Einwirkung des Niederschlages (z.B. Hagel, Starkregen) beeinflusst.

4.1.2 Abschwemmung von Dächflächen

Zur Abschwemmung von Metallblechen im Aussenbereich liegen zahlreiche Arbeiten vor. Die Gehalte im Ablaufwasser variieren stark und nehmen in der Regel über den Verlauf eines Niederschlagsereignisses stark ab (Abbildung 2) (He, 2001; Binz-Deplazes, 2004, Schriewer, 2008; Jönsson, 2013). Die Konzentrationshöhe hängt von dem Anteil der Metallfläche am Gesamtabfluss (Abbildung 2), ist aber weitgehend unabhängig vom Alter der Metallflächen (Tabelle 1).

Generell liegen höhere Konzentrationen für Zink als für Kupfer vor. Für Dachwasser werden ereignismittelte Konzentrationen von 0.2 mg/L Kupfer und für Titanzinkblech von 4 bis 5 mg/L Zink berichtet, liegen aber teils weit darüber oder darunter (Boller, 1996, Langbein, 2005). Die in der Schweiz bei Planern am häufigsten verwendeten Durchschnittskonzentrationen betragen 1.8 mg/L Kupfer und 3.6 mg/L Zink (Tabelle 1) (KBOB, 2001; eco-bau, 2010).

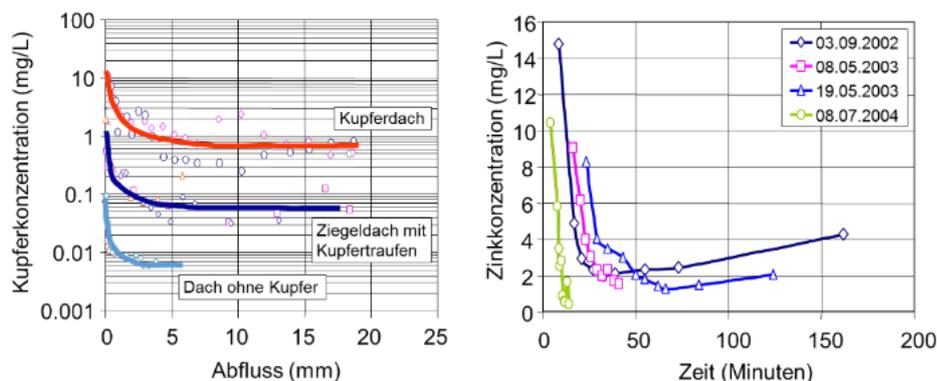


Abbildung 2: Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Dachwasser (Boller, pers. Mitt.).

Die leicht mobilisierbare Metallfraktion führt in den ersten 10 mm Abfluss zu 7 bis 20 mg/L Zink oder Kupfer (Langbein, 2005; Schriewer, 2008; Lindström, 2010). Betrachtet man die in den ersten Minuten des Abflusses auftretenden Konzentrations- und Frachtspitzen, so liegen diese

häufig 5-10-fach (bis Faktor 100 erhöht) über den dargestellten Mittelwerten. Die Höhe dieser First-Flush Abschwemmung wird sowohl durch die Witterungsperiode vor dem Ereignis bestimmt, z.B. die Dauer der Trockenperiode, als auch die Niederschlagsintensität und -menge (Boller, 1996; He, 2001). Nachfolgend sinken die Konzentrationen auf mehr oder weniger konstante Konzentrationen ab. In 90 % aller Ereignisse ist eine Konzentrationsüberhöhung nachweisbar (Schriewer, 2008). Für kleine Niederschlagsmengen ist über die Abflussdauer eher ein Konzentrationsanstieg zu beobachten. Der Zeitpunkt der Probenahme beeinflusst folglich die gemessene Konzentration.

Inwiefern ein gelöster Anteil auftritt, hängt stark von den Umgebungsbedingungen ab. Bei Kupferdächern in Stockholm lagen 40 bis 100 % in gelöster Form vor, unter maritimen Einfluss 14 bis 54 % (Jönsson, 2013, Hedberg, 2014) und auf Versuchsdächern in Burgdorf > 80 % (Langbein, 2005). Eine andere Studie weist partikuläres Kupfer vor allem in der First-Flush Phase nach, während erst im weiteren Abflussverlauf der gelöste Anteil auf > 80 % ansteigt (Lindström, 2010).

Je nach Fragestellung interessiert nicht primär die Konzentration, sondern die abgeschwemmte Fracht. Aus zahlreichen Untersuchungen ergibt sich eine mittlere Abschwemmrate von 1.3 g/m² a Kupfer mit 50 % zwischen 0.9 und 2.5 g/m² a und von 3.3 g/m² a Zink mit 50 % zwischen 2.0 bis 5.0 g/m² a (Anhang, Tabelle 12) (Schmidt, 2017). Kleinere Abschwemmraten wurden in Gebieten mit niedrigem SO₂-Gehalt in der Luft und die grossen in Industriegebieten mit hoher SO₂-Belastung nachgewiesen (Anhang, Tabelle 13) (Faller, 2005; Lindström, 2010). Eine Schwankung über den Jahresverlauf ist nicht bekannt (Odnevall Wallinder 2001, Schriewer, 2008). Ein Hersteller gibt für TECU-Produkte 0.7 bis 1.7 g/m² a Kupfer an (KME, 2012).

In der Schweiz sind Abschwemmraten von 1.8 g/m² a für Kupfer blank (0.2 µm/a) sowie 3.6 g/m² a für Stahl verzinkt und Titanzink blank bei (0.4 µm/a) (Tabelle 1) etabliert (KBOB, 2001; eco-bau, 2010). Diese liegen zwar über den aus der Literatur abgeleiteten Mittelwerten, widerspiegeln aber sehr passend die doppelt so hohen Verluste von Zink- gegenüber Kupferflächen.

Tabelle 1: Abschwemmung von Metallblechen für Dächer (eco-bau, 2010).

Dachmaterial	Element	Konzentration ¹⁾ (mg/L)	Abtragsrate (µm/a)	Abschwemmrate (g/m ² a)
Kupferblech blank ²⁾	Kupfer	1.80	0.20	1.80
Kupferblech verzinkt	Kupfer	0.18	0.02	0.18
Titanzinkblech blank	Zink	3.60	0.50 ³⁾	3.60
Chromnickelstahlblech blank	Chrom, Zinn	0.08	< 0.01	0.08
Chromstahlblech verzinkt	Chrom, Zinn	0.08	< 0.01	0.08
Alublech blank	Aluminium	0.03	< 0.01	0.03
Stahlblech verzinkt	Zink	3.60	0.50	3.60

1) bei horizontaler Metallfläche und einer durchschnittlichen Regenwassermenge von 1000 mm pro Jahr.

2) gilt in gleichem Masse auch für vorpatiniertes, oxidiertes oder phosphatiertes Kupfer.

3) für grau vorpatiniertes Titanzink 0.70 µm/a.

4.1.3 Neigung und Exposition

Für den Abfluss auf geneigten oder vertikalen Metallflächen ist der wichtigste Faktor die tatsächlich auftreffende Niederschlagsmenge (Abbildung 3). Mit zunehmender Neigung der berechneten Fläche nimmt die Abschwemmrate ab, weil die auftreffende Regenmenge abnimmt. Ausserdem ist die Expositionsrichtung von Bedeutung. Dieser Zusammenhang lässt sich auf die vorherrschenden Windverhältnisse (Richtung, Geschwindigkeit), in unseren Lagen dominiert der Wind aus Westen, zurückführen (Anhang, Tabelle 13). Die Korrosionsrate dagegen wird von der Neigung und Exposition kaum beeinflusst.

Die Abschwemmraten von Fassaden liegen um einen Faktor 5 bis 10 niedriger als für Dachflächen. So wurden für Kupferfassaden der METAS in Bern im Mittel 1 bis 2 mg/L Kupfer

(Maximum 100 mg/L) und von Helmreich (2018) in Fassadenabflüssen im Mittel 1.5 bis 3 mg/L Kupfer ermittelt (Tabelle 11). Daraus ergibt sich für die METAS Abschwemmraten von 0.25 g/m² a an der West- und 0.2 g/m² a an der Südfassade. Diese liegen im Bereich der Untersuchungen von Hedberg (2015) mit 0.5 g/m² a Kupfer (Abbildung 3).

Die Belastung vom Fassadenwasser lässt sich hinreichend genau aus den Kenntnissen zu Dächern herleiten. Durch Multiplikation der Abschwemmraten für Dächer mit 0.2 ergeben sich 0.36 g/m² a Kupfer und 0.72 g/m² a Zink (VSA, 2019). Die Erfahrung zeigt, dass diese Annahme besonders für bewitterte West- und Südfassaden zutreffend ist. An den der Witterung abgewandten Ost- und Nordfassaden dürfte aufgrund der vorliegenden Untersuchungen sogar von einer 10fachen Reduktion gegenüber Dachflächen ausgegangen werden, sodass 0.18 g/m² a Kupfer und 0.38 g/m² a Zink resultieren.

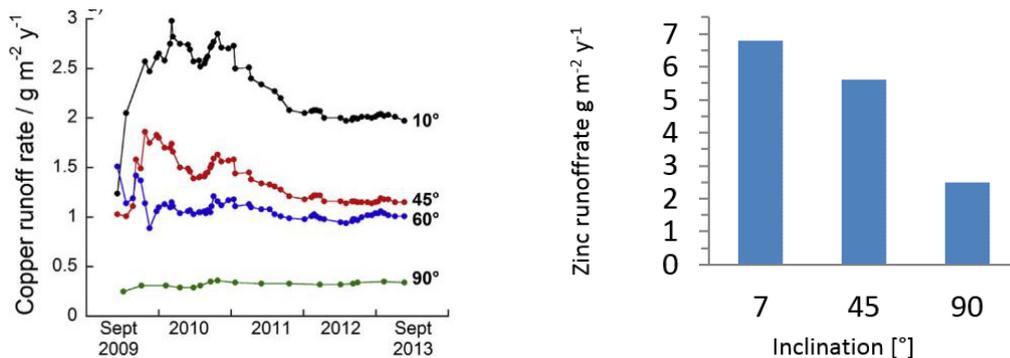


Abbildung 3: Abschwemmraten von Kupfer (links) und Zink (rechts), ermittelt in Feldversuchen an unterschiedlich geneigten Metallblechen (Hedberg, 2015).

4.1.4 Abschwemmung von beschichteten Metallflächen

Von vielen Metallblechen wird die Oberfläche beschichtet, wobei drei Beschichtungstypen verbreitet sind (Steiner, 2012; SN EN ISO 12944-5, 2018):

- Metallisch: Verzinkung, Verzinnung etc.
- Anorganisch (Umwandlungsprodukte): Oxidierung, Phosphatierung etc.
- Organisch (Kunst-, Lackschicht): Anstriche und Folien aus PU, PE, PVDF etc.

Die Kombination aus einer metallischen Beschichtung (z.B. Verzinkung) und einer darüber liegenden organischen Beschichtung ist als sog. Duplex-Beschichtung verbreitet. Die dünn aufgetragenen Beschichtungen dienen zur Verbesserung des Aussehens (dekorative Wirkung) und als Korrosionsschutz vor Umwelteinflüssen.

Für verzinnete Kupferflächen wurde eine Abschwemmraten von 0.25 g/m² a Kupfer (0.02 µm/a), fast 30fach geringer als für Kupfer blank, ermittelt (Anhang, Tabelle 12) (Langbein, 2005) und 0.18 g/m² a Kupfer seitens eco-bau (2010) festgelegt. Dagegen wird für anorganischen Beschichtungen wie vorpatinierte, oxidierte oder phosphatierte Kupferflächen dieselbe Abschwemmraten von 1.8 g/m² a wie für Kupfer blank und für Titanzinkblech und verzinktes Stahlblech von 3.6 g/m² a Zink wie für Zinkblech angenommen (Tabelle 1).

In den letzten Jahren haben organisch beschichtete Metalle grosse Verbreitung für Hallendächer von Industrie und in der Landwirtschaft erlangt. Verbreitet sind PE und PVDF-Beschichtungen von unterschiedlicher Beschichtungsdicke (1-150 µm). Der überwiegende Anteil wird industriell vorbeschichtet. Nur in besonderen Anwendungsfällen, z.B. dem KKL-Dach, wurde nachträglich eine Beschichtung aufgetragen (Kap. 4.1.5).

Bis heute liegen nur wenige Untersuchungen vor, bei denen die Beschichtungsart und Alterung unter natürlichem Witterungseinfluss berücksichtigt sind. So wurden für ein zweifach organisch beschichtetes Zinkblech (150 µm) rund 0.03 g/m² a Zink ermittelt, womit die Rate um einen Faktor 100 niedriger liegt als bei unbeschichtetes Zink (Sandberg, 2007). In zwei Stichproben von organisch beschichteten Zinkdächern (25 µm PE) mit je > 1000 m² wurden im Dachwasser

0.02 und 0.23 µg/L Zink nachgewiesen (Frank, 2016). Diese Konzentrationen liegen um einen Faktor 10 bis 100 tiefer als auf Reinzink. Jedoch blieb in dieser Felduntersuchung unklar, warum die Bodenbelastung der Versickerungsmulde höhere Zinkgehalte als in der Referenzfläche aufwies. Ergänzende Laboruntersuchungen und eine langjährige Untersuchung auf dem KKL-Dach unterstreichen, dass anorganische und organische Beschichtungen die Metallabschwemmung reduzieren können (Kap. 4.1.5 und 4.2.3).

Da die Schutzdauer einer Beschichtung normalerweise kürzer ist als die zu erwartende Nutzungsdauer des Bauteils, sollten Informationen zur Dauerhaftigkeit vorliegen. Aussagen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtungen über die Nutzungsdauer, insbesondere organischen, sind aber selten zu finden. Entsprechend wird bei beschichteten Metallflächen von einer mittleren Belastung ausgegangen (VSA, 2019).

4.1.5 Abschwemmung vom KKL-Dach in Luzern

Das Kultur- und Kongresszentrum Luzern (KKL) wurde 1998 eröffnet und umfasst rund 9400 m² Kupferfläche mit 7° Neigung (Abbildung 4). Um die nachgewiesene Kupfer-Abschwemmung und den Eintrag in den See in Höhe von ca. 11 kg pro Jahr zu minimieren, wurde für das KKL-Dach nachträglich eine organische Beschichtung mit 2K PU Klarlack aufgetragen. Der Wirkungsgrad der Beschichtung soll ≥ 90 % liegen und eine Schutzdauer von ca. 5 Jahren (max. 10 Jahren) erreichen.

Um eine geeignete organische Beschichtung zu ermitteln, wurden im April 2010 zwei je 5 m² grosse Testflächen, im Sommer/Herbst 2012 zwei weitere Testflächen mit Lack beschichtet und in der Regel alle neun Monate Abflussproben auf den Gesamtgehalt von Kupfer analysiert. Die Probenahmen waren so ausgelegt, dass die ersten 10 L Abfluss der Testflächen jeweils separat aufgefangen wurden, um den First-Flush abzudecken. Zusätzlich sind zwei Testflächen aus Glas errichtet worden, um die Hintergrundbelastung durch den Niederschlag zu erfassen.

Auf den nicht beschichteten Kupferflächen (Kupfer blank) lagen zwischen 2010 bis August 2018 die Konzentrationen durchschnittlich bei 3 mg/L Kupfer mit einem anfänglichen Maximum von 11 mg/L Kupfer (Abbildung 4). In früheren Untersuchungen traten davon 60 bis 80 % des Kupfers in gelöster Form auf (Faller, 2001).

Auf den organisch beschichteten Flächen lagen die Konzentrationen mit durchschnittlich 0.089 bzw. 0.081 mg/L Kupfer um mehr als einen Faktor 30 niedriger als bei Kupfer blank. Diese Konzentrationen liegen nur um rund das Doppelte über der Hintergrundkonzentration des Regens von 0.041 mg/L Kupfer, gemessen auf den Referenzflächen aus Glas.

Der rechnerische Wirkungsgrad der Testbeschichtung liegt damit bei rund 98 % gegenüber den nicht beschichteten Kupferflächen und die erwartete Jahresfracht im See nur noch bei 150 bis 400 g/a.

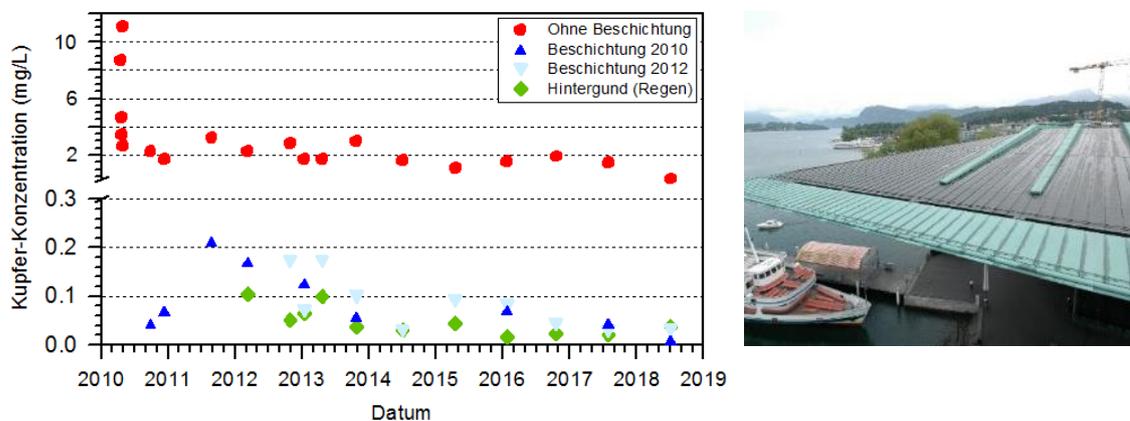


Abbildung 4: Kupfer-Konzentrationen im First-Flush des abfliessenden Niederschlagwassers der nicht-beschichteten und beschichteten Testflächen auf dem KKL-Dach in Luzern sowie die Kupfer-Hintergrundkonzentrationen des Niederschlags (links) und Aufsicht auf das KKL-Dach (rechts).

4.1.6 Modellerte Abschwemmung von Kupfer

Zur Abschätzung der Abschwemmrate von Kupferflächen steht ein einfaches Modell bereit (www.corrosionscience.se). Unter der Berücksichtigung von Jahresniederschlag, pH-Wert, SO₂-Gehalt und Flächenneigung lässt sich die jährliche Abschwemmrate wie folgt abschätzen:

$$R = (0.37SO_2^{0.5} + 0.96 \text{ rain} \cdot 10^{-0.62 \text{ pH}}) \cdot (\cos(\theta) / \cos(45^\circ))$$

Der erste Term beschreibt den korrosiven Einfluss von SO₂ während niederschlagsfreier Zeit, der zweite wertet die Korrosivität des Niederschlags über dessen pH-Wert unter Berücksichtigung der jährlichen Niederschlagsmenge für die Abschwemmung. Der letzte Term beschreibt die Neigung des Dachs zur horizontal projizierten Grundfläche. Hier wird impliziert, dass an vertikalen Bauteilen ($\theta = 90^\circ$) die Abschwemmrate Null sei, was natürlich nicht der Realität entspricht. Für Fassaden wird von Schmidt (2017) nach zahlreichen Testrechnungen empfohlen, vertikale Bauteile mit einer Neigung von 60-80° anzunehmen, um den Schlagregen nicht zu vernachlässigen. Besonders ist der pH-Wert als Eingangsparameter zu beachten, da dieser das Modellergebnis stark beeinflusst. Welche Validierungsschritte unternommen wurden, ist unklar.

Unter Berücksichtigung von einem Jahresniederschlag von 1200 mm, pH 6.0, 1.0 µg/m³ SO₂ wurde für ein Kupferdach (0° Neigung) eine Abschwemmrate von 0.83 g/m² a Kupfer, für eine gleichartige exponierte Fassade (90° Neigung) von 0.01 g/m² a Kupfer berechnet. Die Eingangsparameter entsprechen dem Standort Rapperswil.

Die Modellergebnisse liegen um rund 60 % niedriger als die in der Schweiz etablierte Abschwemmrate von 1.8 g/m² a Kupfer (KBOB, 2001) und 40 % niedriger als der Mittelwert aus der Literaturrecherche. Der grosse Unterschied zu den Messwerten wirft die Fragen auf, ob die wenigen Modellparameter vielleicht die reale Bewitterung nicht hinreichend abbilden.

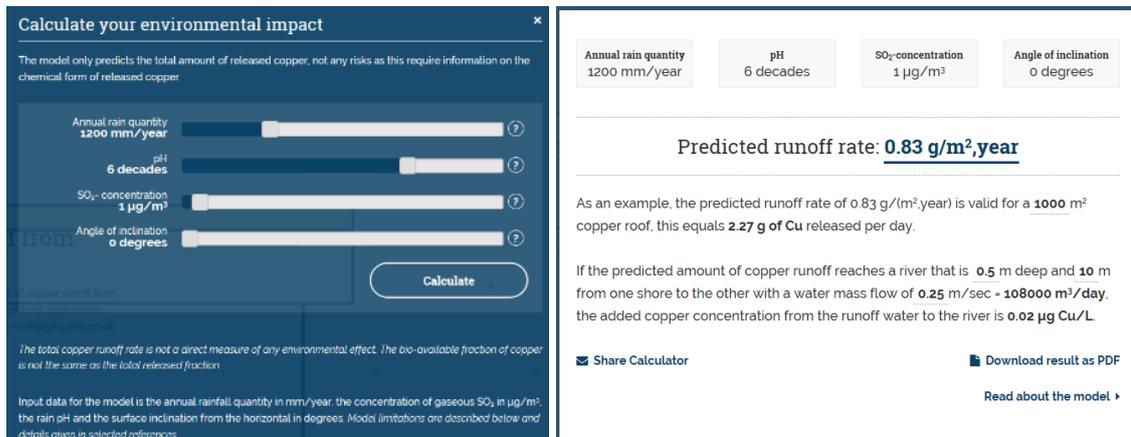


Abbildung 5: Eingabeparameter für das Modell zur Abschätzung der Abschwemmrate von Kupferflächen (links) und Übersicht zu den Modellresultaten (rechts).

4.2 Messungen zur Abschwemmung von Metallflächen

Um die aus Literaturdaten zu erweitern, wurden Stichprobenmessungen an zwei Dächern und Laborversuche zur Abschwemmung von Metalloberflächen durchgeführt.

4.2.1 Zinkdach, unbeschichtet

Das Oberstufenschulhaus Rain in Jona (Tägeraustasse 40, 8645 Jona SG) verfügt über zwei Vollzinkdächer (Schulgebäude und Mehrzweckhalle) der Firma Rheinzink aus dem Jahr 1989 (ca. 30 Jahre alt). In Abbildung 6 ist die Gebäudeanordnung dargestellt. Die gesamte Dachfläche der Mehrzweckhalle von ca. 950 m² ist mit einem Glasaufbau am Giebel in zwei Hälften unterteilt, sodass eine Beprobung von 475 m² Dachfläche über eine Regenrinne

möglich war. Das Niederschlagswasser wird über den Mischkanal zur Kläranlage Rapperswil-Jona geleitet.

Zink (gesamt) wurde über drei Ereignisse (3.7., 8.8., 29.10.18) erfasst. Dafür sind an beiden Fallrohren zeitnah zueinander (ca. 3 min Abstand) Stichproben entnommen und zu einer Mischprobe vereint worden. Die ersten beiden Ereignisse wurden mit Proben nach 1, 5, 10, 15 und 40 min bzw. fünf Proben in 15 min Abständen abgedeckt. Mit den letzten Proben endeten die Abflüsse. Der dritte Termin umfasste drei Proben in Abständen von 30 min. Der Dachabfluss ging auch nach der letzten Probenahme weiter. Das letzte Regenereignis vor den Probenahmen trat 20, 7 und 2 Tage vor den jeweiligen Probenahmen auf. Die Niederschlagsmengen über die Beprobung umfassten 8, 2.5 und 1.1 L/m² und bis zu 24, 7 und 0.2 mm in 10 min (Abbildung 7).

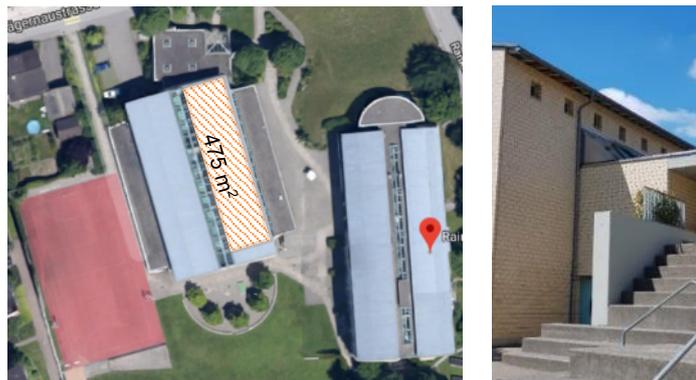


Abbildung 6: Zinkdach vom Oberstufenschulhaus Rain in Jona (links; Quelle: Google) und Seitenansicht des Gebäudes mit Fallrohr (rechts). Die schraffierte Fläche zeigt die beprobte Dachfläche.

Im ersten Abflussereignis nahmen die Konzentrationen von 14 mg/L auf 2.0 mg/L Zink in der letzten Probe nach 100 min ab (Abbildung 7). Im zweiten Ereignis gingen die Konzentrationen von 5.1 mg/L Zink in der ersten Probe auf 3.1 mg/L Zink zurück, um in den zwei weiteren Proben bis auf 5.7 mg/L Zink nach 95 min wieder anzusteigen. Der Konzentrationsanstieg ist auf die geringere Regenintensität bzw. die resultierende geringe Verdünnung zurückzuführen. Im letzten beprobten Ereignis wurden drei Proben gesammelt mit 19.7 mg/L Zink bei Abflussbeginn und 7.3 mg/L Zink und 6.2 mg/L nach 60 min. Die hohen Konzentrationen liegen oberhalb des Löslichkeitsprodukts von Zink, sodass in jedem Fall ein Anteil ungelöst abgeschwemmt wurde.

Für die drei Abflussereignisse ergeben sich mittlere Dachwasserkonzentrationen von 6.6, 4.3 und 11 mg/L Zink. Die Konzentrationen der Beprobungen 1 und 2 liegen im Bereich einer typischen mittleren Zink-Konzentration von 3.6 mg/L Zink (eco-Bau, 2010). Die hohen Konzentrationen beim dritten Ereignis sind auf die geringe Niederschlagsmenge zurückzuführen.

Der Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit ist vergleichbar zu anderen Untersuchungen von Dachwasser und gibt einen direkten Hinweis auf die Abschwemmung (Langbein, 2005). Würden die Leitfähigkeit online erfasst, liesse sich vermutlich der Konzentrationsverlauf sehr gut abschätzen. Die pH-Werte zwischen 6 und 7 unterstreichen, dass Zinkionen vorliegen können, weil pH-bedingte Ausfällungen erst bei pH >8 auftreten.

Bezogen auf das Mehrzweckgebäude mit 950 m² Dachfläche wurden 53, 11 und 12 mg/m² (10 bis 5 mg/(mm/m²) oder total 50, 10 und 10 g Zink in die Umwelt abgeschwemmt. Hochgerechnet auf 50 Abflussereignisse in Rapperswil mit ähnlichen Frachten würden 3 g/m² a emittieren. Die ermittelten Frachten für das 30 Jahre alte Zinkdach sind damit ähnlich hoch wie bei einem neuen Zinkdach. Dies bestätigt, dass die Abschwemmrate von Zink blank über die Nutzungsdauer nicht abnimmt und im Bereich des KBOB-Werts liegt (KBOB, 2001).

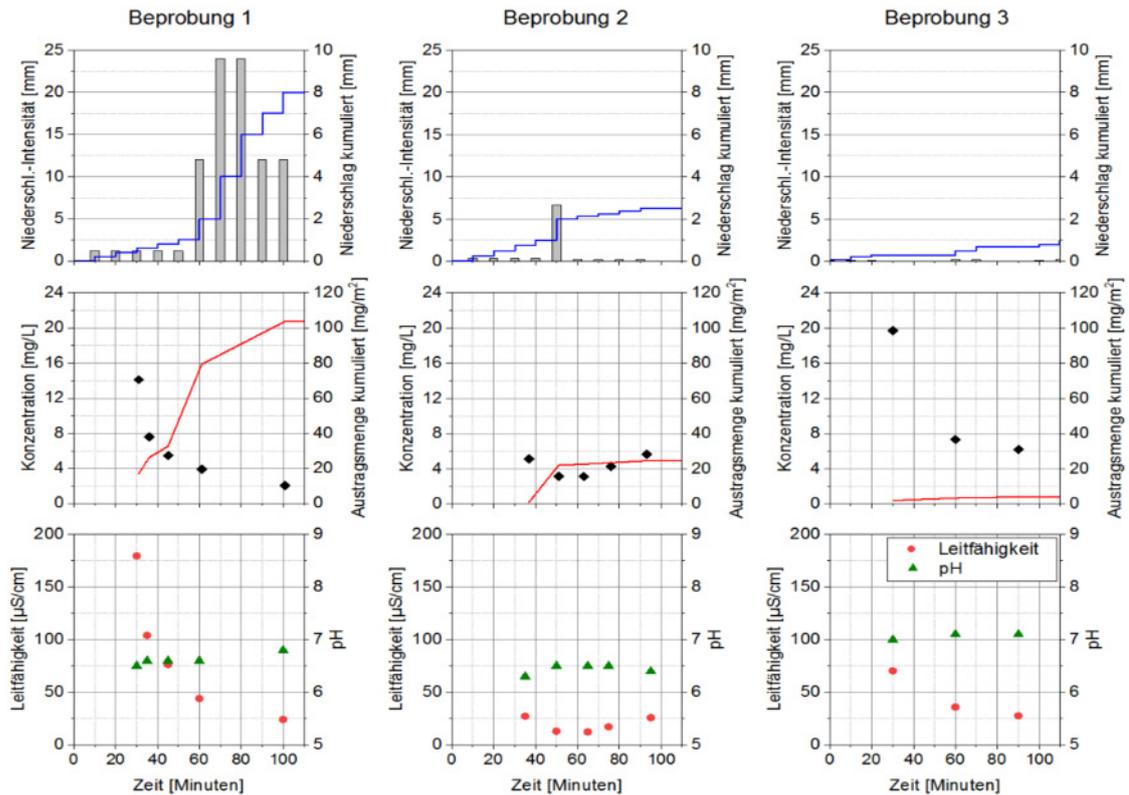


Abbildung 7: Niederschlagsintensität und kumulierter Niederschlag (oben), Zinkkonzentrationen und kumulierte Fracht (Mitte) sowie pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit (unten) während des ersten (3.7., links), zweiten (8.8., rechts) und dritten (29.10.) Abflussereignisses (total n=13 Proben).

4.2.2 Kupferdach, unbeschichtet

Das abfließende Niederschlagswasser von einem Kupferdach mit 400 m² Fläche in der Gemeinde Pfäffikon SZ, erstellt im Jahr 1990, wurde über zwei Ereignisse beprobt. Der Dachabfluss wird üblicherweise in der angrenzenden Wiese versickert (Abbildung 8). Vom ersten Abflussereignis (27.10.) wurden vier Stichproben, vom zweiten (13.11.) drei Proben direkt aus dem Dachablauf im Abstand von 30 min bzw. 60 min genommen werden. Beide Regenereignisse dauerten über die letzten Proben hinaus an. Die letzten Regen traten 26 und 13 Tage vor den beiden Probenahmen auf.



Abbildung 8: Beprobtes Kupferdach in der Gemeinde Pfäffikon SZ. Links: Dachfläche (Quelle: map.geo.admin.ch), rechts: Dachentwässerung auf angrenzende Wiese.

Die Niederschlagsmengen pro Beprobung umfassten 12.6 und 1.6 L/m² mit maximalen Intensitäten von 1.9 und 0.6 mm in 10 min (Abbildung 9). Die Konzentrationen nahmen von 2.7 mg/L im ersten Abflussereignis auf 1.1 mg/L Kupfer in der letzten Probe nach 2 h ab (Abbildung 9). Im zweiten Abflussereignis stiegen dagegen die Konzentrationen von 1.95 mg/L auf 3.24 mg/L Kupfer an, weil die Regenintensität so gering war. Für die beiden Abflussereignisse ergeben sich mittlere Dachwasserkonzentrationen von 1.6 und 2.6 mg/L Kupfer. Die gemessenen Konzentrationen liegen im oberen Bereich der KBOB Empfehlung (2001) und der Zusammenstellung von Helmreich (2018, pers. Mitt.).

Aufgrund der Abschwemmraten von im Mittel 20 und 4 mg/m² ergeben sich bei 400 m² Dachfläche rund 8 und 2 g Kupfereintrag in die Umwelt. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass die Abschwemmung im zweiten Ereignis noch zunahm bzw. das Ereignis noch andauerte. Wird die ereignisbezogene Abschwemmung von 20 mg/m² für 50 Jahresabflussereignissen zugrunde gelegt, resultiert eine theoretische Abschwemmrate von 1 g/m² a. Diese liegt gegenüber der Literatur im unteren Bereich der Resultate.

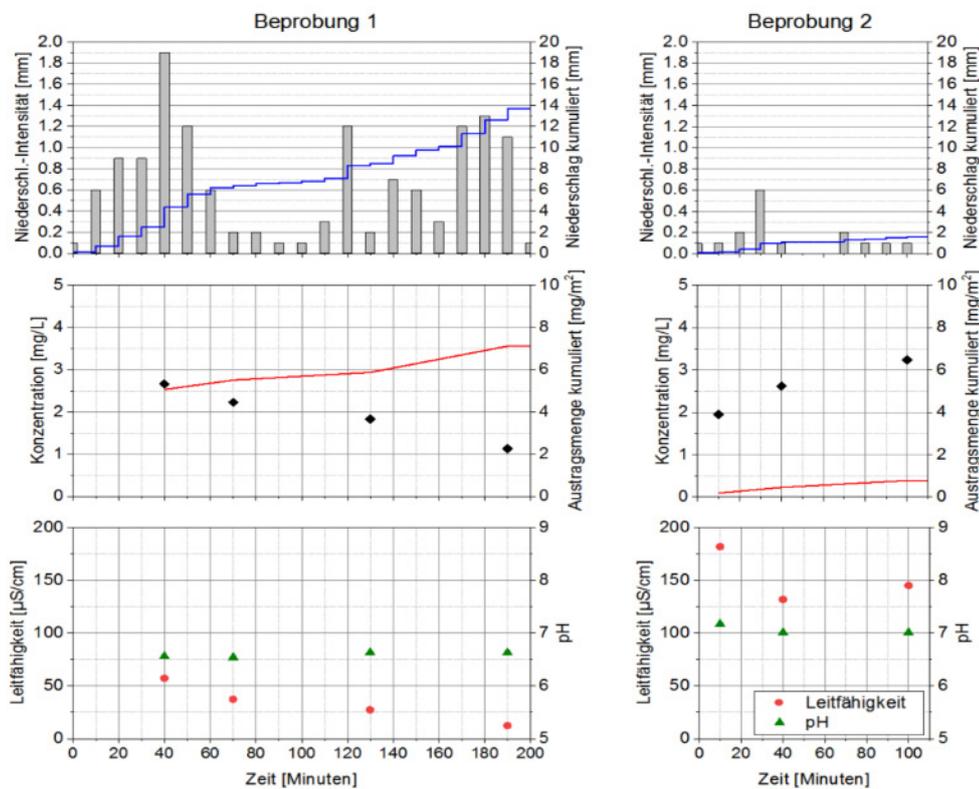


Abbildung 9: Niederschlagsintensität und kumulierter Niederschlag (oben), Kupfer-Konzentrationen und kumulierte Fracht (Mitte) sowie pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit (unten) während des ersten (27.10., links) und zweiten (13.11., rechts) Abflussereignisses (total n=7 Proben).

4.2.3 Laborversuche zur Abschwemmung

Die Abschwemmung von beschichteten und blanken Metallblechen wurde im Labor an sieben marktüblichen Produkten untersucht (Tabelle 2). Zwei Titanzinkbleche und das Kupferblech sind durch eine Säurebehandlung vom Hersteller voroxidiert worden. Bei zwei Montana-Produkten ist die Oberfläche des verzinkten Stahlkerns mit Polyester (25 µm Dicke) oder PRISMA® (50 µm Dicke; Duplex-Beschichtung) organisch beschichtet. Als Referenzen dienen ein walzblankes verzinktes Montana-Blech und ein walzblankes Titanzinkblech.

Die Abschwemmung wurde mit der horizontalen dynamischen Oberflächenauslaugprüfung untersucht (DSLIT) (SNR CEN/TS 16637-2, 2014). Mit dem DSLIT lässt sich das Auslaugverhalten von Bauprodukten in Kontakt mit Wasser ermitteln, um den Eintrag von

Stoffen in die Umwelt abzuschätzen. Zwar wird dieser Test nicht für Untersuchungen zur Metallabschwemmung empfohlen, jedoch spricht für dessen Anwendung, dass der Auswaschtest einfach und reproduzierbar ist und Vergleiche zu anderen Bauprodukten zulässt.

Pro Prüfkörper (18.5 x 9 cm, 100 cm²) entstehen über 64 Tage acht Eluate, wobei die Wasserkontaktzeiten von 6 Stunden beim ersten auf 28 Tage beim letzten Messpunkt zunehmen (Anhang: Tabelle 14). Der DSLT erfolgte in Glasschalen mit deionisiertem Wasser bei einem Flüssigkeit/Oberflächen-Verhältnis von 40 (40 L/m²) und Raumtemperatur. Jedes Produkt wurde in Doppelbestimmung untersucht. Die Metallkonzentration (gesamt, gelöst), der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit wurden in total 112 Eluaten quantifiziert.

Tabelle 2: Kumulierte Abschwemmung über 64 Tage Versuchsdauer (g/m²) und extrapolierte Abschwemmraten (g/m² a) von sieben Metallblechen, davon drei voroxidiert, zwei organisch beschichtet und zwei blank, die über den DSLT berechnet wurden.

Produkt	Hersteller	Material Element	Beschichtung	Farbe	Abschwemmung kumuliert (g/m ²)	Abschwemmrate pro Jahr (g/m ² a)
1	Montana	Stahl, verzinkt	PRISMA, PE 50 µm	Sirius (RAL 9006)	0.0013 Zn	-
2	Montana	Stahl, verzinkt	-	walzblank	0.922 Zn	2.20 Zn
3	Montana	Stahl, verzinkt	PE, 25 µm	weiss (RAL 9002)	0.0015 Zn	-
4	VMZINC®	Titanzink	voroxidiert	Anthrazit ANTHRA-ZINC®	1.235 Zn	2.95 Zn
5	RHEINZINK®	Titanzink	voroxidiert	Schiefergrau prePATINA	0.0069 Zn	-
6	RHEINZINK®	Titanzink	-	walzblank	0.744 Zn	1.78 Zn
7	KME	Kupfer	voroxidiert	Schiefergrau, TECU®	0.364 Cu	0.87 Cu

Die Resultate können zur Extrapolation über eine definierte Nutzungsdauer dienen, wobei die Diffusion linear zur Wurzel der Zeit (\sqrt{t}) und die Auflösung linear und unabhängig von den Erneuerungszeiten sind. Extrapoliert wurde gemäss DSLT wie folgt:

$$R_{TE} = R_8 \sqrt{\frac{T_E}{64}}$$

R_{TE} ist die extrapolierte Freisetzung über T_E -Tage (hier: 1 Jahr, 365 Tage) und R_8 ist die kumulative Flächenfreisetzung aller Eluate.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den zwei walzblanken Zinkblechen, dem voroxidierten ANTHRA-ZINC®-Blech und voroxidierten Kupferblech mit zunehmender Wasserkontaktzeit die Konzentrationen in den Bereich von mg/L steigen (Abbildung 10). So liegt für ANTHRA-ZINC® über 64 Tage Versuchsdauer die Freisetzungsmenge bei 1.2 g/m² Zink (Tabelle 2). Die Konzentrationen der zwei organisch beschichteten Bleche (Produkte 1, 3) bleiben unterhalb der Bestimmungsgrenze und die des voroxidierten prePATINA-Produkts bis auf die letzte Wasserkontaktzeit. Die kumulierten Freisetzungsmengen liegen deshalb mit 0.001 bis 0.007 g/m² Zink um Faktor 100 bis 1000 niedriger als walzblankes Zinkblech (Abbildung 10).

Für das walzblankes Zinkblech 2 und 6 ist ein deutlicher Rückgang der Zinkkonzentrationen von Probe 6 zu 7 bzw. 5 zu 6 zu verzeichnen (Abbildung 10). Dieser Konzentrationsrückgang ging mit der sichtbaren Ausbildung einer Zinkpatina einher. Die Oberflächenbehandlung bei Produkt 5 scheint im Vergleich zu voroxidierten Produkten 4 und 7 die Metallfreisetzung in der anfänglichen Expositionsphase vollständig zu unterbinden.

Aufgrund der verschiedenen Metallfreisetzungen wurden für die Produkte 2, 4, 6 und 7 die Abschwemmraten für ein Jahr berechnet. Diese liegen bei 2.20 g/m² a Zink für Montana blank, 2.95 g/m² a Zink für voroxidiertes VMZINC®, 1.78 g/m² a Zink für walzblankes Titanzink und 0.87 g/m² a Kupfer für voroxidiertes Kupferblech (Tabelle 2). Diese Raten liegen zwar tiefer als in Felduntersuchungen, bilden aber bekannte Materialunterschiede zwischen Zink- und

Kupferblechen gut ab. Die hohe Konsistenz der Resultate bedeutet, dass der DSLT für eine grobe Abschätzung der Wirksamkeit von Beschichtungen eingesetzt werden kann. Bleche mit vorgängiger Alterung dürften darüber hinaus experimentelle Hinweise zur Dauerhaftigkeit der Beschichtungen geben.

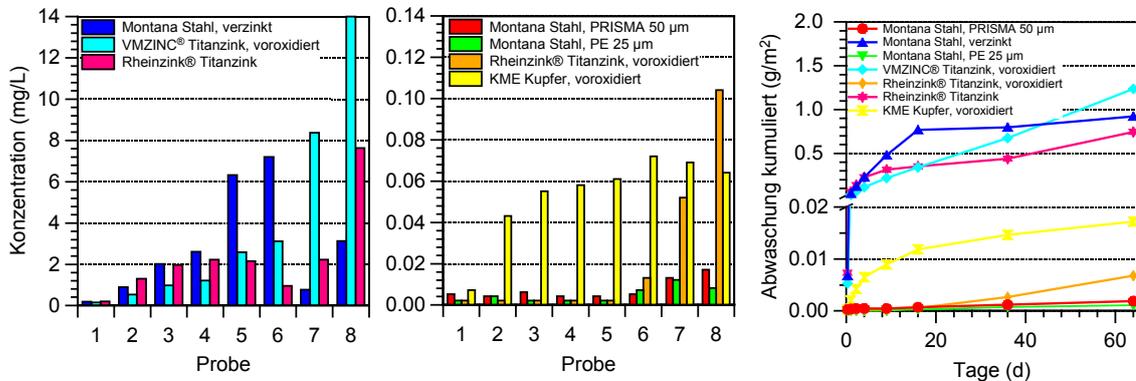


Abbildung 10: Konzentrationen (links, Mitte; mg/L) und kumulierte Abwaschung (rechts, mg/m²) von sieben Metallblechen untersucht mit dem DSLT. Die linke Abbildung zeigt Produkte mit starker, die mittlere mit geringer Auswaschung (organisch beschichtet, oxidiert). Für alle Bleche ist Zink gesamt dargestellt, mit Ausnahme von KME mit Kupfer.

5 Grundwasser

5.1 Rechtliche Grundlagen

In der Schweiz wird ein nutzungsorientierter, planerischer Grundwasserschutz betrieben, um Grundwasser vor Verschmutzungen zu schützen. Die Schutzzonen umfassen die Bereiche S1, S2 und S3 bei Trinkwassernutzung. Weitere Elemente des planerischen Grundwasserschutzes sind der Gewässerschutzbereich A_u für nutzbare unterirdische Gewässer, der Zuströmbereich Z_u bei Verunreinigungen aus der Bodenbewirtschaftung und übrige Bereiche üB mit geringerer Grundwasserrelevanz.

Die GSchV verfolgt das ökologische Ziel, dass ins Grundwasser keine künstlichen und langlebigen Stoffe eingetragen werden (GSchV Anh. 1 Ziff. 2 Abs. 3 Bst. b). Für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, enthält die GSchV numerische Anforderungen, z.B. für Pestizide von 0.1 µg/L pro Wirkstoff (Tabelle 3) (GSchV Anhang 2 Ziffer 22 Abs. 2 Nr. 11). Für Kupfer und Zink fehlen solche Anforderungen. Aus diesem Grund hat das BAFU in der Wegleitung Grundwasserschutz Indikatorwerte für Kupfer und Zink angegeben, welche bei Überschreitung auf eine anthropogen verursachte Belastung hinweisen (Tabelle 3). Ausserdem sind für organische Pestizide pro relevanter Metabolit 0.1 µg/L und für die Summe aller Wirkstoffe und relevanten Metabolite 0.5 µg/L genannt.

Tabelle 3: Numerische Anforderungen der Gewässerschutzverordnung für Grundwasser (GSchV) und die Indikatorwerte der Wegleitung Grundwasserschutz (WL).

Parameter	Konzentration (µg/L)	Quelle
Kupfer (Cu)	2 gelöst	WL
Zink (Zn)	5 gelöst	WL
Organische Pestizide (Biozidprodukte und Pflanzenschutzmittel)	0.1 je Einzelstoff und relevanter Metabolit	GSchV
	0.5 für Summe der Einzelstoffe und relevante Metabolite	WL

Die mögliche Beeinträchtigung vom Grundwasser durch urban belastetes Niederschlagswasser ist am ehesten in den Gewässerschutzbereichen S3, S2, Gewässerschutzbereich Au, Zuströmbereich Zu und übriger Bereich üB zu erwarten. Die starke Vermischung von Sicker- und Grundwasser lässt aber nur eine kleine Konzentrationsänderung erwarten, die nicht mit einer zeitlich und räumlich grobmaschigen Beprobung zu erfassen ist.

5.2 Anreicherung von Metallen in Versickerungsanlagen

Wird mit Metallen belastetes Niederschlagswasser versickert, ist meist in den ersten 30 cm des Bodens eine Anreicherung der Metalle zu erwarten. Partikulär vorliegende Metalle werden durch die Filtrationswirkung des Bodens, der Sedimente oder Filtermaterialien zurückgehalten. Gelöst vorliegende Metallionen adsorbieren an der Bodenmatrix, den Adsorbermaterialien oder können durch einen basischen pH-Wert in eine partikuläre Form überführt werden. Bei der künstlichen Versickerung sind lokal weit höhere Bodenbelastungen zu erwarten als bei der natürlichen Infiltration. Der Grund ist, dass auf grösseren Dachflächen gesammeltes Wasser auf einer relativ kleinen durchlässigen Bodenfläche versickert, wodurch je nach Bemessung der Sickerfläche und deren Durchlässigkeit eine 5 bis 100fach grössere flächenspezifische Stofffracht zugeführt wird. Auf den durchlässigeren und grobkörnigeren Materialien besteht eine grössere Gefahr der diffusen Verschleppung der Metalle bis ins Grundwasser.

Bei der Dachwasserversickerung ist gemäss KBOB (2001) von einer 20 m² Fläche mit 5 % Metallanteil davon auszugehen, dass sich die Belastung im Oberboden einer Mulde um 3.2 g/kg a Kupfer und um 6.4 g/kg a Zink und im Unterboden einer Schachtversickerung um 1.8 g/kg a Kupfer und 3.6 g/kg a Zink erhöhen. Bei der gleichen Dachfläche, aber 100 % Metallanteil, erhöht sich die Bodenbelastung um das 20fache auf 64 g/kg a Kupfer und um 128 g/kg a Zink. Der wesentliche Unterschied zwischen den Versickerungsanlagen ist, dass die abgeschwemmten Metalle bei einer Muldenversickerung auf einer 10fach und einer Sickeranlage 20fach kleineren Fläche aufkonzentriert werden. Bei Schachtanlagen wandern die Metalle je nach Bodenart und chemischem Milieu schneller in die Tiefe.

Eine Versickerungsmulde in Schaffisheim (40 x 60 m Fläche) wurde 2006 auf Zink im Oberboden (Probenahmen 0 - 10, 10 - 20 cm Tiefe; 52 % Sand, 26 % Schluff, 22 % Ton) untersucht (Schenker, 2006). Über fünf Einleitungen gelangte das Dachwasser in die Mulde. Die Zinkbelastung nach 15 Jahren Betriebsdauer erreichte durchschnittlich 1220 mg/kg Boden (TS) mit einem Minimum von 200 mg/kg und Maximum von 3180 mg/kg Zink. Damit wurde der Prüfwert der Bodenschutzverordnung (BSchV) von 300 mg/kg Zink, in einer Probe sogar der Sanierungswert von 2000 mg/kg Zink überschritten.

Tabelle 4: Zinkdächer (Bachmann, 2008).

	Weinfeld TG	Oberburg BE	Aesch BL	Dullikon SO
Material Dach	Zinkblech	Zinkblech	Dachrinnen, Fallrohre	Dachrinnen, Fallrohre
Beschichtung	25 µm PE	25 µm PE	unbeschichtet	unbeschichtet
Metallfläche (m ²)	1841	6200	930	30
Versickerungsfläche (m ²)	195	130	3000	56
Baujahr	2004	1994, 1998	1995	1995

In vier Versickerungsmulden (Weinfeld TG, Aesch BL, Oberburg BE, Dulliken SO), in die vorwiegend Niederschlagswasser von Dächern mit erhöhten Anteilen von unbeschichtetem Zinkblech und solchen mit PE-Beschichtung geleitet wurde (Tabelle 4), sind jeweils zwei bis vier Mischproben entnommen und auf Zink untersucht worden (Bachmann, 2008). Am Standort BL überschritten die Gehalte den Prüfwert von 150 mg/kg Zink und es konnte nachgewiesen werden, dass die Bodenbelastung in 0 bis 20 cm Tiefe innerhalb von 10 Jahren von 370 mg/kg auf 1580 mg/kg Zink angestiegen ist. Auf Sickerflächen mit Dachwassereinleitung von blanken Zinkblechen erreichten die Belastungen 5- bis 10-mal höhere Werte als an Standorten mit organisch beschichteten Metallflächen.

In anderen Versickerungsmulden im Einzugsbereich von vier beschichteten Zinkdächern (25 µm PE) mit je > 1000 m² wurden in drei von vier Mulden signifikant höhere Zinkgehalte (110 bis 342 mg/kg TS) als in den Referenzflächen gemessen (Frank, 2016). Diese Belastungen im Bereich organisch beschichteter Metallflächen können bedeuten, dass die Beschichtungen nicht dauerhaft und vollständig wirksam waren oder der Boden vorbelastet war.

5.3 Recherche Grundwassermessdaten

5.3.1 Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA, Modul TREND

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA umfasst schweizweit mehr als 600 Messstellen. Anorganische Stoffe werden seit 1997 an den 52 Messstellen des Moduls TREND analysiert. Die Karte gibt die räumliche Verteilung der NAQUA-TREND Messstellen und die Besiedlungsdichte der Schweiz pro km² wider (Abbildung 11). Diesen Messstellen ist je eine Hauptbodennutzung zugeordnet, welche derjenigen Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet entspricht (Anhang: Tabelle 15).

Vom BAFU wurden für diese Messstellen die Analyseresultate für Kupfer, Zink, Mecoprop, Diuron und Terbutryn im Zeitraum 2006 bis 2017 bereitgestellt. Der Datensatz umfasste Analysen für 2610 Proben mit jährlich ein bis vier Probenahmen pro Messstelle. Anorganische Elemente, darunter Kupfer und Zink, werden seit 2014 nur noch einmal alle vier Jahre im Rahmen des Langzeitmonitorings im Modul TREND analysiert (davor generell einmal pro Jahr). Die Analysen wurden durch mehrere Labore mit unterschiedlichen analytischen Methoden und Bestimmungsgrenzen (BG; meistens Cu/Zn < 1.0 µg/L, Pestizide < 0.01 µg/L) durchgeführt. Die Konzentration der Metalle bezieht sich auf die Gesamtgehalte der Elemente im Grundwasser.

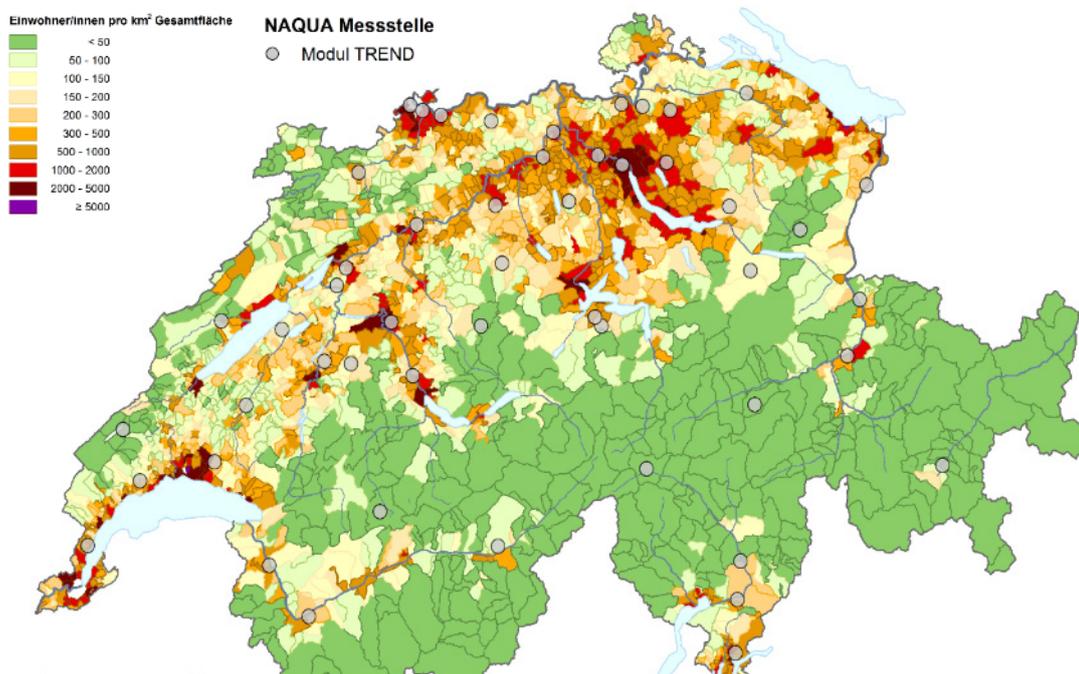


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der 52 NAQUA Messstellen und die Einwohnerdichte in der Schweiz.

Unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) liegen rund 80 % aller Kupfer- und Zink-Analysen. Für die 20 % Positivbefunde oberhalb BG betragen die mittleren Konzentrationen 2.67 µg/L Zink (min. 0.02 µg/L, max. 12.2 µg/L) und 0.93 µg/L Kupfer (min. 0.02 µg/L, max. 5.1 µg/L). Damit liegen die mittleren Konzentrationen rund halb so hoch wie die jeweiligen Indikatorwerte für Grundwasser.

In der weiteren Datenanalyse wurde auf 11 NAQUA-TREND Messstellen mit ca. 700 Beprobungen fokussiert, die aufgrund urbaner Nutzungen im Einzugsgebiete der Hauptbodennutzung „Siedlung und Verkehr“ (SV) zugeordnet sind. Die Kupfer- und Zink-Konzentrationen über die Beobachtungsperiode von 11 Jahren sind für die 11 SV-Messstellen im Anhang Abbildung 21 detailliert dargestellt. Kupfer und Zink wurden in jeweils 48 % aller 120 bzw. 103 SV-Proben oberhalb BG nachgewiesen (Tabelle 5). Über diese Proben betrachtet liegen 90 % der Kupfer- und Zinkresultate unterhalb der Indikatorwerte von 2 µg/L Kupfer gelöst und 5 µg/L Zink gelöst. In 10 % der Proben (11 Kupfer- und 8 Zink-Analysen) traten Überschreitungen auf (Anhang, Abbildung 22). Die höheren Konzentrationen von Zink traten in Einzelproben der Messstellen NTG35 mit 7.9 und 6.2 µg/L, NTG36 mit 5.6 µg/L, NTG39 mit 6.2 und 5.1 µg/L und NTG40 mit 11.6 und 5.9 µg/L auf. Ein Protokoll zur Vorgehensweise bei Probenahmen soll vermeiden, dass die Wasserproben durch Rohrmaterial (verzinkter Stahl o.ä.) oder Probenahmegerät messbar beeinflussen werden. Dies lässt sich jedoch nicht immer vollständig ausschliessen, womit sich die erhöhten Zinkresultate möglicherweise zum Teil erklären lassen.

Tabelle 5: Stoffvorkommen an 11 bzw. 5 Messstellen mit Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr (SV) in NAQUA-TREND im Zeitraum 2006 bis 2017. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.

	Analysen (Anzahl)	Kupfer	Zink	Diuron	Mecoprop	Terbutryn
11 SV	Gesamt	120	103	598	532	582
	oberhalb BG	58	50	3	1	0
	oberhalb WL oder GSchV	11	8	0	0	0
5 SV	Gesamt	54	52	216	183	209
	oberhalb BG	26	24	0	1	0
	oberhalb WL oder GSchV	3	3	0	0	0

Die Pestizide Mecoprop, Diuron und Terbutryn wurden in mehr als 500 Proben an diesen 11 Messstellen analysiert. Dennoch traten nur in einer Probe Mecoprop und in drei Proben Diuron auf (Tabelle 5). An der Messstelle NTG40 wurden sowohl Diuron mit 2 ng/L (9.3.2006) als auch Mecoprop mit 48 ng/L (02.09.2008) gefunden. Dies ist die einzige Messstelle mit gleichzeitigem Nachweis von zwei betrachteten Pestiziden und Kupfer im Grundwasser. Einer Probe von NTG14 sind 11 ng/L Diuron (28.05.2013) zugeordnet. Terbutryn war in keiner der Proben nachweisbar. Auch wenn sich die Herkunft der Pestizide nicht immer eindeutig herleiten lässt, so ist der Eintrag wahrscheinlich über die Auswaschung von Fassaden- und Dachmaterialien bzw. versickerndes Niederschlagswasser zu erklären.

In einem zweiten Schritt wurden fünf Messstellen mit Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr genauer betrachtet. Die Auswahl erfolgte auf Grund von erhöhten Zink- oder Kupferkonzentrationen, bei denen Verfälschungen durch das Leitungsmaterial in der Fassung ausgeschlossen werden konnten, und einer hohen urbanen Umgebungsnutzung im Einzugsgebiet, die aus Luftbildern hergeleitet wurde. Dabei handelt es sich um vier Brunnen (Vertikal-, Horizontalfilterbrunnen) und ein Piezometer mit mittleren Grundwasserflurabständen zwischen 2.0 und 21 m unter Gelände. Die drei Messstellen NTG 12, 34 und 36 weisen einen Grundwasserflurabstand < 10 m auf.

An den fünf SV-Messstellen lagen 48 % der Kupfer- und 46 % der Zinkkonzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze (Tabelle 5) und wie bei den 11 SV-Messstellen rund 90 % aller Kupfer- und Zinkkonzentrationen unterhalb der Indikatorwerte (Anhang: Abbildung 22). Die mittleren Konzentrationen über die fünf SV-Messstellen waren mit 2.2 µg/L Zink (min. 0.3 µg/L, max. 11.6 µg/L) und 1.2 µg/L Kupfer (min. 0.04 µg/L, max. 2.8 µg/L) halb so hoch wie die Indikatorwerte. In je drei Proben wurden die Indikatorwerte überschritten. Neben der Überschreitung des Indikatorwerts von Zink an den Messstellen NTG40 und NTG36 wurde derjenige von Kupfer an NTG12 (2.3 µg/L), NTG33 (2.8 µg/L) und NTG40 (2.5 µg/L)

überschritten (Abbildung 12). Über die Untersuchungsperiode ist an den jeweiligen Messstellen kein besonderer Trend erkennbar (Anhang: Abbildung 23).

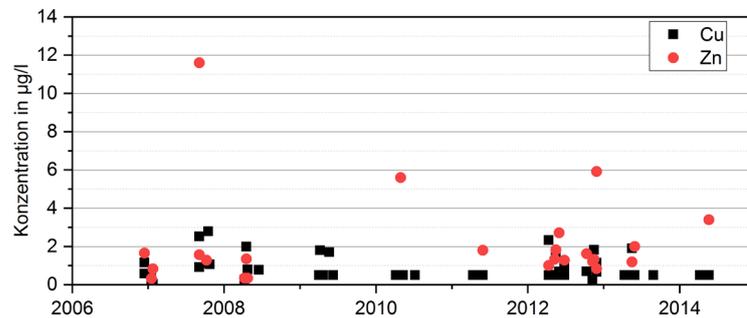


Abbildung 12: Kupfer- ($n = 26$) und Zinkkonzentrationen ($n = 24$) für fünf ausgewählte SV-Messstellen von NAQUA-TREND.

Die gemessenen Zink- und Kupferkonzentrationen im Grundwasser können wahrscheinlich auf versickertes Niederschlagswasser der urban geprägten Einzugsgebiete zurückgeführt werden, weil für geogene oder landwirtschaftliche Einträge keine Hinweise vorliegen. Informationen lagen im NAQUA-TREND aber nicht vor, ob Versickerungsanlagen von Strassen- oder Liegenschaftswasser im Zustrombereich der Fassungen existieren. Metalldachflächen lassen sich als mögliche Quellen ausschliessen, weil solche auf den Luftbildern der Einzugsgebiete nicht sichtbar sind. Kaum erklärbar durch das Einzugsgebiet sind die Befunde an NTG40, weil eher ein suburbanes Einzugsgebiet vorliegt.

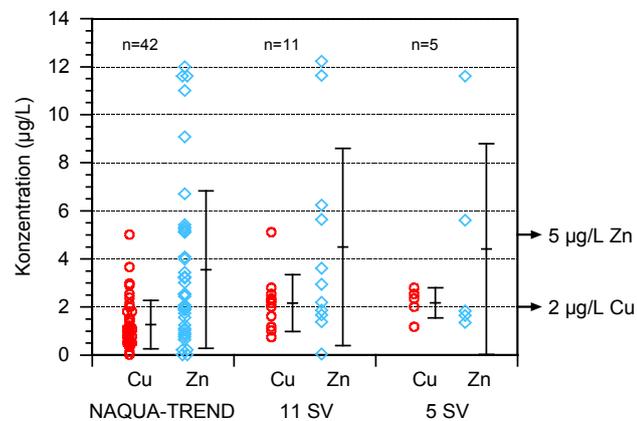


Abbildung 13: Verteilung der maximalen Kupfer- und Zinkkonzentrationen pro Messstelle. NAQUA-TREND (ohne SV): 42 Messwerte, 11 SV-Messstellen: 11 Werte, 5 SV-Messstellen: 5 Werte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Höchstwerte von Kupfer und Zink von den 11 bzw. 5 spezifisch ausgewerteten Messstellen mit Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr höher liegen als die 42 Messstellen vom NAQUA-TREND Messnetz ohne die SV-Messstellen (Abbildung 13). Das gleichzeitige Auftreten von Mecoprop, Diuron und Kupfer in einer Grundwasserprobe veranschaulicht besonders gut, dass urban belastetes Niederschlagswasser den Stoffeintrag verursachte. Jedoch liegen nur wenige und stark streuende Datenpunkte für die betrachteten Messstellen vor. Aufgrund fehlender Informationen zu den Einzugsgebieten (Angaben über Versickerungsanlagen, Metalldächer etc.), der geringen Beprobungsfrequenz und geringen Anzahl von urban geprägten Messstellen ist es schwierig, den effektiven Stoffeintrag durch Dach- und Fassadenmaterialien oder andere urbane Quellen spezifisch für NAQUA-TREND zu beantworten.

5.3.2 Kanton Zürich

Gemäss Zürcher Amt für Wasser, Energie und Luft (AWEL) werden im Kanton Zürich 42 Messstellen im urbanen Raum betrieben (Tabelle 6). Diese Messstellen werden ausschliesslich als Trinkwasserfassungen betrieben und überwacht. Darüber hinausgehende Messwerte zur Grundwasserqualität im Siedlungsbereich von beispielsweise oberflächennah verfilterten Piezometern liegen gemäss AWEL in Zürich nicht vor.

Trotzdem wurden die bereitgestellten 70 Messwerte detaillierter betrachtet. So kommen in 16 Proben (23 %) Kupfer oberhalb BG von 2 µg/L und in 45 Proben (64 %) Zink oberhalb BG von 5 µg/L vor. In neun Proben traten Kupfer und Zink gleichzeitig auf.

Für Diuron und Terbutryn gelten BG von 0.005 µg/L und für MCPD von 0.01 µg/L. In keiner einzigen Probe kommen Diuron und Mecoprop vor. Überraschend ist der einzige Terbutryn-Nachweis in der Fassung Hinwil-Moos (0.045 µg/L), denn dieses Biozid kommt ausschliesslich in Farben und Putzen von Gebäuden vor. Dieser Einzelbefund lässt sich gegenwärtig nicht durch das Umfeld des Einzugsgebietes erklären.

Tabelle 6: Übersicht zu den Daten aus dem Kanton Zürich (42 Messstellen). WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.

Analysen (Anzahl)	Kupfer	Zink	Diuron	Mecoprop	Terbutryn
Gesamt	70	70	41	41	41
oberhalb BG	16	45	-	-	1
oberhalb WL oder GSchV	13	38	-	-	-

An sechs Standorten traten in Einzelproben Kupfer und Zink gleichzeitig oberhalb der Indikatorwerte auf (Tabelle 7). Während die hohen Zinkkonzentrationen auf verzinkte Rohre in den Fassungen zurückzuführen sein dürften, ist die Herkunft von Kupfer weniger klar. Die Einzugsgebiete zeigen auf den Luftbildern keine Metalldächer. Für sämtliche Konzentrationen gilt, dass sie weit unterhalb der Anforderungswerte für Trinkwasser liegen.

Zusammenfassend kann zu den Messdaten von Zürich gesagt werden, dass sich keine eindeutigen Rückschlüsse auf einen möglichen Eintrag durch Siedlung und Verkehr mit dem Sickerwasser ziehen lassen, weil die Trinkwasserfassungen durch ihre Lage und umgebenden Nutzung geschützt sind.

Tabelle 7: Messstellen im Kanton Zürich positiv für Kupfer und Zink waren.

Messstelle	ID	Anzahl	Kupfer gesamt (µg/L)	Zink (µg/L)
Zürich–Burgwies, Wehrenbach G	b 00-9007	1	2.6	6.7
Dürnten, Feldhof	i 15-0004	2	9.8	83.7
Rifferswil, Sutermetten	c 15-0003	1	2.5	5.9
Volketswil, Hegnau	g 03-0001	1	5.0	15.0
Pfäffikon, Büel	h 09-0005	2	2.7	16.7
Regensdorf, Altburg	m 16-0005	2	2.2	51.5

5.3.3 Kanton Basel-Stadt

Der Kanton Basel-Stadt betreibt schweizweit das dichteste innerstädtische Überwachungsnetz von Grundwassermessstellen. Aus dem Messnetz wurden für 129 Grundwassermessstellen

1828 Daten bereitgestellt, die aus 711 Probenahmen über den Zeitraum 2008 bis 2017 stammen (Tabelle 8, Anhang: Abbildung 24). Die meisten Messstellen dienen der Überwachung des nicht genutzten Grundwassers und liegen somit in den Bereichen A_u oder üB. Die Messwerte von Zink wurden nicht berücksichtigt, da vor allem ältere Grundwasserfassungen aus verzinkten Stahlrohren erstellt sind und dadurch die Resultate teils erheblich verfälschen.

Von der weiteren Datenanalyse sind in Rücksprache mit dem Amt für Umwelt 11 Messstandorte (734, 1097, 2404, 2405, 2406, 2407 2418, 2419, 2421, 2757, 2759) ausgeschlossen worden, weil sie im Bereich von bekannten Deponien oder belasteten Standorten liegen. Beispielsweise liegt Stelle 1097 im nahen Zustrom eine Altlast, die saniert wurde. Da eine solche Sanierung aber selten abschliessend erfolgt, ist eine leichte Beeinflussung des Grundwassers nach wie vor möglich. Die Stelle 734 liegt zwischen zwei Arealen der chemischen Produktion (CH: Sandoz - F: Ugine-Kuhlmann), auf denen früher Lindan hergestellt wurde und gegenwärtig saniert wird. Es ist denkbar, dass von den ehemaligen Produktionsflächen Kupfer und Diuron ins Grundwasser gelangen.

Für die berücksichtigten 118 Messstellen (n=1677 Messwerte) liegen jeweils unterschiedlich viele Messwerte für Kupfer, Diuron und Mecoprop über den gesamten Zeitraum und für Terbutryn bis 2015 vor. Beispielsweise wurden an 42 Messstellen nur eine Probenahme (Stichproben), an 44 Messstellen bis zu fünf und den übrigen 32 Messstellen mehr als fünf Probenahmen durchgeführt. Je mehr Datenpunkte pro Messstelle vorliegen, desto gesicherter sind die Aussagen zum Vorkommen der Stoffe.

Die Bestimmungsgrenzen (BG) für Kupfer und die drei betrachteten Pestizide sind folgende:

- Kupfer: 0.5 µg/L für 80 % aller Messwerte; darüber hinaus 2.0 bis 0.007 µg/L.
- Diuron: 0.003 µg/L für 48 %, 0.005 µg/L für 30 %, und 0.001 µg/L für 28 % der Messwerte.
- Terbutryn: 0.02 µg/L für 48 %, 0.001 µg/L für 13 %, 0.005 µg/L für 26 % der Messwerte, die restlichen liegen dazwischen.
- Mecoprop: 0.001 µg/L für 90 % aller Messwerte; alle weiteren bis max. 0.01 µg/L.

Der Grund für die streuenden BG sind die unterschiedlichen analytischen Methoden, die z.B. bei den Pestiziden GC-MS, LC-MS und LC-HRMS/MS (Orbitrap) umfassten.

Die gelöste Fraktion von Kupfer wurde im Mai/Juni 2008 in 20 Proben analysiert. In der Hälfte aller Proben wurde Kupfer mit einem Mittelwert von 1.2 µg/L Kupfer (gelöst) und eine Maximalkonzentration von 2.4 µg/L Kupfer (gelöst) gefunden. Das Auftreten von gelöstem Kupfer ist überraschend, weil der Boden stets als guter Rückhalt für gelöste Schwermetalle gilt. Ob das Sickerwasser durch sandig, kiesiges Material unter Umgehung des Oberbodens ins Grundwasser (Schachtversickerungen) gelangte, sollte ebenso geklärt werden wie andere Einflussgrössen auf die Resultate. Die Messwerte liegen fast durchweg unterhalb des Indikatorwerts für gelöstes Kupfer von 2 µg/L.

Tabelle 8: Übersicht zum Datensatz vom Kanton Basel-Stadt für 119 Grundwassermessstellen. Kupfer umfasst den Gesamtgehalt. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.

Analysen (Anzahl)	Kupfer gesamt	Diuron	Mecoprop	Terbutryn
Gesamt	433	439	436	348
oberhalb BG	260	16	22	9
Oberhalb WL oder GSchV	31	0	0	0

Kupfer (gesamt) wurde in 60 % aller Messungen oberhalb BG (n=260) und in rund 7 % oberhalb des Indikatorwerts von 5 µg/L Kupfer (n=31) nachgewiesen (Tabelle 8). Die mittlere Konzentration liegt bei 2.3 µg/L Kupfer (max. 116 µg/L). Bezogen auf die Anzahl Messstellen liegen rund 80 % der Standorte die Kupferwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze (Anhang:

Abbildung 25 und 29). Demgegenüber liegen einige Messwerte sehr hoch und werfen die Frage auf, woher der Eintrag erfolgt.

Besonders detailliert betrachtet wurden sechs Messstellen (1305, 1645, 1871, 2614, 4717, 4718), weil dort über den gesamten Zeitraum in mindestens fünf Proben Konzentrationen > 2 µg/L Kupfer auftraten (Abbildung 14). Die Einzugsgebiete dieser Standorte sind sowohl Wohn- als auch Gewerbe-/Industriearale, sodass durch Metallflächen, Strassenverkehr usw. ein Eintrag durch Kupfer grundsätzlich möglich erscheint.

Beispielhaft wird Standort F_1305 erläutert (Anhang, Abbildung 27). Von 11 Kupferwerten (2008 bis 2017) liegen 80 % oberhalb des Indikatorwerts von > 2 µg/L Kupfer. Auf kleinster Fläche befinden sich mehrere Versickerungsanlagen, davon drei Anlagen mit Bodenpassage in Radius von ca. 30 m Abstand zur Messstelle. Sieben unterirdische Schachtversickerungen liegen nördlich im Bereich der Rollschuhbahn-Halle und Wohngebäuden. Angeschlossen sind Wege, Plätze, extensiv begrünte oder nicht begrünte Flachdächer. Es sind keine Metallflächen auf dem Luftbild sichtbar. Durch die unmittelbare Lage der Messstelle im Bereich eines belasteten Standorts ist auch hierdurch eine kontinuierliche Einflussnahme auf die Kupferkonzentrationen im Grundwasser möglich.

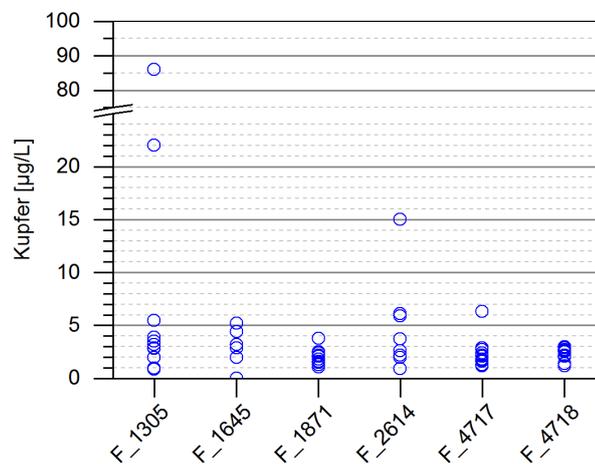


Abbildung 14: Kupfer (gesamt) in sechs Fassungen des Kantons Basel-Stadt, die über den gesamten Zeitraum 2008 bis 2017 mindestens 10mal beprobt wurden und von denen mindestens 5 Proben Konzentrationen > 2 µg/L Kupfer gesamt aufweisen. Die Anzahl der Proben ist wie folgt: F_1305 n=11, F_1645 n=11, F_1871 n=10, F_2614 n=8, F_4717 n=13, F_4718 n=11.

Neben Kupfer waren an mehreren Messstellen die drei Pestizide nachweisbar. So traten in 16 Proben von 5 Messstellen das Biozid Diuron (4 %), in 9 Proben von 6 Messstellen das Biozid Terbutryn (3 %) und in 22 Proben von 14 Messstellen das Pflanzenschutzmittel Mecoprop (5 %) auf (Tabelle 8). Zu einer Überschreitung des allgemeinen Anforderungswerts von 0.1 µg/L pro Pestizid kam es in keiner Probe. Eine Übersichtskarte mit allen Messstellen, an denen die Pestizide mindestens einmal nachweisbar waren, findet sich in Abbildung 28 im Anhang.

Nachfolgend werden die Resultate von vier Messstellen unter Berücksichtigung der Einzugsgebietscharakteristika und der Witterung diskutiert, an denen sowohl Kupfer als auch die Pestizide mehrfach nachweisbar waren (Abbildung 16, Anhang: Tabelle 16).

Messstelle F_2614, in Schutzzone üB gelegen, zeichnet sich durch eine starke gewerblich-industrielle Nutzung und mehrgeschossige Wohngebäude auf teils belasteten Standorten aus (Abbildung 15, Abbildung 16). Zahlreiche Gebäude sind neu erstellt oder renoviert, die Dächer extensiv begrünt oder mit Metall abgedeckt. Der Versiegelungsgrad der Flächen ist hoch. In vier Grundwasserproben wurde Terbutryn gefunden (0.016 µg/L am 4.8.2008, 0.014 µg/L am 27.5.2009, 0.017 µg/L am 24.11.2009 und 0.018 µg/L am 27.11.2011). Dabei kam eine empfindliche Analysenmethode mit BG von 0.002 µg/L (Orbitrap) zur Anwendung. Die Regelmässigkeit des Vorkommens in diesen Proben ist bemerkenswert, weil jeweils am Tag der Probenahme Regenwetter, teils auch an den Vortagen, herrschte. Das Auftreten von Terbutryn

neugebauten oder renovierten Gebäuden erwarten. Ganz besonders auffällig ist an dieser Messstelle, dass in 90 % aller Proben Kupfer vorkommt mit einer Durchschnittskonzentration 1.2 µg/L Kupfer (gesamt). Eine Beeinträchtigung des Grundwassers ist durch die Abschwemmung von Metallflächen und Strassenverkehr, eher weniger wahrscheinlich durch Gleiswasser, denkbar. In jeweils einer Probe wurde an diesem Standort noch Terbutryn und MCPP im Bereich von BG gefunden. Dieser regelmässige und breite Stoffnachweis ist ein starker Hinweis auf ein urban geprägtes Grundwasser mit Einfluss durch versickertes Niederschlagswasser.



Messstelle F_2614



Messstelle F_1045



Messstelle F_1068



Messstelle F_1294

Abbildung 16: Grundwassermessstellen in Basel-Stadt, bei denen Kupfer oder Pestizide mehrfach nachgewiesen wurden.

Bei Terbutryn ist auffallend, dass bei der Probestahme vom 24.11.2009 der Wirkstoff an vier Standorten gleichzeitig, an drei Standorten sogar nur zu diesem Termin, gemessen wurde. Diese Einmaligkeit wirft Fragen auf, weil der Stoff nachfolgend nicht wieder auftrat. Anders sind die Messwerte von Diuron einzuschätzen, die an fast allen vorgestellten Standorten regelmässig und mit einem um den Faktor 10 verschiedene Konzentrationen nachweisbar war.

5.3.4 Kanton Basel-Landschaft

Vom Kanton Basel-Landschaft wurden für 284 Messstellen über den Zeitraum 1987 bis 2017 10'913 Messwerte aus 3395 Probenahmen bereitgestellt. Zahlreiche Messungen stammen von Piezometern, für die entweder nur Einzelwerte oder bis zu 25 Messwerte (z. B. BL_41.J.20) vorliegen. Der Datensatz war der grösste verfügbare in vorliegender Auswertung.

Die Metallkonzentrationen liegen zu 50 % oberhalb BG und mehr als 10 % der Kupfer- und 25 % der Zinkkonzentrationen oberhalb der Indikatorwerte (Tabelle 9). Bei der weiteren Datenanalyse wurde ersichtlich, dass viele Werte bis zu mehreren Hundert Mikrogramm Kupfer und einigen Milligramm Zink erreichen (Abbildung 17). Zur Klärung wurden die Katasterkarten und Luftbilder beigezogen.

Tabelle 9: Übersicht zu den Messwerten vom Kanton Basel-Land zwischen 2010 und 2018. Messdaten von belasteten Standorten sind nicht enthalten. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.

Analysen (Anzahl)	Kupfer gesamt	Zink	Diuron	Mecoprop	Terbutryn
Gesamt	3247	3329	1311	497	1212
Oberhalb BG	1529	2545	23	9	8
Oberhalb WL oder GSchV	414	811	0	0	0

Dabei zeigte sich, dass sich der weitaus grösste Teil der Messstellen im Bereich von belasteten Standorten oder Deponien befindet. Entweder sind es Einzelmessstellen (z. B. BL_12.P.16, BL_123.G.13) oder die Piezometer verteilen sich über eine gut abgrenzbare Fläche (z. B. Schönenbuch, Schweizerhalle/Pratteln) (Anhang: Abbildung 29). Besonders auffallend ist das gleichzeitige Auftreten von Kupfer, Zink und einigen Pestiziden im Grundwasser der Standorte Pratteln und Schweizerhalle. Sehr wahrscheinlich ist der belastete Untergrund und belastetes Sickerwasser für die hohen Konzentrationen verantwortlich. Hohe Zinkkonzentrationen dürften darüber hinaus an mehreren Messstellen auf verzinktes Rohrmaterial zurückzuführen sein.

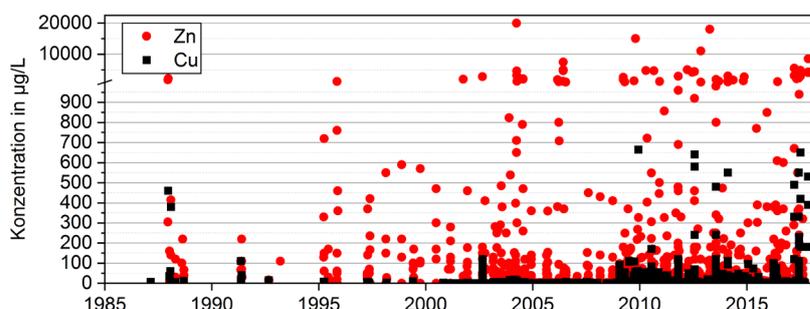


Abbildung 17: Überblick der Zink- und Kupfermessungen im Kanton Basel-Landschaft von 1987 bis 2017.

Aus dem reduzierten Datensatz wurden für die Metalle weiterhin nur noch die Messstellen betrachtet, die im Abstand von ca. 100 m zu einem belasteten Standort liegen und für die in fünf Proben die jeweiligen Indikatorwerte überschritten werden. Zudem sollten die Messungen nach 2010 durchgeführt sein, um bevorzugt auf aktuelle Nachweise zu fokussieren.

Daraus ergeben sich nur noch 12 Messstellen für Zink und 3 Messstellen für Kupfer (Anhang: Abbildung 30). Bei den Messstellen fallen immer noch einige Werte so deutlich aus dem erwarteten Rahmen, dass von einer Beeinflussung durch Belastungen im Untergrund oder durch verzinktes Rohrmaterial auszugehen ist (z. B. BL_12.A.4, BL_41.A.4, BL_21.A.101). Die mehrfachen deutlich messbaren Konzentrationen an den beiden Piezometer BL_12.J.4 oder BL12.J.1 lassen sich dagegen vermutlich auf versickertes Strassen-, Gleis- und Dachwasser zurückführen. Durch die Luftbilder der Einzugsgebiete wird diese Annahme gestützt.

An 274 Messstellen liegen sämtliche Resultate für die Pestizide Terbutryn, Diuron und Mecoprop unterhalb BG. Für die wenigen verbleibenden Messstellen zeichnet sich ein differenziertes Bild. Dabei gilt es zu beachten, dass für rund die Hälfte der Analysen 50 ng/L BG anzusetzen sind und damit geringere Konzentrationen nicht detektierbar waren.

Mecoprop wurde in 12 Proben von 10 Trinkwasserbrunnen und 1 Piezometer gefunden. Die Konzentrationen der Brunnen lagen zwischen 20 und 50 ng/L MCPP. Die Einzugsgebiete sind meistens landwirtschaftlich geprägt, sodass der Eintrag ins Grundwasser auf die Anwendung in der Landwirtschaft beruhen kann. Das Piezometer (BL_12.J.21) befindet sich dagegen in einem Wohngebiet mit begrünten oder mit Kies bedeckten Flachdächern (Abbildung 19). In einer von drei Proben lag die Konzentration mit 4 ng/L MCPP (18.8.2016) nahe der Bestimmungsgrenze. In der gleichen Probe wurden 2 µg/L Kupfer und 13 µg/L Zink nachgewiesen.

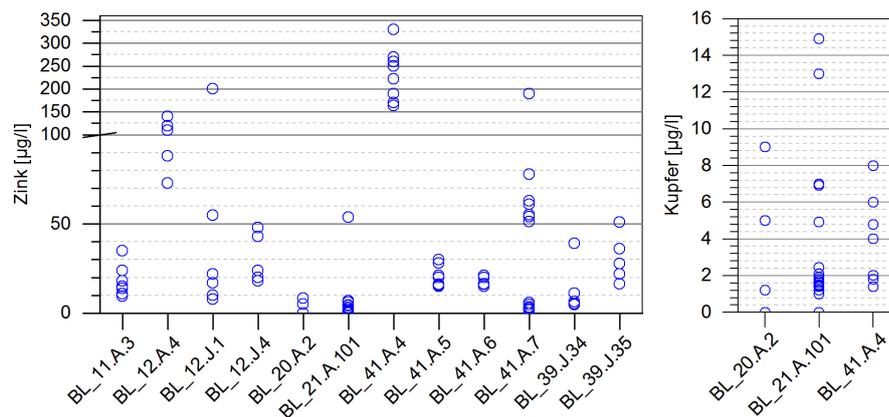


Abbildung 18: Zink und Kupfer in 12 Messstellen des Kantons Basel-Landschaft, die über den Zeitraum 2010 bis 2017 mindestens 5-mal Konzentrationen $> 5 \mu\text{g/L}$ Zink und $> 2 \mu\text{g/L}$ Kupfer gesamt aufweisen. Ausserdem liegen die Fassungen mindestens 100 m entfernt zu belasteten Standorten. Die Anzahl Proben ist wie folgt: BL_11.A.3 n=10, BL_12.A.4 n=5, BL_12.J.1 n=6, BL_12.J.4 n=5, BL_20.A.2 n=8, BL_21.A.101 n=26, BL_39.J.34 n=5, BL_39.J.35 n=5, BL_41.A.4 n=8, BL_41.A.5 n=7, BL_41.A.6 n=7, BL_41.A.7 n=18.

Diuron ist in 27 Proben von 22 Messstellen oberhalb BG von 2 ng/L zu finden, davon 12 Proben mit Konzentrationen $>10 \text{ ng/L}$. Mehr als die Hälfte dieser Messstellen befindet sich auf belasteten Standorten, wie dem Industriearéal Schweizerhalle, im landwirtschaftlichen Einzugsgebiet (55 ng/L bei BL_41.A.4) oder zwischen Gleisanlagen und Schrebergärten (70 und 118 ng/L BL_21.C.230, 400 ng/L BL_21.R.235). An 9 Messstellen (Brunnen, Piezometer) mit mehr als einem Drittel aller Analysen oberhalb BG ist immer noch ein belasteter Standort im Umkreis von 100 m anzutreffen. So trat in der Gemeinde Allschwil Diuron zwischen 2015-16 an mehreren Standorten bis 19 ng/L auf. Ob die belasteten Standorte und Deponien für das Vorkommen im Grundwasser relevant sind, lässt sich aber nicht immer genau beurteilen. An Messstelle BL_33.A.2 wurde in einer Probe 32 ng/L Diuron (5.12.2013) gefunden, obwohl für das Einzugsgebiet keine Hinweise auf belastete Standorte vorliegen (Abbildung 19). Gleiches gilt für BL_21.J.19 (18 ng/L), BL_21.J.20 (48 ng/L), BL_21.J.22 (3 ng/L) und BL_21.J.25 (19 ng/L) (Anhang: Abbildung 31). An diesen fünf Messstellen ist stark davon auszugehen, dass der urbane Eintrag über versickertes Niederschlagswasser für das Auftreten von Diuron verantwortlich sein dürfte.

Terbutryn wurde in 12 Proben vom Industriearéal Schweizerhalle mit bis zu $2.2 \mu\text{g/L}$ Terbutryn gefunden. Auf einer gewerblich genutzten Fläche lag ein Messwert bei $0.011 \mu\text{g/L}$ Terbutryn und gleichzeitig traten Kupfer und Zink auf. Möglich ist auch hier der Einfluss einer unweit entfernt gelegenen Deponie in Liestal.

Das Auftreten der Pestizide in den Einzelproben ist überwiegend auf belastete Standorte zurückzuführen. Ein Stoffeintrag ins Grundwasser durch versickerndes Niederschlagswasser ist jedoch für einzelne Messstellen aufgrund der vorliegenden Nutzungsformen in den Einzugsgebieten zu vermuten. Bezogen auf alle Messungen, in denen die Pestizide analysiert wurden, lagen weniger als 1% oberhalb der Bestimmungsgrenze und – mit Ausnahme bei dem Standort Schweizerhalle – stets unterhalb des Anforderungswerts von $0.1 \mu\text{g/L}$ der GSchV.



Abbildung 19: Messstellen BL_33.A.2 (oben) und BL_12.J.21 (unten) mit Lageplan und Katasterauszug der belasteten Standorte. In der Umgebung von Messstelle BL_12.J.21, an der Mecoprop nachgewiesen wurde, befinden viele begrünte Flachdächer. Die schwarzen Punkte zeigen die Messstellen.

5.3.5 Kanton Zug

Im Kanton Zug werden zahlreiche Grundwassermessstellen betrieben, die meisten werden aber nur selten im Rahmen einer GW-Überwachung beprobt. Im Siedlungsgebiet des Baarerbeckens mit dichter Überbauung befinden sich 10 Messstellen mit einer Filtertiefe zwischen 5 und 17 m unter Gelände. Ein pH-Wert von im Mittel 7.1 wurde bestimmt. Bei einer Untersuchung 2017 wurde an fünf Messstellen Zink gelöst nachgewiesen (Abbildung 20). Da alle fünf beprobten Messstellen aus PVC-Rohren sind, ist eine Herkunft aus der Messstelle selbst unwahrscheinlich. Zwei Messstellen (11_0267, 11_0297) liegen im Abstrom der V-Zug. Ein Teil vom Zink könnte deshalb aus Belastungen im Untergrund stammen, da über viele Jahre Metall verarbeitet wurde.

Kupfer gelöst wurde an drei Messstellen nachgewiesen. Die in zwei dicht beieinander liegenden Messstellen gemessenen Konzentrationen im Bereich vom Industriegebiet dürften eher nicht von diesem Standort stammen, da die umfangreichen Altlastenuntersuchungen keine Hinweise auf eine Herkunft vom Standort geben. Auch die Umgebung der dritten Messstelle am Bahnhof Baar ist durch gewerbliche Nutzung geprägt. Die Herkunft in der Messstelle 01_0498 ist wiederum unklar.

Welche Relevanz die mögliche Abschwemmung von Metalldächern oder ein anderer Eintrag durch versickerndes Niederschlagswasser spielt, bleibt für die Positivbefunde unklar. Bekannt ist nur, dass in den letzten drei Jahren keine grösseren Metallflächen erstellt und daher keine Adsorberanlage vorgeschrieben werden mussten.

Diuron, Mecoprop und Terbutryn wurden bisher in keiner Messstelle im Siedlungsraum von Zug nachgewiesen. Die Stoffe werden jedoch nicht regelmässig analysiert. Davon ausgenommen ist ein Trinkwasserbrunnen im Bereich "Sternen" südlich von Baar, dessen Rohwasser durch das BAFU im Rahmen des Programms NAQUA-SPEZ seit 2002 regelmässig auf Diuron (seit 2002), Mecoprop (seit 2005) und Terbutryn (seit 2002) analysiert wird - jeweils ohne Nachweis.

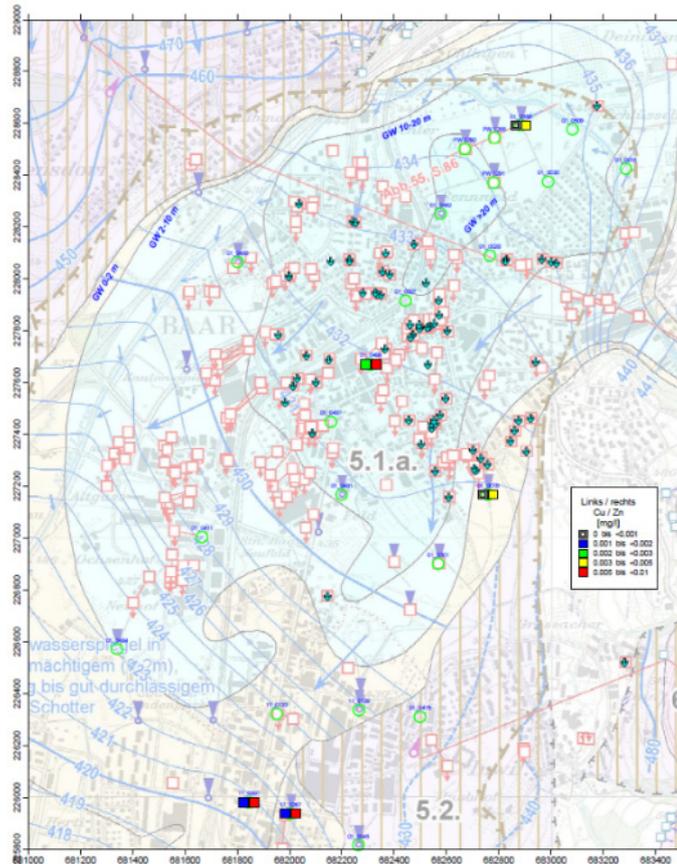


Abbildung 20: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen in Zug sowie die Nachweise von Kupfer.

6 Schlussfolgerung

Aus den Recherchen und Messungen zur Abschwemmung von Metallflächen, blank oder beschichtet eingesetzt, sowie dem Vorkommen von Kupfer, Zink, Diuron, Terbutryn und Mecoprop im oberflächennahen Grundwasser lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Abschwemmung von Metallflächen

- Die Abschwemmung ist unabhängig von dem Materialalter und trägt nachweislich zur Belastung vom abfliessenden Niederschlagswasser bei. Die in der Schweiz verbreitet eingesetzte Abschwemmrate der KBOB von $1.8 \text{ g/m}^2 \text{ a}$ Kupfer liegt rund 30 % und von $3.6 \text{ g/m}^2 \text{ a}$ Zink rund 10 % über den Durchschnittswerten der Literatur und ergänzenden Messungen. Dennoch wird empfohlen, wegen der hohen Streuung der Messwerte und aus Vorsorgegründen die höheren Werte beizubehalten.
- An Metallfassaden werden rund 5-mal weniger Kupfer und Zink als auf Dachflächen abgeschwemmt, weil weniger Schlagregen auf die Fläche trifft. An den der Witterung abgewandten Fassaden liegt die Jahresfracht ca. 10-mal niedriger.
- Beschichtete Metalle reduzieren die Abschwemmung 30- bis 100-fach. Dies gilt für organische Beschichtungen wie PE, PRISMA und 2K PU-Lack. Wenige Kenntnisse liegen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung und der möglichen Freisetzung von Inhaltsstoffen aus den Kunststoffen unter dem langjährigen Witterungseinfluss vor.
- Die Wirksamkeit von Beschichtungen lässt sich durch den DSLT-Auswaschtest abschätzen. Die Nachweisführung zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung durch den Hersteller dürfte mit gealterten Produkten die Abschätzung verbessern (VSA, 2019).

- Verminderungs- und Vermeidungsstrategien zur Metallabschwemmung sollten im Sinne eines vorsorgeorientierten Boden- und Gewässerschutzes angewendet werden. Zu den Massnahmen an der Quelle zählen alternative Blechmaterialien oder langlebige Beschichtungen, zu den nachgeschalteten Massnahmen die Versickerung über humosen Boden oder adsorbierende Filterschicht gemäss VSA-Richtlinie (VSA, 2019).

Versickerungsanlagen

- Die gemessenen Konzentrationen an Schwermetallen weisen auf eine relativ geringe Verlagerung in untere Bodenschichten hin. Immerhin dürfte bei verdünnten Regenwasserabläufen ein geringer, aber über Jahre stetiger Transport in untere Bodenschichten und ins Grundwasser stattfinden.
- Um die zeitliche Entwicklung einer Abschwemmung von beschichteten Metallflächen erkennen zu können, sollte die Metallkonzentration des Bodens in Versickerungsanlagen (0 bis 10 cm, bei Einleitstelle) regelmässig bestimmt werden.
- Organische Spurenstoffe finden über Versickerungsanlagen (z. B. Bodenfilter, Mulden-Rigolen) den direkten Weg ins Grundwasser. Zur möglichen Bodenbelastung sollten genauere Abklärungen getroffen werden.

Grundwasser

- In ca. 95 % der Messdaten lagen geringe Konzentrationen von Kupfer und Zink vor, sodass die Indikatorwerte nur in ca. 5 % der Proben überschritten wurden. Bei den Pestiziden waren sogar ca. 99 % aller Analysen ohne Befund von Terbutryn, Diuron und Mecoprop. Diuron wurde unter den Pestiziden am häufigsten, Terbutryn am wenigsten nachgewiesen.
- Mit den verfügbaren Daten zu Kupfer und Zink war es nicht möglich, einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Metallabschwemmung und dem Eintrag ins Grundwasser nachzuweisen. Die Herkunft war nicht klar abgrenzbar, weil neben Metallflächen weitere Quellen (z. B. verzinkte Rohre, Strassenverkehr, Korrosionsschutz) existieren.
- Urbaner Stoffeintrag ins Grundwasser verbindet sich mit der Nutzung im Einzugsgebiet. Durch die starke Durchmischung vom temporär versickernden Niederschlagswasser mit dem Grundwasser ist der Stoffeintrag aber schwer nachweisbar. Um das Verständnis zu urbanen Einträgen auszubauen, sollten mehr Messstellen im Bereich Au, Zu und S3 mit urbanem Einzugsgebieten und Versickerungsanlagen berücksichtigt werden. Zudem sind Beprobungen bei Regenwetter, bei Versickerungsanlagen im Zu- und Abstrombereich, hilfreich.
- Im NAQUA-TREND sollten die Versickerungsanlagen (z.B. aus kantonalen Katastern) und die emissionsrelevanten Nutzungsformen in den Einzugsgebieten erfasst werden. Zudem wäre vorteilhaft, weitere Messstellen im Siedlungsraum hinzuzuziehen, um den Einfluss durch belastetes Sickerwasser langfristig genauer zu untersuchen.
- Einige Messstellen deuten auf einen sickerwasserbedingten Stoffeintrag der Pestizide Terbutryn, Diuron und Mecoprop aus Dach- und Fassadenmaterialien hin. Der Eintrag sollte an weiteren Messstellen, z. B. im Bereich von Versickerungsanlagen in Neubaugebieten, vertieft untersucht werden. Neben urban verwendeten Pflanzenschutzmitteln und Bioziden bieten sich weitere Stoffe als Hinweisgeber für eine Beeinträchtigung der Grundqualität an, z. B. Benzothiazol (Vulkanisationsbeschleuniger in Pneu, EPDM-Dachbahnen, Gummigranulat von Kunstrasen) und persistente, mobile und toxische Substanzen mit $\log K_{OC} < 4.5$ an. Der Nachweis organischer Spurenstoffe erfordert aufgrund der geringen Konzentrationen sehr niedrige Bestimmungsgrenzen (1 - 5 ng/L).
- Die Überschreitung der Indikatorwerte der Wegleitung Grundwasserschutz weisen in der Regel auf eine anthropogen bedingte Belastung des Grundwassers hin und sollten zu Abklärungen über die Ursache der Überschreitung Anlass geben. Sie sollten als ernste Hinweis genutzt werden, Stoffeinträge durch Massnahmen an der Quelle (Material-/ Stoffvermeidung, beschichtete Metalle) oder nachgeschaltete Massnahmen (dezentrale Behandlung) noch konsequenter umzusetzen.

- Dem Vorsorgegedanken folgend ist zu prüfen, wie sich kritische Eintragspfade (z.B. Versickerungsanlagen, gut durchlässige Sedimente) und potentiell kritische Quellen erfassen lassen. Die Nutzungsform im Einzugsgebiet von Messstelle und die Filtertiefe sind besonders zu berücksichtigen. Grössere Dach- und Fassadenflächen aus Metall (beschichtet, unbeschichtet) sollten wie im Kanton Thurgau in einer Datenbank erfasst und mit dem Versickerungskataster abglichen werden. Die Flächenerhebung kann vielleicht auch auf Überbauungen mit grösseren pestizidhaltigen Flächenbeschichtungen ausgedehnt werden.

7 Literaturverzeichnis

- Athanasiadis, K., Horn, H., Helmreich, B. (2009): A field study on the first flush effect of copper roof runoffs. *Corrosion Science*, 52(1):21-29.
- Athanasiadis, K., Helmreich, B., Wilderer, P. A. (2004). Elimination of zinc from roof rainwater runoff through geotextile and clinoptilolite filters. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 32(6):419-428.
- Bachmann, S. (2008): Bodenbelastung in Versickerungsmulden. Maturaarbeit, Kreuzlingen.
- BAFU (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern, S. 141.
- Bahar, B., Herting, G., Odnevall Wallinder, I., Hakkila, K., Leygraf, C., Virta, M. (2008): The interaction between concrete pavement and corrosion-induced copper runoff from buildings. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140, 175-189.
- Bertling, S., Odnevall Wallinder, I., Berggren, D., Leygraf, C. (2006): Long term corrosion-induced copper runoff from natural and artificial patina and its environmental fate. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(3), 891-898.
- Binz-Deplazes, A., Steiner, M., Boller, M. (2004): Von Kupfer geläutertes Dachwasser für die Toilettenanlagen der Universität. *Umweltpraxis*, 39, 29-31.
- Boller, M., Häfliger, M. (1996): Verbleib von Schwermetallen bei unterschiedlicher Meteorwasserentsorgung, *Gas, Wasser, Abwasser*, 1:3-15.
- eco-bau (2010): eco-devis zu NPK 351 Spenglerarbeiten. Informationen zur ökologischen Optimierung der Leistungsbeschreibung. Schlussbericht, S. 11.
- Faller, M. (2001): Wasseruntersuchungen und Korrosionsprüfungen für Kultur- und Kongresszentrum Luzern. Prüfbericht 402092, Empa, Dübendorf, S. 7.
- Faller, M., Reiss, D. (2005): Runoff behaviour of metallic materials used for roofs and facades – a 5-year field exposure study in Switzerland. *Materials and Corrosion*, 56(4):244-249.
- Frank, K. (2016): Zinkabtrag von beschichteten Metalldächern. Zertifikatsarbeit, Architektur, Holz und Bau, Berner Fachhochschule, Burgdorf.
- Frenzel, I., Steiner, M., Boller, M. (2001): Untersuchung zum Kupferabtrag einer Kupferfassade und zur Wirksamkeit einer Eisenhydroxid-Sickerschicht zur Abtrennung von Kupfer aus dem Fassadenwasser. Zwischenbericht, Eawag, Dübendorf, S. 24.
- He, I., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C. (2001): A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions. *Corrosion Science*, 43:127-146.
- Hedberg, Y. S., Hedberg, J.F., Herting, G., Goidanich, S., Odnevall Wallinder, I. (2014): Critical review: Copper runoff from outdoor copper surfaces at atmospheric conditions. *Environmental Science and Technology*, 48, 1372-1381.
- Hedberg, Y. S., Goidanich, S., Herting, G., Odnevall Wallinder, I. (2015): Surface-rain interactions: Differences in copper runoff for copper sheet of different inclination, orientation, and atmospheric exposure conditions. *Environmental Pollution*, 196, 363-370.
- Helmreich, B. (2018): Persönliche Mitteilung.
- Helmreich, B., Athanasiadis, K., Horn H. (2008): Behandlung des Niederschlagswassers von Kupferdächern über vier verschiedene Filteranlagen. *KA Abwasser Abfall*, 55(4):365-373.
- Herting, G., Goidanich, S., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C. (2008): Corrosion-induced release of Cu and Zn into rainwater from brass, bronze and their pure metals. A 2-year field study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144:455-461.
- Jouen, S., Hannover, B., Barbier, A., Kasperek, J., Jean, M. (2004): A comparison of runoff rates between Cu, Ni, Sn and Zn in the first steps of exposition in a French industrial atmosphere. *Materials chemistry and physics*, 85(1):73-80.

- Jönsson, A. (2013): Copper in storm water runoff from naturally patinated copper roof and parking space- variations in fluxes during rainfall in Stockholm, Sweden. Report, Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. S. 41.
- KBOB (2001): Metalle für Dächer und Fassaden. Empfehlung Nachhaltiges Bauen, Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes.
- KME (2012): Umwelt-Produktedeklaration. KME Germany GmbH & Co KG.
- Krätschmer, A., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C. (2002): The evolution of outdoor copper patina. *Corrosion Science*, 44(3), 425.
- Langbein, S. (2000): Schwermetallproblematik bei der Dachwasserversickerung. Diplomarbeit, TU Dresden, Dresden, S. 41.
- Langbein, S., Steiner, M., Boller, M. (2005): Wasser- und Materialflüsse bei der Entwässerung von Metall-, Ziegel-, Kies- und Gründächern. Bericht, Eawag, Dübendorf, S. 84.
- Lange, J., Olsson, O., Jackisch, N., Weber, T., Hensen, B., Zieger, F., Schuetz, T., Kümmerer, K. (2017): Urbane Regenwasserversickerung als Eintragspfad für biozide Wirkstoffe in das Grundwasser? *KA Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10(4):198-202.
- Leuenberger-Minger, A. U., Buchmann, B., Faller, M., Richner, P., Zöbeli, M. (2002): Dose-response functions for weathering steel, copper and zinc obtained from a four-year exposure programme in Switzerland. *Corrosion Science*, 44(4):675-687.
- Lindström, D. (2010): Galvanized steel in outdoor constructions - metal runoff, corrosion and patina formation. Licentiate thesis, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, S. 41.
- Lindström, D., Hedberg, Y., Wallinder, I. O. (2010): Chromium(III) and Chromium(VI) Surface Treated Galvanized Steel for Outdoor Constructions: Environmental Aspects. *Environmental Science & Technology*, 44:4322-4327.
- Lindström, D., Wallinder, I. O. (2011): Long-term use of galvanized steel in external applications. Aspects of patina formation, zinc runoff, barrier properties of surface treatments, and coating and environmental fate. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173:139-153.
- Nolting, B. (2008): Untersuchungen zur Filtration und anschließenden Versickerung von Niederschlagswässern von Zinkdächern (am Beispiel des Altenheims Wahlscheid). Abschlussbericht, Hochschule Bochum, S. 125.
- Oesch, S., Heimgartner, P. (1996): Environmental effects on metallic materials - results of an outdoor exposure programme running in Switzerland. *Materials and Corrosion*, 47(8):425-438.
- Odnevall Wallinder, I., Verbiest, P., He, W., Leygraf, C. (2000): Effects of exposure direction and inclination on the runoff rates of zinc and copper roofs. *Corrosion Science*, 42(8):1471-1487.
- Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C., Karlen, C., Heijerick, D., Janssen, C. R. (2001): Atmospheric corrosion of zinc-based materials: runoff rates, chemical speciation and ecotoxicity effects. *Corrosion Science*, 43(5):809-816.
- Odnevall Wallinder, I., Bertling, S., Leygraf, C. (2004): Environmental interaction of copper and zinc released from building materials as a results of atmospheric corrosion. *Metall*, 717-720.
- Robert-Sainte, P., Gromaire, M. C., de Gouvello, B., Saad, M., Chebbo, G. (2009): Annual Metallic Flows in Roof Runoff from Different Materials: Test-Bed Scale in Paris Conurbation. *Environmental Science & Technology*, 40:5612-5618.
- Sandberg, J., Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C., Le Bozec, N. (2007): Corrosion-Induced Zinc Runoff from Construction Materials in a Marine Environment. *Journal of the Electrochemical Society*, 154(2):C120-C131.

- Schenker, Korner & Partner (2006): Untersuchung der Bodenbelastung von Versickerungsanlagen – Versickerungsmulde COOP, 5503 Schaffisheim. Kanton Aargau, Abteilung für Umwelt.
- Schriewer, A., Horn, H., Helmreich, B. (2008): Time focused measurements of roof runoff quality. *Corrosion Science*, 50:384–391.
- Schmidt, N. (2017): Belastung der Regenabflüsse von Kupfer- und Zinkdächern - Eine Literaturstudie. Bachelorarbeit, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München.
- SN EN ISO 12944-5:2018: Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 5: Beschichtungssysteme (ISO 12944-5:2018). Schweizerische-Normen-Vereinigung, Winterthur.
- SNR CEN/TS 16637-2:2014: Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 2. Schweizerische-Normen-Vereinigung, Winterthur.
- Steiner, M., Frey, M. (2012): Aktueller Wissensstand zu neuartigen Metallblechen für Dächer: Bedeutung für die Liegenschaftsentwässerung. Bericht, S. 28.
- VSA (2019): Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. Richtlinie, Basismodul, VSA, Glattbrugg.
- Veleva, L., Acosta, M., Meraz, E. (2009): Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff. *Corrosion Science*, 51(9):2055-2062.
- von Arx, U. (2006): Kupfer. Verbrauch, Umwelteinträge und -vorkommen. Umwelt-Wissen Nr. 0601. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 163 S.
- Wallinder, I. O., Bertling, S., Berggren Kleja, D., Leygraf, C. (2006): Corrosion-induced release and environmental interaction of chromium, nickel and iron from stainless steel. *Water, Air and Soil Pollution*, 170:17-35.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Abschwemmung von Metallflächen und deren Eintrag in Boden und Gewässer. Der Oberflächenabfluss kann auch über den Regenwasseranal der Trennkanalisation abgeleitet werden und die Verlagerung ins Grundwasser über Versickerungsanlagen erfolgen.....	2
Abbildung 2: Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Dachwasser (Boller, pers. Mitt.).....	4
Abbildung 3: Abschwemmraten von Kupfer (links) und Zink (rechts), ermittelt in Feldversuchen an unterschiedlich geeigneten Metallblechen (Hedberg, 2015).....	6
Abbildung 4: Kupfer-Konzentrationen im First-Flush des abfliessenden Niederschlagwassers der nicht-beschichteten und beschichteten Testflächen auf dem KKL-Dach in Luzern sowie die Kupfer-Hintergrundkonzentrationen des Niederschlags (links) und Aufsicht auf das KKL-Dach (rechts).	7
Abbildung 5: Eingabeparameter für das Modell zur Abschätzung der Abschwemmrate von Kupferflächen (links) und Übersicht zu den Modellresultaten (rechts).	8
Abbildung 6: Zinkdach vom Oberstufenschulhaus Rain in Jona (links; Quelle: Google) und Seitenansicht des Gebäudes mit Fallrohr (rechts). Die schraffierte Fläche zeigt die beprobte Dachfläche.	9
Abbildung 7: Niederschlagsintensität und kumulierter Niederschlag (oben), Zinkkonzentrationen und kumulierte Fracht (Mitte) sowie pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit (unten) während des ersten (3.7., links), zweiten (8.8., rechts) und dritten (29.10.) Abflussereignisses (total n=13 Proben).....	10
Abbildung 8: Beprobtes Kupferdach in der Gemeinde Pfäffikon SZ. Links: Dachfläche (Quelle: map.geo.admin.ch), rechts: Dachentwässerung auf angrenzende Wiese.	10
Abbildung 9: Niederschlagsintensität und kumulierter Niederschlag (oben), Kupfer-Konzentrationen und kumulierte Fracht (Mitte) sowie pH-Werte und elektrische Leitfähigkeit (unten) während des ersten (27.10., links) und zweiten (13.11., rechts) Abflussereignisses (total n=7 Proben).....	11
Abbildung 10: Konzentrationen (links, Mitte; mg/L) und kumulierte Abwaschung (rechts, mg/m ²) von sieben Metallblechen untersucht mit dem DSLT. Die linke Abbildung zeigt Produkte mit starker, die mittlere mit geringer Auswaschung (organisch beschichtet, oxidiert). Für alle Bleche ist Zink gesamt dargestellt, mit Ausnahme von KME mit Kupfer.....	13
Abbildung 11: Räumliche Verteilung der 52 NAQUA Messstellen und die Einwohnerdichte in der Schweiz.	15
Abbildung 12: Kupfer- (n = 26) und Zinkkonzentrationen (n = 24) für fünf ausgewählte SV-Messstellen von NAQUA-TREND.	17
Abbildung 13: Verteilung der maximalen Kupfer- und Zinkkonzentrationen pro Messstelle. NAQUA-TREND (ohne SV): 42 Messwerte, 11 SV-Messstellen: 11 Werte, 5 SV-Messstellen: 5 Werte.	17
Abbildung 14: Kupfer (gesamt) in sechs Fassungen des Kantons Basel-Stadt, die über den gesamten Zeitraum 2008 bis 2017 mindestens 10mal beprobt wurden und von denen mindestens 5 Proben Konzentrationen > 2 µg/L Kupfer gesamt aufweisen. Die Anzahl der Proben ist wie folgt: F_1305 n=11, F_1645 n=11, F_1871 n=10, F_2614 n=8, F_4717 n=13, F_4718 n=11.	20

Abbildung 15: Messstelle F_2614 befindet sich an einem stark überbauten Standort, an der belastete Standorte (links) und zahlreiche Versickerungen (rechts) verbreitet sind. Unterirdische Versickerungen 18, 864, 704; Versickerungen mit Bodenpassage 713, 704.	21
Abbildung 16: Grundwassermessstellen in Basel-Stadt, bei denen Kupfer oder Pestizide mehrfach nachgewiesen wurden.	22
Abbildung 17: Überblick der Zink- und Kupfermessungen im Kanton Basel-Landschaft von 1987 bis 2017.	23
Abbildung 18: Zink und Kupfer in 12 Messstellen des Kantons Basel-Landschaft, die über den Zeitraum 2010 bis 2017 mindestens 5-mal Konzentrationen > 5 µg/L Zink und > 2 µg/L Kupfer gesamt aufweisen. Ausserdem liegen die Fassungen mindestens 100 m entfernt zu belasteten Standorten. Die Anzahl Proben ist wie folgt: BL_11.A.3 n=10, BL_12.A.4 n=5, BL_12.J.1 n=6, BL_12.J.4 n=5, BL_20.A.2 n=8, BL_21.A.101 n=26, BL_39.J.34 n=5, BL_39.J.35 n=5, BL_41.A.4 n=8, BL_41.A.5 n=7, BL_41.A.6 n=7, BL_41.A.7 n=18.	24
Abbildung 19: Messstellen BL_33.A.2 (oben) und BL_12.J.21 (unten) mit Lageplan und Katasterauszug der belasteten Standorte. In der Umgebung von Messstelle BL_12.J.21, an der Mecoprop nachgewiesen wurde, befinden viele begrünte Flachdächer. Die schwarzen Punkte zeigen die Messstellen.	25
Abbildung 20: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen in Zug sowie die Nachweise von Kupfer.	26
Abbildung 21: Kupfer- und Zinkkonzentrationen der 11 Messstellen in NAQUA-TREND mit der Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr zwischen 2006 und 2015.	39
Abbildung 22: Messwerte von 11 SV-Messstellen in NAQUA-TREND für Kupfer (n = 58) und Zink (n = 50) (oben) und 5 SV-Messstellen für Kupfer (n = 26) und Zink (n = 24) (unten) in Klassen von 0.2 µg/L bei Kupfer und 0.25 µg/L bei Zink. Die gestrichelte Linie zeigt die Indikatorwerte der Wegleitung Grundwasserschutz für Kupfer und Zink.	39
Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Zink- und Kupferkonzentrationen an 5 SV-Messstellen von NAQUA-TREND. Nur die Messwerte >BG sind dargestellt.	39
Abbildung 24: Kumulierte Probenahmen in Basel-Stadt von März 2001 bis November 2017 (n=764).	40
Abbildung 25: Konzentration von Kupfer gesamt an 109 Messstellen im Kanton Basel-Stadt. .	40
Abbildung 26: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen in Basel-Stadt, das Auftreten von Kupfer gesamt sowie die Grundwassergleichen.	40
Abbildung 27: Messstelle F_1305 mit der baulichen Infrastruktur, belasteten Standorten und dem Auszug aus dem Versickerungskataster. Zwei Unterirdische Versickerungen 185, 716; drei Versickerungen mit Bodenpassage 1566, 616, 839.	41
Abbildung 28: Verteilung der Messstellen in Basel-Stadt, an denen die drei Pestizide Diuron, Terbutryn und Mecoprop gefunden wurden. Der Indikatorwert für Grundwasser von 0.1 µg/L wurde nicht überschritten.	41
Abbildung 29: Auszug aus dem Kataster der belasteten Standorten im Industriegebiet Schweizerhalle des Kantons Basel-Landschaft.	43
Abbildung 30: 12 bzw. 3 Messstellen im Kanton Basel-Landschaft, bei denen mind. fünf Messwerte zwischen 2010 und 2017 grösser als die Indikatorwerte für Zink oder Kupfer sind. Schwarzer Punkt: Messstellen.	44

Abbildung 31: Standorte der vier Messstellen im Kanton Basel-Landschaft, bei denen Diuron und Zink nachweisbar waren. Schwarzer Punkt: Messstellen..... 45

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschwemmung von Metallblechen für Dächer (eco-bau, 2010).....	5
Tabelle 2: Kumulierte Abschwemmung über 64 Tage Versuchsdauer (g/m ²) und extrapolierte Abschwemmraten (g/m ² a) von sieben Metallblechen, davon drei voroxidiert, zwei organisch beschichtet und zwei blank, die über den DSLT berechnet wurden.	12
Tabelle 3: Numerische Anforderungen der Gewässerschutzverordnung für Grundwasser (GSchV) und die Indikatorwerte der Wegleitung Grundwasserschutz (WL).....	13
Tabelle 4: Zinkdächer (Bachmann, 2008).	14
Tabelle 5: Stoffvorkommen an 11 bzw. 5 Messstellen mit Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr (SV) in NAQUA-TREND im Zeitraum 2006 bis 2017. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.	16
Tabelle 6: Übersicht zu den Daten aus dem Kanton Zürich (42 Messstellen). WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.	18
Tabelle 7: Messstellen im Kanton Zürich positiv für Kupfer und Zink waren.....	18
Tabelle 8: Übersicht zum Datensatz vom Kanton Basel-Stadt für 119 Grundwassermessstellen. Kupfer umfasst den Gesamtgehalt. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.	19
Tabelle 9: Übersicht zu den Messwerten vom Kanton Basel-Land zwischen 2010 und 2018. Messdaten von belasteten Standorten sind nicht enthalten. WL: Indikatorwerte für Kupfer und Zink gemäss Wegleitung Grundwasser (BAFU, 2004); GSchV: numerische Anforderung für Pestizide gemäss Schweizer Gewässerschutzverordnung.	23
Tabelle 10: Übersicht zu den kantonalen Rückmeldungen.	36
Tabelle 11: Konzentrationen im Dach- und Fassadenwasser von Studien mit mindestens 20 Probenahmen über 2 Jahre Versuchsdauer (Helmreich, 2018).	36
Tabelle 12: Abschwemmraten von Kupfer- und Zinkdächern, zusammengetragen aus der Literatur.	37
Tabelle 13: Abschwemmraten von Zink auf geneigten Metallflächen (aus: Lindström, 2010). ...	38
Tabelle 14: Vorgehen beim Auswaschtest DSLT für acht Eluate (SNR CEN/TS 16637-2:2014).	38
Tabelle 15: Verteilung der 7 Hauptbodennutzungen im Datensatz NAQUA-TREND, die Anzahl Messstellen und Messwerte.....	38
Tabelle 16: An nachfolgenden Messstellen wurde in Basel-Stadt Diuron, Terbutryn und Mecoprop gefunden. Angegeben sind Anzahl, Konzentration und Datum der positiven Befunde pro Stoff und Messstelle.....	42

10 Anhang

Tabelle 10: Übersicht zu den kantonalen Rückmeldungen.

Kanton	GW-Überwachung	GW-Analysen	DW-Analysen	Kommentar
Aargau	Nein	Nein	Ja	Dachwasser und Boden Versickerungsmulde (Coop)
Appenzell Ausserrhoden	Ja	Nein	Nein	Evtl. geeigneter Standort für Untersuchung vorhanden
Basel-Land	Ja	Ja	Nein	Grosser Datensatz, viele Standorte (Cu, Zn, Diuron, Terbutryn, MCP)
Basel-Stadt	Ja	Ja	Ja	Daten erhalten zu Cu, Diuron, MCP, Terbutryn → kein Zink
Graubünden	Nur Pegel	Nein	Nein	Pegel von 20 Stellen abrufbar via Internet
Luzern	?	?	Ja	Daten KKL sind erst ab Herbst freigegeben, keine Daten vom Kanton
Nidwalden	Ja	Nein	Nein	bieten sich für GW-Messungen an
St. Gallen	?	?	?	verschieden interne Stellen eingebunden, noch keine weiteren Infos
Schwyz	Ja	Nein	Nein	Überwachung von GW-Pegel an 12 Messstellen
Thurgau	Ja	(Ja)	Ja	Diplomarbeit Frank u.a.; bieten sich für GW- und DW-Messungen an
Zug	Ja	Ja	Nein	Daten für GW erhalten, keine Auffälligkeiten in Datensatz
Zürich	Ja	Ja	Nein	Daten erhalten, ausschliesslich Trinkwasserfassungen
NAQUA	Ja	Ja	Nein	ca. 960 gemessene Proben Cu, Zn, Diuron, Terbutryn, MCP

Tabelle 11: Konzentrationen im Dach- und Fassadenwasser von Studien mit mindestens 20 Probenahmen über 2 Jahre Versuchsdauer (Helmreich, 2018).

Dachmaterial	Alter (Jahre)	Fläche (m ²)	Ereignisse (Anzahl)	Konzentration (mg/L)			Quelle
				Min	Max	Mittel	
Zink	11	238	20	5.6	25.5	7.0	Athanasiadis, 2004
Zink	14	238	28	0.3	30.0	6.8	Schriewer, 2008
Zink	20	260	20	2.0	32.0	8.8	Helmreich, 2018
Kupfer	Neu	West 468	33	0.4	8.4	1.9	Helmreich, 2008
		Ost 468		0.9	11.1	2.9	Athanasiadis, 2009
		Süd 412		0.2	14.2	2.3	Athanasiadis, 2009
		Nord 412		0.2	21.7	1.6	Athanasiadis, 2009
Kupfer	Neu	102	20	0.9	6.0	2.4	Helmreich, 2008

Tabelle 12: Abschwemmraten von Kupfer- und Zinkdächern, zusammengetragen aus der Literatur.

Material	Beschichtung / Zusammensetzung	Dauer (Jahre)	Standort	Abschwemmrate (g/m ² a)			Quelle
				Max	Min	Mittel	
Cu	-	2	Stockholm	-	-	1.00	Herting, 2008
Cu	-	5	Dübendorf	-	-	1.30	Faller, 2005
Cu	sandgestrahlt	5	Dübendorf	-	-	1.40	Faller, 2005
Cu	sandgestrahlt	4	Dübendorf	-	-	1.34	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Lägern	-	-	0.93	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Härkingen	-	-	1.18	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Bern	-	-	0.76	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	2	Payern	-	-	1.12	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Sion	-	-	0.63	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Cadenazzo	-	-	1.72	Wallinder, 2006
Cu	sandgestrahlt	4	Davos	-	-	0.44	Wallinder, 2006
Cu	Vorbewittert	5	Dübendorf	1.30	1.30	1.30	Faller, 2005
Cu	galvanisch verzinkt 1 µm	5	Dübendorf	-	-	0.50	Faller, 2005
Cu	feuerverzinkt 5-6 µm	2	Dübendorf	-	-	<0.01	Faller, 2005
Cu	-	-	-	3.30	2.20	2.75	Robert-Sainte, 2009
Cu	-	-	-	2.30	1.70	2.00	Robert-Sainte, 2009
Cu	-	-	-	0.40	0.20	0.30	Leuenberger-Minger, 2002
Cu	-	-	-	1.70	1.60	1.65	Leuenberger-Minger, 2002
Cu	-	-	-	1.80	0.80	1.30	Leuenberger-Minger, 2002
Cu	-	-	-	1.10	0.40	0.75	Hedberg, 2015
Cu	-	-	-	2.00	0.34	1.17	Hedberg, 2015
Cu	-	-	-	0.52	0.46	0.49	Hedberg, 2015
Cu	-	-	-	1.41	0.36	0.89	Hedberg, 2015
Cu	-	-	-	1.30	1.30	1.30	HE, 2001
Cu	-	-	-	2.10	2.10	2.10	HE, 2001
Cu	-	-	-	1.90	1.90	1.90	HE, 2001
Cu	-	-	-	1.06	0.80	0.93	S. Bittner, 2006
Cu	-	-	-	2.30	2.30	2.30	S. Bittner, 2006
Cu	-	-	-	1.86	0.85	1.36	Athanasiadis, 2009
Cu	-	-	-	1.68	1.22	1.45	Bertling, 2006
Cu	-	-	-	1.02	1.00	1.01	Herting, 2008
Cu	-	-	-	1.50	1.50	1.50	Odnevall Wallinder, 2000
Cu	-	-	-	3.93	3.93	3.93	Jouen, 2004
Zn	-	2	Stockholm	-	-	1.55	Faller, 2005
Zn	-	1.2	Paris (Zentrum)	-	-	3.87	Robert-Sainte, 2009
Zn	-	1.2	Paris (ausserhalb)	-	-	3.30	Robert-Sainte, 2009
Zn	-	10	Stockholm	-	-	1.90	Lindström, 2011
Zn	-	1	Brest (Meer)	-	-	2.60	Sandberg, 2007
Zn	0.08%Cu, 0.06%Ti	2	Stockholm	-	-	2.10	Lindström, 2010
Zn	0.08%Cu, 0.06%Ti	2	Brest (Meer)	-	-	2.60	Lindström, 2010
Zn	Titanzink (Rhein-zink)	5	Dübendorf	-	-	2.60	Faller, 2005
Zn	Titanzink (Rhein-zink), sandgestrahlt	5	Dübendorf	-	-	3.20	Faller, 2005
Zn	sandgestrahlt	4	Dübendorf	-	-	3.40	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Lägern	-	-	2.75	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Härkingen	-	-	5.95	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Bern	-	-	2.62	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	2	Payern	-	-	2.68	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Sion	-	-	2.65	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Cadenazzo	-	-	5.62	Wallinder, 2006
Zn	sandgestrahlt	4	Davos	-	-	1.98	Wallinder, 2006
Zn	ca. 40 Jahre alt	1.2	Paris (Zentrum)	-	-	4.52	Robert-Sainte, 2009
Zn	ca. 40 Jahre alt	1.2	Paris (ausserhalb)	-	-	4.15	Robert-Sainte, 2009
Zn	Titanzink (Rhein-zink), vorbereitert	5	Dübendorf	-	-	3.20	Faller, 2005
Zn	Titanzink (VMZinc), phosphatiertes Anthra-Zink	5	Dübendorf	-	-	1.90	Faller, 2005
Zn	phosphatiertes Anthra-Zink	1.2	Paris (Zentrum)	-	-	2.30	Robert-Sainte, 2009
Zn	phosphatiertes Anthra-Zink	1.2	Paris (ausserhalb)	-	-	2.11	Robert-Sainte, 2009
Zn	vorbewittert, org. Beschichtung 1-2 µm	1	Brest (Meer)	-	-	1.60	Sandberg, 2007
Zn	vorbewittert, org. Beschichtung A 20 µm	1	Brest (Meer)	-	-	0.09	Sandberg, 2007
Zn	vorbewittert, org. Beschichtung B 20 µm	1	Brest (Meer)	-	-	0.14	Sandberg, 2007
Zn	-	-	-	12.40	8.20	10.30	Veleva, 2009
Zn	-	-	-	4.50	2.00	3.25	Robert-Sainte, 2009
Zn	-	-	-	4.10	1.80	2.95	Robert-Sainte, 2009
Zn	-	-	-	3.10	3.10	3.10	HE, 2001
Zn	-	-	-	3.50	2.10	2.80	Odnevall Wallinder, 2001
Zn	-	-	-	2.61	1.58	2.10	S. Bittner, 2006
Zn	-	-	-	5.83	5.83	5.83	S. Bittner, 2006
Zn	-	-	-	3.73	3.73	3.73	Schriewer, 2008
Zn	-	-	-	1.59	1.50	1.55	Herting, 2008
Zn	-	-	-	4.00	3.50	3.75	Nolting, 2008
Zn	-	-	-	6.70	0.90	3.80	Odnevall Wallinder, 2000
Zn	-	-	-	8.72	8.72	8.72	Jouen, 2004

Tabelle 13: Abschwemmraten von Zink auf geneigten Metallflächen (aus: Lindström, 2010).

Abschwemmrate (g/m ² a)	Jahresniederschlag (mm a)	SO ₂ -Gehalt (µg/m ³)	Expositions- dauer	Standort / Korrosionsklasse	Neigung (°)
12.6	748	73	1 a	Industrie, Marin / -	45
8.7	1087	28.4	161 d	Industrie / -	45
6.8	706	39	1 a	Industrie / -	45
8.2	1728	-	2 a	Urban / C3	21
5.6	1822	-	1 a	Marin / -	30
3.9	638	3	1 a, 2 m	Urban / -	5
3.7	868	3-4	1 a	Rural, urban / -	10
3.4	1120	-	2 a, 9 m	Urban / -	30
3.3	656	2	1 a, 2 m	Suburban / -	5
2.6	1084	-	1 a	Rural / -	30
2.6	1054	2	1 a	Marin / C3	45
2.6	1046	4-7	5 a	Rural, urban / C2	45
2.6	1000	7-8	4 a	Rural, urban / C2	45
2.1	641	1-3	5 a	Rural, urban / C2	45

Tabelle 14: Vorgehen beim Auswaschtest DSLT für acht Eluate (SNR CEN/TS 16637-2:2014).

Probe	Dauer der Elution	Dauer ab Beginn
1 R1	6 h ± 15 min	6 h
2 R2	18 h ± 15 min	1 d
3 R3	1 d und 6 h ± 45 min	2 d und 6 h
4 R4	1 d und 18 h ± 75 min	4 d
5 R5	5 d ± 75 min	9 d
6 R6	7 d ± 75 min	16 d
7 R7	20 d ± 7 h	36 d
8 R8	28 d ± 12 h	64 d

Tabelle 15: Verteilung der 7 Hauptbodennutzungen im Datensatz NAQUA-TREND, die Anzahl Messstellen und Messwerte.

Hauptbodennutzung	Anteil (%)	Messstellen (n)	Daten (n)	
Gras und Viehwirtschaft	GV	11	8	282
Ackerbau	AB	48	21	1224
Siedlung und Verkehr	SV	27	11	691
Wald	WA	9	7	220
Obst und Rebbau	RE	1	1	37
Sommerungsweiden	AJ	3	2	75
Unproduktive Gebiete	UG	1	2	33
Total		100	52	2562

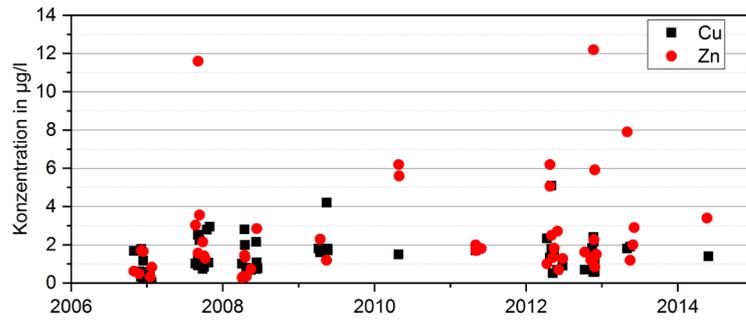


Abbildung 21: Kupfer- und Zinkkonzentrationen der 11 Messstellen in NAQUA-TREND mit der Hauptbodennutzung Siedlung und Verkehr zwischen 2006 und 2015.

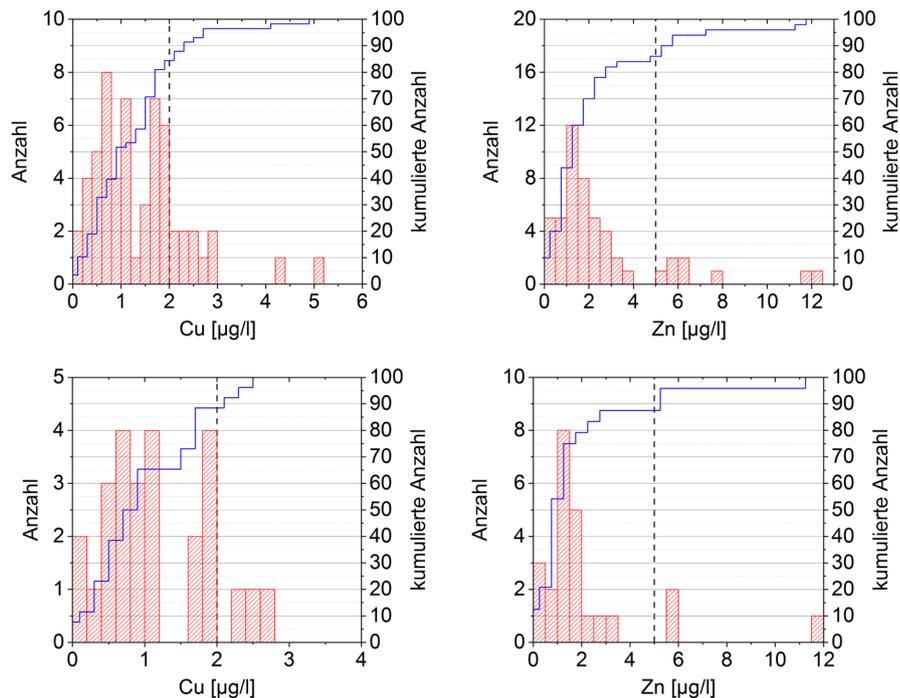


Abbildung 22: Messwerte von 11 SV-Messstellen in NAQUA-TREND für Kupfer ($n = 58$) und Zink ($n = 50$) (oben) und 5 SV-Messstellen für Kupfer ($n = 26$) und Zink ($n = 24$) (unten) in Klassen von $0.2 \mu\text{g/L}$ bei Kupfer und $0.25 \mu\text{g/L}$ bei Zink. Die gestrichelte Linie zeigt die Indikatorwerte der Wegleitung Grundwasserschutz für Kupfer und Zink.

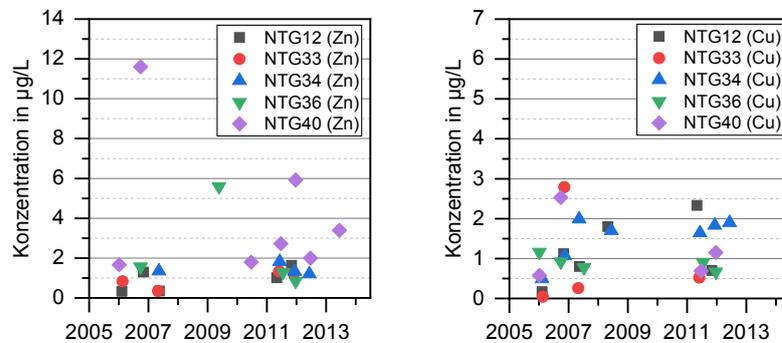


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der Zink- und Kupferkonzentrationen an 5 SV-Messstellen von NAQUA-TREND. Nur die Messwerte $>BG$ sind dargestellt.

Messstellen Basel-Stadt

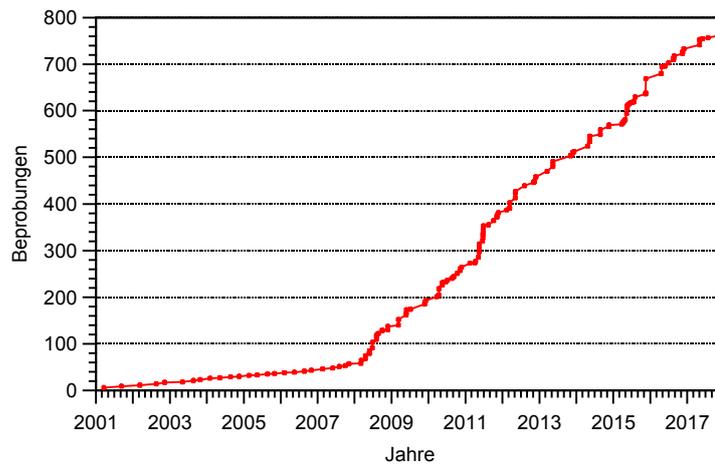


Abbildung 24: Kumulierte Probenahmen in Basel-Stadt von März 2001 bis November 2017 (n=764).

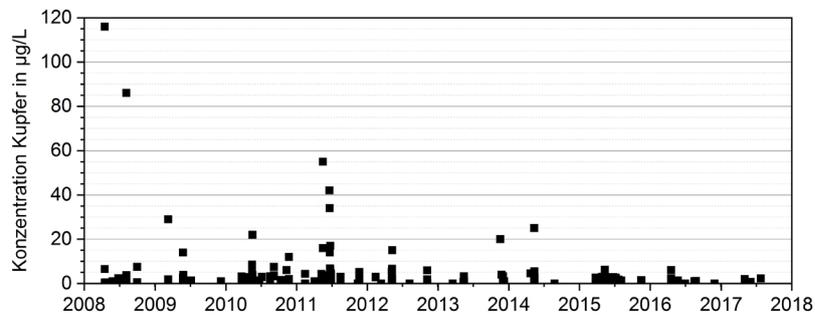


Abbildung 25: Konzentration von Kupfer gesamt an 109 Messstellen im Kanton Basel-Stadt.

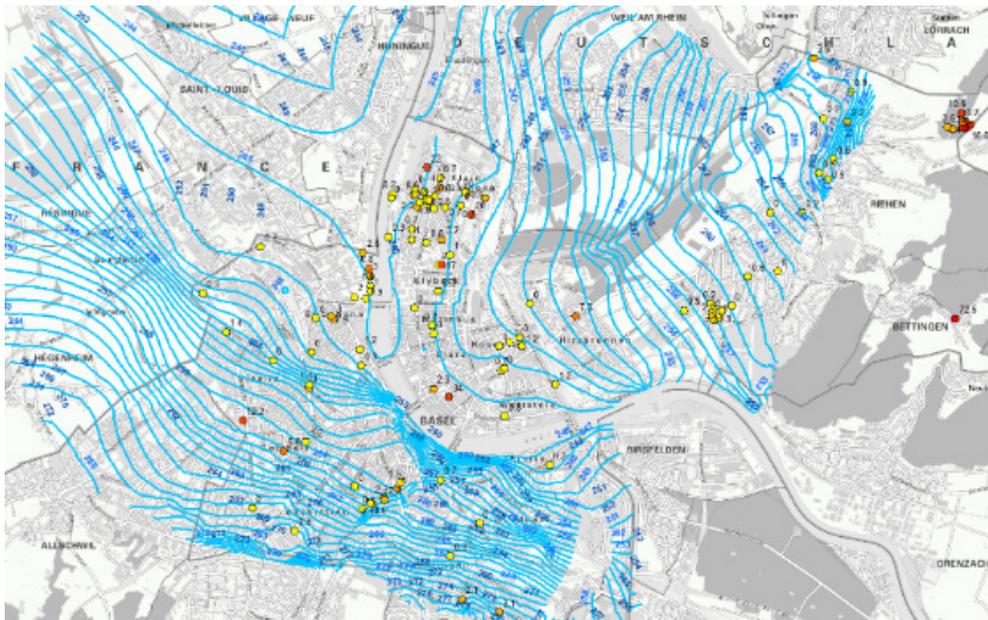


Abbildung 26: Räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen in Basel-Stadt, das Auftreten von Kupfer gesamt sowie die Grundwassergleichen.



Abbildung 27: Messstelle F_1305 mit der baulichen Infrastruktur, belasteten Standorten und dem Auszug aus dem Versickerungskataster. Zwei Unterirdische Versickerungen 185, 716; drei Versickerungen mit Bodenpassage 1566, 616, 839.

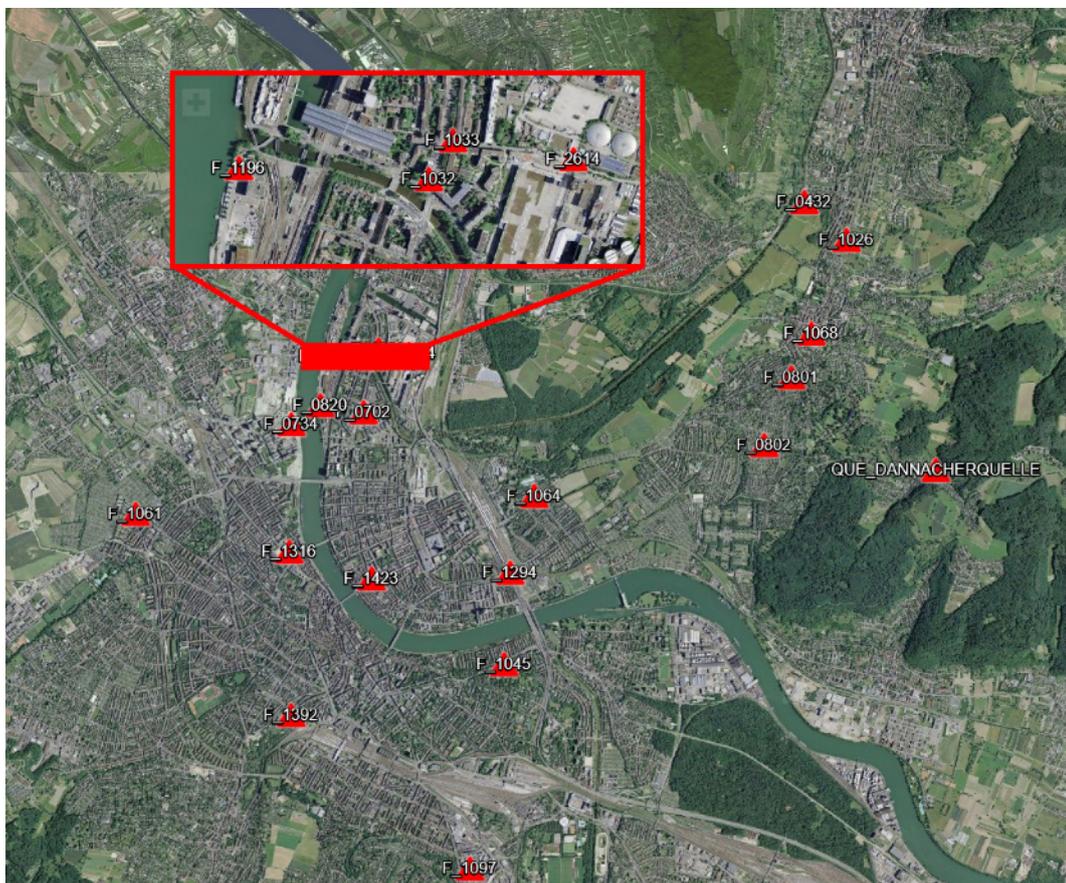


Abbildung 28: Verteilung der Messstellen in Basel-Stadt, an denen die drei Pestizide Diuron, Terbutryn und Mecoprop gefunden wurden. Der Indikatorwert für Grundwasser von 0.1 µg/L wurde nicht überschritten.

Tabelle 16: An nachfolgenden Messstellen wurde in Basel-Stadt Diuron, Terbutryn und Mecoprop gefunden. Angegeben sind Anzahl, Konzentration und Datum der positiven Befunde pro Stoff und Messstelle.

Messstelle	Diuron	Terbutryn	Mecoprop
F_0432	n = 2 0.003 µg/L 18.05.2010 0.003 µg/L 25.04.2016	-	-
F_0702	-	-	n = 1 0.004 µg/L 18.04.2016
F_0801	n = 1 0.006 µg/L 13.05.2013	-	n = 1 0.001 µg/L 16.11.2015
F_0802	-	-	n = 1 0.008 µg/L 18.05.2015
F_0820	-	-	n = 1 0.001 µg/L 18.04.2016
F_1026	-	-	n = 1 0.003 µg/L 15.11.2016
F_1032	-	-	n = 1 0.002 µg/L 18.04.2016
F_1033	-	-	n = 2 0.003 µg/L 20.06.2011 0.006 µg/L 18.04.2016
F_1045	-	n = 1 0.004 µg/L 24.11.2009	n = 4 0.003 µg/L 23.05.2016 0.004 µg/L 15.11.2016 0.003 µg/L 02.05.2017 0.004 µg/L 14.11.2017
F_1061	-	-	n = 2 0.002 µg/L 15.11.2016 0.002 µg/L 02.05.2017
F_1064	-	n = 1 0.007 µg/L 24.11.2009	n = 1 0.003 µg/L 14.11.2016
F_1068	n = 5 0.004 µg/L 18.05.2010 0.006 µg/L 13.05.2013 0.004 µg/L 16.11.2015 0.003 µg/L 25.04.2016 0.003 µg/L 04.05.2017	-	-
F_1196	-	n = 1 0.008 µg/L 27.05.2015	-
F_1294	n = 6 0.005 µg/L 14.05.2013 0.006 µg/L 04.11.2013 0.007 µg/L 13.05.2014 0.005 µg/L 17.11.2015 0.008 µg/L 23.05.2016 0.004 µg/L 16.11.2016	n = 1 0.008 µg/L 24.11.2009	n = 1 0.002 µg/L 16.11.2016
F_1316	-	-	n = 4 0.012 µg/L 19.05.2015 0.029 µg/L 17.11.2015 0.006 µg/L 03.05.2017 0.010 µg/L 14.11.2017
F_1392	-	n = 1 0.007 µg/L 27.05.2009	-
F_1423	-	-	n = 1 0.001 µg/L 23.05.2016
F_2614	-	n = 4 0.016 µg/L 04.08.2008 0.014 µg/L 27.05.2009 0.017 µg/L 24.11.2009 0.018 µg/L 07.11.2011	n = 1 0.001 µg/L 15.05.2013
QUE_DAN- NACHER-QUELLE	n = 2 0.008 µg/L 18.03.2013 0.013 µg/L 13.05.2013	-	-

Messstellen Basel-Landschaft

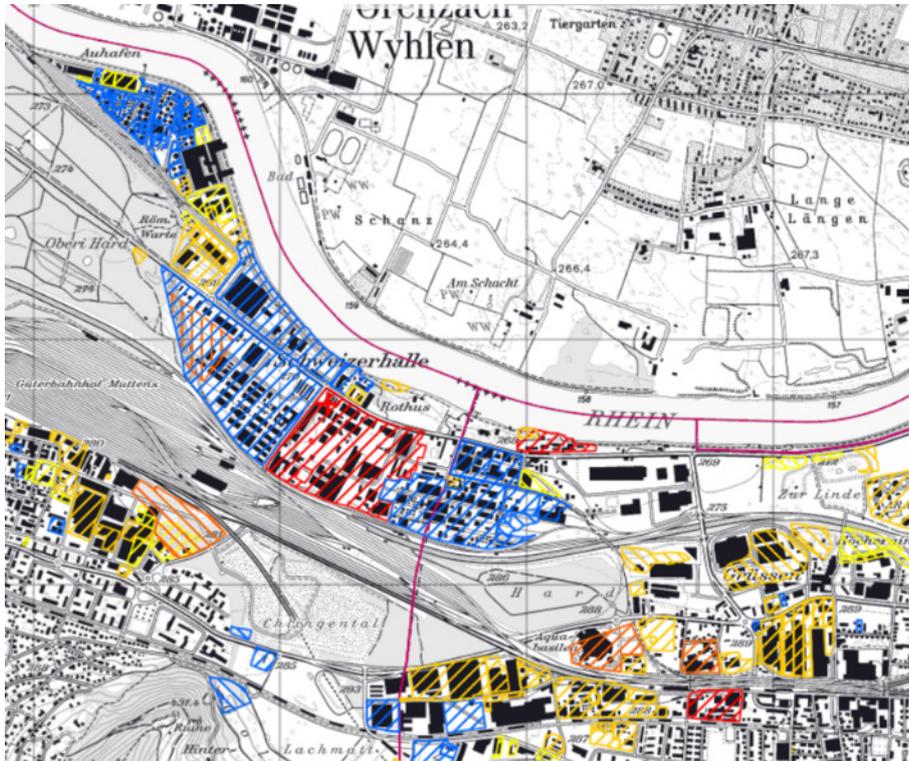


Abbildung 29: Auszug aus dem Kataster der belasteten Standorte im Industriegebiet Schweizerhalle des Kantons Basel-Landschaft.



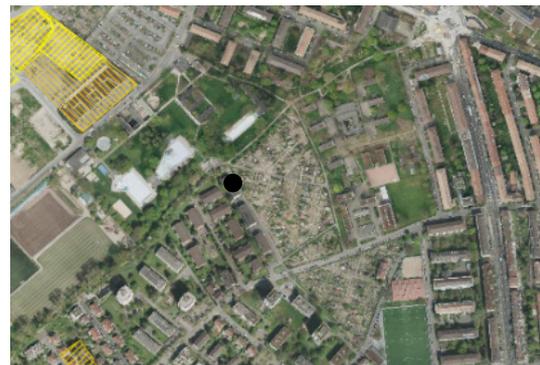
BL_11.A.3



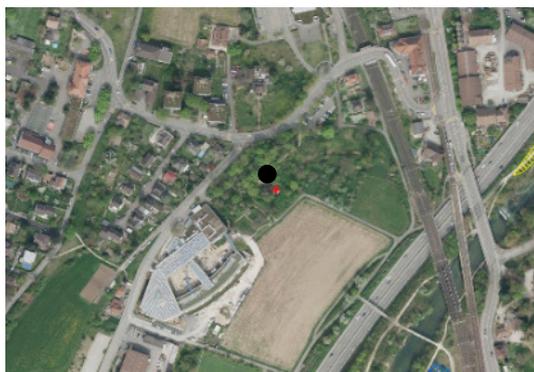
BL_12.A.4



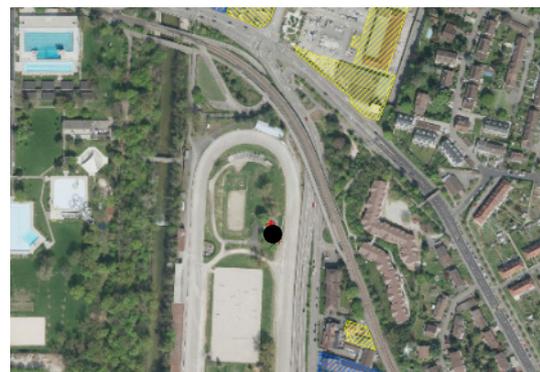
BL_12.J.1 (Zn)



BL_12.J.4 (Zn)



BL_20.A.2 (Zn, Cu)



BL_21.A.101 (Zn, Cu)



BL_39.J.34, BL_39.J.35 (Zn)



BL_41.A.4 (Zn), BL_41.A.5 (Zn), BL_41.A.6 (Zn),
BL_41.A.7 (Zn, Cu)

Abbildung 30: 12 bzw. 3 Messstellen im Kanton Basel-Landschaft, bei denen mind. fünf Messwerte zwischen 2010 und 2017 grösser als die Indikatorwerte für Zink oder Kupfer sind. Schwarzer Punkt: Messstellen.

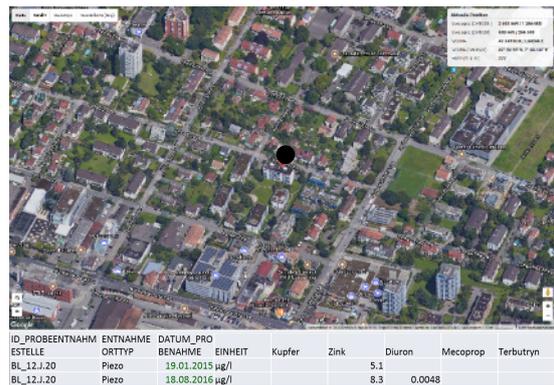


Abbildung 31: Standorte der vier Messstellen im Kanton Basel-Landschaft, bei denen Diuron und Zink nachweisbar waren. Schwarzer Punkt: Messstellen.