

# Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz

Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

# Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz

Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016

# Impressum

## Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

## Projektleitung

Ronald Kozel (Abt. Hydrologie)

## Redaktion

Miriam Reinhardt (Koordination), Aysel Güler, Marc Schürch, Michael Sinreich, Stephanie Zimmermann (Abt. Hydrologie), Manuel Kunz (Abt. Wasser)

## Begleitung BAFU

Olivier Overney † (Abt. Hydrologie), Markus Thommen (Abt. Arten, Ökosysteme, Landschaften), Bettina Hitzfeld, Magali Lebrun Lengacher, Christoph Reusser, Reto Tietz, Christiane Wermeille (Abt. Boden und Biotechnologie), Richard Ballaman, Andreas Buser, Petra Kunz, Josef Tremp (Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien), Sabine Augustin, Michael Reinhard (Abt. Wald), Christian Leu, Stephan Müller, Reto Murali Teuscher, Michael Schärer, Corin Schwab, Fabian Soltermann, Saskia Zimmermann-Steffens (Abt. Wasser)

## Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2019: Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1901: 138 S.

## Gestaltung

Cavelli AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

## Titelbild

Quellfassung Altdorf UR

© Emanuel Ammon

## PDF-Download

[www.bafu.admin.ch/uz-1901-d](http://www.bafu.admin.ch/uz-1901-d)

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2019

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |   |            |
|--|-----------|---|------------|
| <b>Abstracts</b>                             | <b>6</b>  | 8.3 Zustand                                     | 43         |
| <b>Vorwort</b>                               | <b>7</b>  | 8.4 Entwicklung                                 | 45         |
| <b>1 Das Wichtigste in Kürze</b>             | <b>8</b>  | 8.5 Analyse                                     | 46         |
| <b>2 Einleitung</b>                          | <b>12</b> | <b>9 Spurenelemente</b>                         | <b>48</b>  |
| <b>3 Nationale Grundwasserbeobachtung</b>    | <b>13</b> | 9.1 Grundlagen                                  | 48         |
| 3.1 Zielsetzung                              | 13        | 9.2 Datenerhebung                               | 48         |
| 3.2 Organisation                             | 13        | 9.3 Zustand                                     | 50         |
| 3.3 Module                                   | 14        | 9.4 Entwicklung                                 | 51         |
| 3.4 Qualitätssicherung                       | 19        | 9.5 Analyse                                     | 51         |
| 3.5 Information und Kommunikation            | 19        | <b>10 Nitrat</b>                                | <b>54</b>  |
| <b>4 Grundwasser in der Schweiz</b>          | <b>20</b> | 10.1 Grundlagen                                 | 54         |
| 4.1 Grundwasserressourcen                    | 20        | 10.2 Datenerhebung                              | 55         |
| 4.2 Grundwasserleiter                        | 20        | 10.3 Zustand                                    | 55         |
| <b>5 Grundwasserstände und Quellabflüsse</b> | <b>23</b> | 10.4 Entwicklung                                | 57         |
| 5.1 Grundlagen                               | 23        | 10.5 Analyse                                    | 58         |
| 5.2 Datenerhebung                            | 24        | <b>11 Pflanzenschutzmittel</b>                  | <b>59</b>  |
| 5.3 Zustand                                  | 25        | 11.1 Grundlagen                                 | 59         |
| 5.4 Entwicklung                              | 29        | 11.2 Datenerhebung                              | 61         |
| 5.5 Analyse                                  | 31        | 11.3 Zustand                                    | 64         |
| <b>6 Wasserisotope</b>                       | <b>32</b> | 11.4 Entwicklung                                | 74         |
| 6.1 Grundlagen                               | 32        | 11.5 Analyse                                    | 76         |
| 6.2 Datenerhebung                            | 33        | <b>12 Flüchtige organische Verbindungen</b>     | <b>83</b>  |
| 6.3 Zustand                                  | 33        | 12.1 Grundlagen                                 | 83         |
| 6.4 Entwicklung                              | 35        | 12.2 Datenerhebung                              | 84         |
| 6.5 Analyse                                  | 36        | 12.3 Zustand                                    | 87         |
| <b>7 Grundwassertemperatur</b>               | <b>37</b> | 12.4 Entwicklung                                | 92         |
| 7.1 Grundlagen                               | 37        | 12.5 Analyse                                    | 94         |
| 7.2 Datenerhebung                            | 37        | <b>13 Abwasserindikatoren</b>                   | <b>97</b>  |
| 7.3 Zustand                                  | 38        | 13.1 Grundlagen                                 | 97         |
| 7.4 Entwicklung                              | 38        | 13.2 Datenerhebung                              | 97         |
| 7.5 Analyse                                  | 40        | 13.3 Zustand                                    | 98         |
| <b>8 Hauptinhaltsstoffe</b>                  | <b>42</b> | 13.4 Analyse                                    | 101        |
| 8.1 Grundlagen                               | 42        | <b>14 Pilotstudie Perfluorierte Chemikalien</b> | <b>104</b> |
| 8.2 Datenerhebung                            | 43        | 14.1 Grundlagen                                 | 104        |
|  |           | 14.2 Datenerhebung                              | 105        |
|  |           | 14.3 Zustand                                    | 106        |
|  |           | 14.4 Analyse                                    | 106        |

---

|           |                              |            |
|-----------|------------------------------|------------|
| <b>15</b> | <b>Pilotstudie Screening</b> | <b>108</b> |
| 15.1      | Grundlagen                   | 108        |
| 15.2      | Datenerhebung                | 108        |
| 15.3      | Ergebnisse                   | 109        |
| 15.4      | Analyse                      | 110        |

---

|           |                                    |            |
|-----------|------------------------------------|------------|
| <b>16</b> | <b>Pilotstudie Mikroorganismen</b> | <b>112</b> |
| 16.1      | Grundlagen                         | 112        |
| 16.2      | Datenerhebung                      | 113        |
| 16.3      | Zustand                            | 114        |
| 16.4      | Analyse                            | 118        |

---

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>17</b> | <b>Fazit: Beurteilung und Handlungsbedarf</b> | <b>122</b> |
| 17.1      | Beurteilung Grundwasserzustand                | 122        |
| 17.2      | Handlungsbedarf und Massnahmen                | 123        |
| 17.3      | Ausblick Monitoring                           | 125        |

---

|                  |            |
|------------------|------------|
| <b>Literatur</b> | <b>127</b> |
|------------------|------------|

---

|                    |            |
|--------------------|------------|
| <b>Verzeichnis</b> | <b>133</b> |
| Abbildungen        | 133        |
| Tabellen           | 135        |

---

|                 |            |
|-----------------|------------|
| <b>Anhang 1</b> | <b>137</b> |
|-----------------|------------|

---

|                 |            |
|-----------------|------------|
| <b>Anhang 2</b> | <b>138</b> |
|-----------------|------------|

# Abstracts

The NAQUA National Groundwater Monitoring is the joint federal-cantonal monitoring programme that records groundwater quantity and quality at around 600 monitoring sites across Switzerland. This NAQUA report shows that nitrate and pesticide residues in particular have a lasting adverse impact on groundwater quality. Persistent synthetic substances from industry, commerce and households are also detectable in groundwater, Switzerland's most important drinking water resource. The groundwater resources most affected are on the Swiss Plateau, which is densely populated and used intensively for agriculture. As groundwater renewal is such a slow process, anticipatory measures to protect and conserve groundwater resources are of particular importance.

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA ist das gemeinsame Monitoringprogramm von Bund und Kantonen, das die Grundwasser-Quantität und -Qualität landesweit an rund 600 Messstellen erfasst. Der vorliegende NAQUA-Bericht zeigt, dass vor allem Nitrat und Rückstände von Pflanzenschutzmitteln die Grundwasser-Qualität nachhaltig beeinträchtigen. Auch künstliche, langlebige Substanzen aus Industrie, Gewerbe und Haushalten sind im Grundwasser, der wichtigsten Trinkwasserressource der Schweiz, nachweisbar. Betroffen sind vor allem die Grundwasservorkommen im intensiv landwirtschaftlich genutzten und dicht besiedelten Mittelland. Da sich Grundwasser nur langsam erneuert, kommt vorausschauenden Massnahmen zu Schutz und Erhalt der Grundwasserressourcen besondere Bedeutung zu.

Gerée conjointement par la Confédération et les cantons, l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA suit, auprès de quelque 600 stations de mesure, l'évolution de la quantité et de la qualité des eaux souterraines en Suisse. Le présent rapport NAQUA montre que les nitrates et les résidus de produits phytosanitaires, en particulier, compromettent durablement leur qualité. Les relevés attestent cependant aussi de la présence dans les eaux souterraines – la principale ressource d'eau potable du pays – de substances artificielles persistantes provenant de l'industrie, de l'artisanat et des ménages. Cette atteinte est observée avant tout sur le Plateau, région densément peuplée et vouée à une exploitation agricole intensive. Étant donné que les eaux souterraines ne se renouvellent que lentement, les mesures préventives revêtent une importance toute particulière afin de protéger cette ressource à long terme.

L'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA è il programma di monitoraggio congiunto di Confederazione e Cantoni che rileva la quantità e la qualità delle acque sotterranee in circa 600 stazioni di misurazione sull'intero territorio nazionale. Il presente rapporto NAQUA mostra che la qualità delle acque sotterranee è compromessa in modo duraturo soprattutto dal nitrato e da residui di prodotti fitosanitari. Nelle acque sotterranee, la più importante risorsa di acqua potabile svizzera, sono presenti anche sostanze artificiali persistenti provenienti dall'industria, dall'artigianato e dalle economie domestiche. Ad essere interessata è soprattutto la falda freatica dell'Altipiano, una regione coltivata in modo intensivo e densamente popolata. Dato il lento rinnovo delle acque sotterranee, i provvedimenti a titolo preventivo finalizzati alla protezione e alla conservazione delle risorse di acque sotterranee assumono particolare importanza.

## Keywords:

*NAQUA, groundwater, groundwater monitoring, groundwater quality, groundwater quantity*

## Stichwörter:

*NAQUA, Grundwasser, Grundwasserbeobachtung, Grundwasser-Qualität, Grundwasser-Quantität*

## Mots-clés :

*NAQUA, eaux souterraines, observation des eaux souterraines, qualité des eaux souterraines, quantité des eaux souterraines*

## Parole chiave:

*NAQUA, acque sotterranee, osservazione delle acque sotterranee, quantità delle acque sotterranee, qualità delle acque sotterranee*

---

# Vorwort

Grundwasser ist unsere wichtigste Trinkwasserressource. Verborgen unter unseren Füssen im Untergrund, natürlich, klar, rein, jederzeit verfügbar – das scheint selbstverständlich in einem wasserreichen Land wie der Schweiz. Dass diese unentbehrliche Ressource in guter Qualität und ausreichender Menge verfügbar ist, ist aber nicht überall und immer so. So zeigen die Analysen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, wie Grundwasser auch hierzulande unter Druck ist. Das Siedlungswachstum schränkt die Nutzbarkeit der Grundwasserressourcen ein und Nitrat sowie Rückstände künstlicher langlebiger Substanzen, wie von Pflanzenschutzmitteln, halogenierten Kohlenwasserstoffen oder Abwasserinhaltsstoffen gefährden die Grundwasser-Qualität. Trockenperioden lassen zudem das nutzbare Grundwasser bisweilen knapp werden.

Grundwasser erneuert sich nur langsam und so findet man noch heute schwer abbaubare Substanzen im Grundwasser, die bereits seit vielen Jahren verboten sind, wie z. B. das bereits seit 2007 nicht mehr zugelassene Herbizid Atrazin. Umso wichtiger ist daher, problematische Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und die Grundwasserressourcen vorausschauend und vorsorgend vor Einträgen von Fremd- und Schadstoffen aus Landwirtschaft, Gewerbe, Industrie sowie dem Siedlungsgebiet zu schützen. Auch die Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwassermenge und -temperatur gilt es im Auge zu behalten und zu antizipieren.

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA, die vom BAFU gemeinsam mit engagierten Kolleginnen und Kollegen in den kantonalen Fachstellen bewirtschaftet wird, liefert seit 2002 zuverlässig solide Fakten zu Zustand und Entwicklung der Grundwasserressourcen. Die Referenzdaten und Analysen lassen fundierte und aussagekräftige Schlussfolgerungen zur Grundwasser-Quantität und -Qualität zu und bilden damit die Grundlage für die nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen.

Wir alle tragen Verantwortung für den Erhalt der Grundwasserressourcen. Nutzen Sie daher diesen Bericht und die regelmässig aktualisierten Informationen im Internet, um sich aus erster Hand über die Quantität und Qualität des Grundwassers in der Schweiz zu informieren und bewusste Entscheide zu fällen.

Für das grosse Engagement im Rahmen von NAQUA ein ganz herzliches Dankeschön den zahlreichen beteiligten Partnern innerhalb und ausserhalb des BAFU!

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Karin Siegwart, Vizedirektorin  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

# 1 Das Wichtigste in Kürze

Grundwasser ist mit Abstand die bedeutendste Trinkwasserressource der Schweiz. Trinkwasser wird hierzu-lande zu achtzig Prozent – das sind etwa 1,3 Milliarden Kubikmeter (m<sup>3</sup>) – aus Grundwasser gewonnen. Vierzig Prozent davon können ohne weitere Aufbereitung direkt als Trinkwasser verwendet werden. Grundwasser speist zudem wertvolle Feuchtgebiete und – insbesondere in Trockenzeiten – die grossen und kleinen Fliessgewässer. Es ist daher ein wertvolles Gut, mit dem es sorgsam umzugehen gilt.

## Zunehmender Druck auf das Grundwasser

In der Schweiz scheint es selbstverständlich, Grundwasser in hoher Qualität und ausreichender Menge zur Verfügung zu haben. Doch die Ressource steht unter Druck – insbesondere wegen Fremdstoffen aus der Landwirtschaft, aber auch von belasteten Industrie- und Gewerbestandorten, von Verkehrsflächen und aus der Siedlungsentwässerung. Die zunehmende Urbanisierung der Schweiz verunmöglicht es zudem häufig, die notwendigen Flächen für den Schutz der Grundwasserfassungen bereitzustellen. Zudem beginnen klimatische Veränderungen, sich auf das Grundwasser auszuwirken.

## Vorausschauender Gewässerschutz

Niederschläge und versickerndes Wasser aus den Flüssen sorgen dafür, dass sich das Grundwasser stetig erneuert – ein Prozess, der allerdings Zeit braucht. Da sich Grundwasser lange im Untergrund aufhält und dort künstliche Substanzen kaum abgebaut werden, wird es problematische Stoffe nur schwer wieder los. Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) hält deshalb fest, dass Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten soll. Für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder potentiell genutzt werden soll, legt sie für ausgewählte Substanzen oder Substanzgruppen zusätzlich spezifische Grenzwerte fest, sogenannte numerische Anforderungen. Zudem sollte der mengenmässige Zustand nicht dauerhaft negativ beeinflusst sein.

## Zahlen und Fakten aus NAQUA

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA erfasst den Zustand und die Entwicklung des Grundwassers und

hilft, die Wirksamkeit getroffener Massnahmen zu beurteilen. NAQUA erhebt in enger Zusammenarbeit mit den kantonalen Fachstellen landesweit an über 600 Messstellen die Qualität und Quantität des Grundwassers und zeigt deren langfristige Veränderungen auf. Weiterhin erlauben Pilotstudien, spezifische Schadstoffe im Detail zu identifizieren und den Bedarf für einen Einbezug in das Langzeitmonitoring abzuklären. Dank NAQUA werden somit problematische Entwicklungen frühzeitig erkannt. Denn nur was bekannt ist, dem lässt sich mit wirksamen Massnahmen entgegenwirken.

## Bericht 2019

Der vorliegende Bericht der Nationalen Grundwasserbeobachtung zu Zustand und Entwicklung der Grundwasserressourcen schliesst an die beiden vorherigen Berichte an und fokussiert auf die Jahre ab 2007. Er liefert ein breites Spektrum an Zahlen, Fakten und Analysen im landesweiten Massstab. Die Grundwasser-Quantität wird anhand von Grundwasserständen und Quellabflüssen erfasst. Die Analyse der Grundwasser-Qualität umfasst die Grundwassertemperatur, die natürlichen Wasserinhaltsstoffe wie auch künstliche Fremdstoffe. Hierbei handelt es sich vor allem um Nitrat, sowie Rückstände von Pflanzenschutzmitteln, halogenierte Kohlenwasserstoffe und Abwasserindikatoren.

## Unterschiedliche Herkunft

Über ein Drittel des Trinkwassers in der Schweiz stammt aus Grundwasserleitern im Lockergestein des Mittellands und der grossen Alpentäler. Weil der Boden als natürlicher Filter wirkt, sind diese Grundwasserleiter eigentlich gut vor Verschmutzungen geschützt. Die intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung sowie die dichte Besiedlung führen jedoch trotzdem dazu, dass das Grundwasser im Mittelland am stärksten mit Fremd- und Schadstoffen wie z. B. Nitrat oder Rückständen von Pflanzenschutzmitteln verunreinigt ist. Zudem können hier Stoffe aus dem Flusswasser ins angrenzende Grundwasser gelangen.

Weitere dreissig Prozent des Trinkwassers werden aus Kluft-Grundwasser gewonnen, das vor allem in den Alpen und in Molassegesteinen des Mittellands entlang von Störungen, Klüften und feinen Rissen im Gestein fliesst.

Das Wasser bewegt sich hier rascher als im Lockergestein, und eine schützende Bodenschicht fehlt häufig. Die Bodennutzung ist allerdings meist extensiv, Fremdstoffe treten daher seltener auf. Lokal erhöhte Werte von Arsen, Chrom oder Uran im Grundwasser stammen dort vor allem aus dem Gestein, mit dem das Grundwasser in Kontakt steht.

Knapp ein Fünftel des Trinkwassers entspringt Karst-Grundwasserleitern. Diese sind im Jura und in den Alpen verbreitet und besonders empfindlich gegenüber dem Eintrag von Fremdstoffen und Mikroorganismen. Das Grundwasser fliesst im Untergrund sehr schnell, und oft besteht eine direkte Verbindung zur Erdoberfläche. Die entsprechenden Regionen sind ebenfalls wenig intensiv bewirtschaftet und vergleichsweise gering besiedelt. Karst-Grundwasserleiter enthalten daher generell wenig künstliche langlebige Substanzen. Die Grundwasserqualität kann hier jedoch, insbesondere witterungsbedingt, kurzfristig stark schwanken.

### **Theoretisch genug Grundwasser**

Eigentlich könnten jährlich 18 Milliarden m<sup>3</sup> Grundwasser – das ist mehr als das 10-fache des Bedarfs – auf nachhaltige Weise, d. h. ohne eine dauerhafte Absenkung des Grundwasserspiegels oder andere negative Auswirkungen auf die Umwelt, für die Wasserversorgung genutzt werden. Tatsächlich aber verhindern vielerorts Konflikte mit anderen Nutzungen wie etwa landwirtschaftlichen, gewerblichen oder industriellen Aktivitäten oder der Siedlungsentwicklung, dass dieses Potenzial auch nur annähernd ausgeschöpft werden kann.

Bezogen auf das gesamte Grundwasservolumen in der Schweiz machen die saisonalen Änderungen der Grundwasserstände in der Regel nur einen kleinen Anteil aus. So sind die natürlichen Schwankungen der Grundwasserstände in den ergiebigen Grundwasservorkommen im Lockergestein vergleichsweise gering. Starke Abflussänderungen an Quellen, insbesondere in Karst-Grundwasserleitern, können dagegen auf signifikante Veränderungen des Füllungsgrades in solchen Grundwasserleitern hinweisen. Generell kann in quantitativer Hinsicht, zumindest in der mehrjährigen Bilanz, von einem weitgehend stabilen Zustand der Ressource Grundwasser gesprochen werden, da sich die Grund-

wasserleiter regelmässig und vollständig wieder auffüllen.

### **Zu viel Nitrat im Grundwasser**

Von Natur aus ist Grundwasser weitgehend frei von Nitrat, da im Gestein und im unbewirtschafteten Boden praktisch kein leicht verfügbarer Stickstoff enthalten ist. Er reichert sich erst durch den landwirtschaftlichen Einsatz grosser Mengen stickstoffhaltiger Düngemittel im Boden an. Nitrat wird kaum an Bodenpartikeln gebunden, löst sich gut in Wasser und ist daher hoch mobil. Überschüssiges Nitrat, das nicht von den Pflanzen aufgenommen wird, kann rasch aus dem Boden ausgewaschen werden und ins Grundwasser einsickern. Vor allem in den niederschlagsreichen Wintermonaten, wenn viele Flächen brachliegen, wird der im Boden angereicherte Stickstoff als Nitrat ausgewaschen. Im Grundwasser wird dieses dann kaum mehr abgebaut.

Im Berichtszeitraum wurde der in der GSchV festgelegte Wert von 25 mg/l Nitrat jährlich an gut 15 bis 20% der Messstellen überschritten. Damit ist Nitrat diejenige Substanz, die die Grenzwerte mit Abstand am häufigsten übersteigt. In Gebieten, die massgeblich von Ackerbau geprägt sind, lagen die Werte 2014 sogar an 40% der Messstellen über der numerischen Anforderung.

Um einen übermässigen Eintrag von Nitrat ins Grundwasser zu verhindern, müsste die landwirtschaftliche Bewirtschaftung insbesondere im Acker- und im Gemüsebau nachhaltig optimiert und an die Tragfähigkeit der einzelnen Standorte angepasst werden. Nur ein bedarfs- und standortgerechter Einsatz tierischer und mineralischer Düngemittel sowie eine gesamthafte Reduktion der Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft kann die Situation langfristig entschärfen. Die Massnahmen, die im Rahmen einzelner Sanierungsprojekte erarbeitet wurden, müssten in allen betroffenen Gebieten dauerhaft implementiert und mittels der Instrumente der Agrarpolitik in den Zuströmbereichen der Trinkwasserfassungen schweizweit umgesetzt werden.

### **Rückstände von Pflanzenschutzmitteln weit verbreitet**

Aktuell sind in der Schweiz rund 300 verschiedene organisch-synthetische Substanzen als Pflanzenschutzmittel (PSM) zugelassen. Sie werden hauptsächlich in der

Landwirtschaft, aber auch im Gartenbau und in Privatgärten eingesetzt. Pro Jahr werden etwa 2000 Tonnen PSM verkauft.

Die Zahl der Messstellen, an denen PSM-Wirkstoffe oder Abbauprodukte davon – sogenannte Metaboliten – im Grundwasser nachgewiesen werden, liegt seit dem Jahr 2011 praktisch unverändert bei deutlich über 50%. An etwa 2% der Messstellen überschritten PSM-Wirkstoffe 2014 den von der GSchV vorgegebenen Grenzwert von 0,1 µg/l. Für die meisten Überschreitungen in den letzten Jahren waren die Herbizide Bentazon, Atrazin und Metolachlor verantwortlich.

Zusätzlich zu den PSM-Wirkstoffen traten 2014 an 20% der Messstellen auch PSM-Metaboliten – für die in der GSchV kein spezifischer Grenzwert definiert ist – in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. In intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten wurden sogar an 65% der Messstellen deutlich erhöhte Werte von PSM-Metaboliten nachgewiesen. PSM-Metaboliten sind im Vergleich zu den eigentlichen Wirkstoffen oftmals mobiler und zugleich langlebiger. Mit Abstand am häufigsten und in den höchsten Konzentrationen wurden bis Ende 2014 Metaboliten des Rübenherbizids Chloridazon nachgewiesen, gefolgt von Metaboliten von Metolachlor, das unter anderem beim Anbau von Mais, aber auch von Rüben und verschiedenen Sonderkulturen eingesetzt wird.

Während die Gesamtbelastung des Grundwassers durch PSM-Rückstände in den letzten Jahren stagniert, ist es im Spektrum der PSM zu Verschiebungen gekommen: So ist z.B. die Belastung des Grundwassers mit Rückständen von Atrazin mittlerweile rückläufig, nachdem die Zulassung dieses Wirkstoffs schrittweise eingeschränkt und 2007 schliesslich aufgehoben wurde. Die Zahl der Messstellen, an denen Metaboliten von Metolachlor nachgewiesen wurden, hat sich dagegen in den letzten Jahren etwa verdoppelt – parallel zu den Einsatzmengen dieses PSM-Wirkstoffs.

Hauptquelle für die erhebliche Belastung des Grundwassers mit PSM-Rückständen ist die intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung. Grossflächig werden PSM einzig in der Landwirtschaft angewendet. Auch in Siedlungen und Privatgärten werden PSM eingesetzt, aller-

dings insgesamt in geringeren Mengen. Ihr Einsatz ist auf befestigten Flächen mittlerweile nicht mehr gestattet, weil von dort die Substanzen rasch abgeschwemmt werden und direkt in die Kanalisation oder die Gewässer gelangen können. Auf öffentlichen Strassen und Plätzen ist es bereits seit 1986 untersagt, «Unkräuter» mit Herbiziden zu bekämpfen; 1999 wurde das Verbot auf private Wege und Plätze ausgedehnt. Darüber hinaus zielt der im September 2017 vom Bundesrat verabschiedete «Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln» (AP PSM) darauf ab, die Emissionen von PSM mittelfristig um einen Viertel zu senken und die von diesen Substanzen ausgehenden Risiken zu halbieren.

#### **Halogenierte Kohlenwasserstoffe aus Altlasten**

Anders als ihr Name vermuten lässt, können flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser ausgesprochen langlebig sein. Sie werden in Industrie und Gewerbe u.a. als Reinigungs- und Lösungsmittel sowie bei der Herstellung von Kunststoffen eingesetzt. Vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind sie beim unsachgemässen Umgang mit diesen Substanzen oder bei Unfällen ins Grundwasser gelangt und verunreinigen das Grundwasser als Altlasten bis heute.

Im Jahr 2014 wurden FHKW an rund 25% der Messstellen nachgewiesen. An 4% der Standorte überschritten sie die von der GSchV festgelegte numerische Anforderung und beeinträchtigen damit die Qualität des Grundwassers erheblich. Die Zahl der Messstellen, an denen erhöhte FHKW-Konzentrationen nachgewiesen wurden, ist in den letzten Jahren leicht zurückgegangen.

Die Sanierung belasteter Standorte erweist sich häufig als aufwändig und kostenintensiv. Sie leistet jedoch einen zentralen Beitrag, um die Belastung des Grundwassers im Siedlungsgebiet mit FHKW zu reduzieren und muss deshalb vorangetrieben werden.

#### **Haushalts- und Industriechemikalien aus dem Abwasser**

Täglich wird in den Haushalten eine Vielzahl von Wasch- und Abwaschmitteln, Kosmetika, Salben, Duschgels und Medikamenten verwendet, deren Inhaltsstoffe schliesslich über Ausguss und Toilette ins Abwasser gelangen. Selbst nach der Behandlung in Abwasserreinigungsan-

---

lagen können Spuren dieser Substanzen letztlich im Grundwasser enden, entweder durch Lecks in der Kanalisation, oder weil gewisse Substanzen in herkömmlichen Anlagen bisher nicht entfernt werden konnten und dann ins Flusswasser und mit diesem ins flussnahe Grundwasser gelangen.

An 37% der NAQUA-Messstellen wurden im Jahr 2014 Substanzen aus dem Abwasser, die als sogenannte Abwasserindikatoren bezeichnet werden, im Grundwasser nachgewiesen. Auch wenn für diese Abwasserindikatoren bisher keine spezifischen Grenzwerte in der GSchV festgelegt sind, sind sie im Grundwasser grundsätzlich unerwünscht. Nachgewiesen wurden u.a. Rückstände des Antibiotikums Sulfamethoxazol sowie das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol, das z. B. als Silberschutzmittel in Geschirrspülmitteln enthalten ist. Während die Konzentrationen der Arzneimittel meist gering waren, trat Benzotriazol an rund 1% der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf.

Die Belastung des Grundwassers durch Stoffe aus dem Abwasser fällt also durchaus ins Gewicht. Allerdings ist ein Rückgang zu erwarten, weil in den kommenden Jahren viele ARA mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe ausgerüstet werden. Spätestens bis in 20 Jahren sollte damit aus rund 70 Prozent des kommunalen Abwassers ein grosser Teil der Mikroverunreinigungen entfernt werden können.

### **Grundwasserschutz stärken**

Am stärksten belastet ist das Grundwasser durch Nitrat. Rückstände künstlicher und zum Teil langlebiger Substanzen treten insgesamt an mehr als der Hälfte aller Messstellen im Grundwasser auf. Im Sinne der Vorsorge müssen deshalb bewährte Massnahmen zur Reduktion der Verunreinigungen fortgesetzt bzw. ausgebaut werden. Um die Grundwasservorkommen konsequent zu schützen, muss die landwirtschaftliche Bewirtschaftung regional so angepasst werden, dass das Grundwasser nicht verunreinigt wird. Zudem müssen rechtlich verbindliche und richtig dimensionierte Grundwasserschutzzonen ausgeschieden werden, was bei etwa 40% der Trinkwasserfassungen in der Schweiz noch nicht der Fall ist. In etlichen der korrekt ausgeschiedenen Schutzzonen kommen darüber hinaus erhebliche Nutzungskonflikte vor, die Risiken für die Trinkwassernutzung mit sich bringen.

---

## 2 Einleitung

### Rohstoff Grundwasser

Grundwasser ist ein wichtiger einheimischer Rohstoff. Über 80 % des Trinkwassers in der Schweiz werden aus Grundwasser gewonnen. Dank seiner meist guten Qualität kann es zu rund 40 % ohne Aufbereitung direkt ins Trinkwassernetz eingespeist werden (Freiburghaus 2012). Grundwasser hat zudem einen bedeutenden Einfluss auf zahlreiche wertvolle Lebensräume.

### Steigender Nutzungsdruck

Die Nutzungsintensivierung in der Schweiz erhöht den Druck auf das Grundwasser durch die zunehmende Überbauung sowie durch den Eintrag von Fremdstoffen aus Landwirtschaft, Industrie, Gewerbe, Haushalten und Verkehr. Auch längst vergangene Nutzungen, die in Altlasten ihre Spuren hinterlassen haben, stellen eine Gefahr für das Grundwasser dar. Einmal dort hineingelangt, werden Schadstoffe kaum mehr abgebaut. Da sich das Sicker- und Grundwasser zudem oft sehr lange im Untergrund aufhält, kommt vorausschauenden, präventiven Massnahmen zum Schutz der Ressource besondere Bedeutung zu.

### Entscheidungsgrundlagen

Der Erhalt der Grundwasserressourcen, die Förderung einer nachhaltigen Bewirtschaftung und der integrale Schutz des Grundwassers sind zentrale Aufgaben des Bundesamts für Umwelt (BAFU). Die konkrete Bewirtschaftung des Grundwassers und die Umsetzung von Massnahmen zu dessen Schutz einschliesslich der Beseitigung bestehender Beeinträchtigungen liegen wiederum in der Zuständigkeit der Kantone. Damit zielgerichtete Massnahmen entwickelt werden können, müssen die entscheidenden Informationen erhoben, Zusammenhänge und Einflussgrössen verstanden und Defizite bzw. Handlungsfelder identifiziert werden (Kap. 17). Diese Grundlagen erarbeitet die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA.

### Menge und Qualität des Grundwassers

NAQUA liefert landesweite Analysen zur Grundwasser-Quantität, d.h. zur Grundwassermenge anhand von Grundwasserständen und Quellabflüssen (Kap. 5), sowie zur Grundwasser-Qualität. Neben der Grundwasser-

temperatur (Kap. 7) umfasst diese sowohl natürliche Wasserinhaltsstoffe (Kap. 6, Kap. 8, Kap. 9) als auch Fremdstoffe wie Nitrat (Kap. 10), Pflanzenschutzmittel (Kap. 11), verschiedene (insbesondere halogenierte) Kohlenwasserstoffe (Kap. 12) und Abwasserindikatoren (Kap. 13). Weitere chemische Spurenstoffe (Kap. 14, Kap. 15) und biologische Parameter (Kap. 16) werden räumlich und zeitlich befristet im Rahmen von Pilotstudien erfasst.

### Zeitraum Reporting

Der vorliegende Bericht zu Zustand und Entwicklung der Grundwasserressourcen schliesst an die beiden vorherigen Berichte (BUWAL/BWG 2004, BAFU 2009a) an und fokussiert auf die Jahre ab 2007. Ausgewertet wurden die bei der Erarbeitung des Berichts vorliegenden validierten Daten. Zu Grundwasser-Quantität, Grundwassertemperatur und natürlichen Wasserinhaltsstoffen lagen validierte Daten bis 2016 vor, zu Fremdstoffen bis 2014 (Anh. 1). Aktuelle Daten sind auf der BAFU-Website ([www.bafu.admin.ch/grundwasser](http://www.bafu.admin.ch/grundwasser)) verfügbar. Seit dem Start von NAQUA im Jahr 2002 stehen somit nun landesweite Datenreihen zur Grundwasser-Quantität und -Qualität über einen Zeitraum von bis zu 15 Jahren zur Verfügung, anhand derer sich z. T. signifikante Entwicklungen ablesen lassen.

## 3 Nationale Grundwasserbeobachtung

### 3.1 Zielsetzung

#### Landesweites Bild

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA liefert ein landesweites Bild des Grundwassers in der Schweiz, sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht. NAQUA hat zum Ziel,

- den Zustand und die Entwicklung der Grundwasser-Quantität und -Qualität auf Landesebene zu dokumentieren;
- unerwünschte Entwicklungen bzw. das Auftreten problematischer Substanzen frühzeitig zu erkennen und gezielt zu verfolgen;
- die Wirksamkeit bereits ergriffener Massnahmen zum Schutz des Grundwassers zu prüfen und die Notwendigkeit zusätzlicher Massnahmen aufzuzeigen sowie
- die wichtigsten Grundwasservorkommen der Schweiz zu charakterisieren.

#### Grundlagen Grundwasserschutz und Reporting

NAQUA bildet eine wichtige Grundlage für den gesamtschweizerisch koordinierten Schutz der natürlichen Ressource Grundwasser und dient damit letztlich dem Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Stoffen und Organismen. Die erhobenen Daten fliessen in die kantonale, nationale und internationale Umweltberichterstattung ein.

#### Gesetzlicher Auftrag

Gemäss Bundesverfassung (BV) sind die Grundwasserressourcen nachhaltig zu bewirtschaften und zu schützen (Art. 76 BV). Um dies zu ermöglichen, erhebt der Bund die notwendigen statistischen Daten zu Zustand und Entwicklung der Grundwasservorkommen (Art. 65 BV). Er ist zuständig für die Erhebungen von gesamtschweizerischem Interesse zu den hydrologischen Verhältnissen und zur Wasserqualität der unterirdischen Gewässer (Art. 57 Gewässerschutzgesetz, GSchG). Die Kantone führen darüber hinaus Erhebungen durch, die für ihre Vollzugsaufgaben erforderlich sind, und leiten die entsprechenden Ergebnisse an die Bundesbehörden weiter (Art. 58 GSchG). Bund und Kantone informieren regelmässig über

den Zustand der Gewässer und den Erfolg der ergriffenen Schutzmassnahmen (Art. 50 GSchG).

### 3.2 Organisation

#### Zusammenarbeit Bund und Kantone

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA wird vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in enger Zusammenarbeit mit den Kantonen betrieben. Eine Zusammenstellung der kantonalen Fachstellen und der Institutionen, die in NAQUA involviert sind, befindet sich in Anhang 2. Alle Daten, die Bund und Kantone im Rahmen von NAQUA erheben, werden vom BAFU in einer zentralen Datenbank verwaltet und kantonsübergreifend ausgewertet.

#### Daten landesweit homogen und langfristig stabil

Die Koordination der Grundwasserbeobachtung zwischen Bund und Kantonen im Rahmen von NAQUA gewährleistet, dass die Daten landesweit homogen erhoben werden, schweizweit vergleichbar sind und langfristig lückenlos und mit gleichbleibend hoher Qualität zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht zuverlässige und aussagekräftige Schlussfolgerungen über Zustand und Entwicklung der Grundwasserressourcen der Schweiz.

#### Begleitgruppen

Die Arbeitsgruppe «Parameter NAQUA» berät die Nationale Grundwasserbeobachtung fachlich und strategisch bei der Auswahl und Weiterentwicklung der analysierten Parameter, insbesondere im Bereich Grundwasser-Qualität. Analog unterstützt die Expertengruppe «Isotope im Wasserkreislauf» NAQUA beim Monitoring der stabilen Wasserisotope. Die Arbeitsgruppen setzen sich zusammen aus Vertreterinnen und Vertretern verschiedener Bundesämter, kantonaler Fachstellen, der Trinkwasserversorger, der Forschung und der Industrie.

### 3.3 Module

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA besteht aus den vier Modulen QUANT, TREND, SPEZ und ISOT. Im Modul QUANT wird die Grundwasser-Quantität, in den beiden Modulen TREND und SPEZ die Grundwasser-Quantität beobachtet. Das Modul ISOT dient der Beobachtung der Wasserisotope im Wasserkreislauf. Zusätzlich zum Langzeitmonitoring werden bei Bedarf zeitlich befristete Pilotstudien durchgeführt.

#### Messstellen

Die NAQUA-Messstellen decken die verschiedenen Landesregionen und Naturräume, die wichtigsten Grundwasserleitertypen sowie die unterschiedlichen hydrogeo-

logischen Verhältnisse und Bodennutzungen ab (Tab. 3.1). Die Auswahl der Messstellen der einzelnen Module und deren Repräsentativität sind in den vorherigen Berichten (BUWAL/BWG 2004, BAFU 2009a) im Detail beschrieben. Bei einem Grossteil der Messstellen der Module TREND und SPEZ handelt es sich um Trinkwasserfassungen. Die meisten Messstellen der Module QUANT, TREND und SPEZ liegen zudem im Gewässerschutzbereich A<sub>U</sub>, d. h. in für die Trinkwasserversorgung nutzbaren Grundwasservorkommen. Um sicherzustellen, dass die im Rahmen von NAQUA erhobenen Daten aussagekräftig und langfristig vergleichbar sind, sollen die Messnetze möglichst unverändert bleiben. Messstellen, die nicht mehr zugänglich sind oder überbaut wurden, werden in Abstimmung mit den kantonalen Fachstellen adäquat ersetzt.

Tabelle 3.1

#### Messstellen der einzelnen Module nach Messstellenart, Grundwasserleitertyp, Hauptbodennutzung und Wassernutzung

Stand 2016. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle.

| Kriterium                       | Eigenschaft                          | Messstellen [Anzahl] |             |            |            |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------|------------|------------|
|                                 |                                      | Modul QUANT          | Modul TREND | Modul SPEZ | Modul ISOT |
| Messstellenart                  | Förderbrunnen                        | 15                   | 31          | 235        | –          |
|                                 | Piezometer                           | 35                   | 4           | 6          | –          |
|                                 | Quelle                               | 41                   | 15          | 254        | –          |
|                                 | Niederschlag                         | –                    | –           | –          | 13         |
|                                 | Fliessgewässer                       | –                    | –           | –          | 9          |
| Grundwasserleitertyp            | Lockergestein                        |                      |             |            |            |
|                                 | • Schotter                           | 54                   | 36          | 254        | –          |
|                                 | • Moräne                             | 2                    | 0           | 38         | –          |
|                                 | • Schuttbildungen                    | 1                    | 1           | 41         | –          |
|                                 | Festgestein                          |                      |             |            |            |
|                                 | • Karst                              | 17                   | 7           | 95         | –          |
|                                 | • Kristalline Gesteine               | 8                    | 2           | 16         | –          |
| • Klastische Gesteine           | 9                                    | 4                    | 51          | –          |            |
| Hauptbodennutzung Einzugsgebiet | Siedlung & Verkehr                   | 10                   | 11          | 85         | –          |
|                                 | Ackerbau                             | 42                   | 20          | 77         | –          |
|                                 | Obst- & Rebbau                       | –                    | 1           | 5          | –          |
|                                 | Gras- & Viehwirtschaft               | 11                   | 7           | 138        | –          |
|                                 | Sommerungsweiden                     | 3                    | 2           | 20         | –          |
|                                 | Wald                                 | 19                   | 7           | 151        | –          |
|                                 | Unproduktive Gebiete                 | 6                    | 2           | 13         | –          |
|                                 | Nicht zugeordnet                     | –                    | –           | 6          | –          |
| Wassernutzung                   | Trinkwassergewinnung                 | 46                   | 37          | 443        | –          |
|                                 | Gewässerschutzbereich A <sub>U</sub> | 81                   | 46          | 467        | –          |
| <b>Total</b>                    |                                      | <b>91</b>            | <b>50</b>   | <b>495</b> | <b>22</b>  |

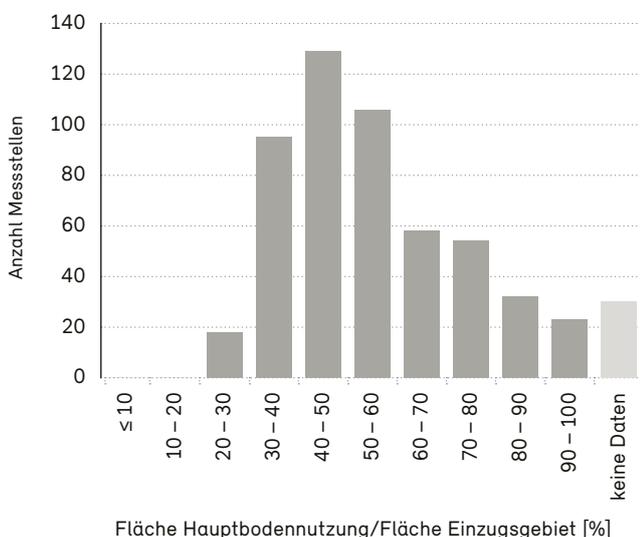
### Bodennutzung

Die Bodennutzung im Einzugsgebiet der einzelnen Messstellen wurde anhand von Luftbildern, der Arealstatistik sowie der landwirtschaftlichen Betriebszählung ermittelt. Aufgrund der für die Schweiz typischen kleinräumigen Struktur umfasst das Einzugsgebiet der Messstellen meistens mehrere verschiedene Bodennutzungen. Die sogenannte Hauptbodennutzung entspricht der Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle. Der Anteil der Hauptbodennutzung an der gesamten Fläche des Einzugsgebietes liegt typischerweise zwischen 35 und 80 % (Abb. 3.1). Die Hauptbodennutzung umfasst nur selten das gesamte Einzugsgebiet und kann in Einzelfällen auch nur 25 % der Fläche bedecken. Das Grundwasser an einer Messstelle kann daher auch durch andere Bodennutzungen mit einem kleineren Flächenanteil massgeblich beeinflusst sein. Der Anteil von Oberflächenwasserinfiltrat wurde bei der flächenmässigen Bestimmung der Bodennutzung nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass die Hauptbodennutzung nur für den aus der Direktversickerung von Niederschlägen neugebildeten Grundwasseranteil gilt.

Abbildung 3.1

Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet der einzelnen Messstellen in Relation zur Fläche des gesamten Einzugsgebietes

Messstellen der Module TREND und SPEZ



### 3.3.1 Modul QUANT (Quantität)

#### Grundwasserstände und Quellabflüsse

Im Modul QUANT wird die Grundwasser-Quantität in charakteristischen Grundwasservorkommen der Schweiz anhand der Grundwasserstände und Quellabflüsse langfristig erfasst. Die Erhebungen erlauben eine Einschätzung des Zustandes und der Entwicklung der Grundwasser-Quantität auf Landesebene sowie allfälliger Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen. Aussagen zur lokalen und regionalen Grundwasserverfügbarkeit – insbesondere für die Trinkwasserversorgung – lassen sich daraus dagegen nicht ableiten.

Gleichzeitig werden an den Messstellen des Moduls QUANT auch die Grundwassertemperatur, die elektrische Leitfähigkeit und z. T. die Trübung kontinuierlich aufgezeichnet.

#### Modul weiterhin im Aufbau

Der Aufbau des Moduls QUANT mit einer Zielgrösse von 100 Messstellen ist weiterhin im Gang (Abb. 3.2). Seit 2007 wurden weitere 19 Quellen (Karst: 6, kristalline Kluftgesteine: 5, klastische Kluftgesteine: 4, Lockergesteine: 4) sowie je 1 Förderbrunnen und 1 Piezometer in Lockergesteinen in das Modul integriert. Ende 2016 umfasste das Modul insgesamt 91 Messstellen. Davon sind 30 Messstellen gleichzeitig auch Teil des Moduls TREND und 17 Messstellen Teil des Moduls SPEZ.

#### Datenrückfassung

Ältere Daten der Messstellen, die vor dem Beginn von NAQUA von den einzelnen Fassungseigentümern erhoben worden waren und lediglich in Papierformat (Limniogramme) vorlagen, wurden in den letzten Jahren gezielt akquiriert und in ein digitales Format überführt. Von rund 40 Messstellen liegen somit kontinuierliche digitale Datenreihen zur Grundwasser-Quantität über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren vor.

### 3.3.2 Module TREND und SPEZ (Qualität)

#### Modul TREND – Fokus Prozessverständnis

Das Modul TREND dient dem Verständnis der natürlichen Prozesse und der menschlichen Einflussfaktoren, welche die kurz- und langfristige Entwicklung der Grundwasser-Qualität bestimmen. Es umfasst 50 detailliert charakterisierte Messstellen in Grundwasservorkommen, die für die Schweiz typisch sind (Abb. 3.3). Das Modul wird seit 1997 zentral durch den Bund betrieben und ist seit 2005 vollumfänglich operativ. Untersucht werden anorganische Hauptinhaltsstoffe des Wassers, wie z. B. Calcium, Magnesium bzw. Hydrogenkarbonat, Chlorid und Sulfat sowie anorganische Spurenstoffe. Weiterhin werden die regelmässig entnommenen Stichproben analog zum Modul SPEZ (s. u.) auch auf Nitrat und verschiedene organische Fremdstoffe untersucht. Im Modul TREND werden zudem der Grundwasserstand bzw. der Quellabfluss, die elektrische Leitfähigkeit, die Grundwassertemperatur sowie z. T. die Trübung kontinuierlich aufgezeichnet.

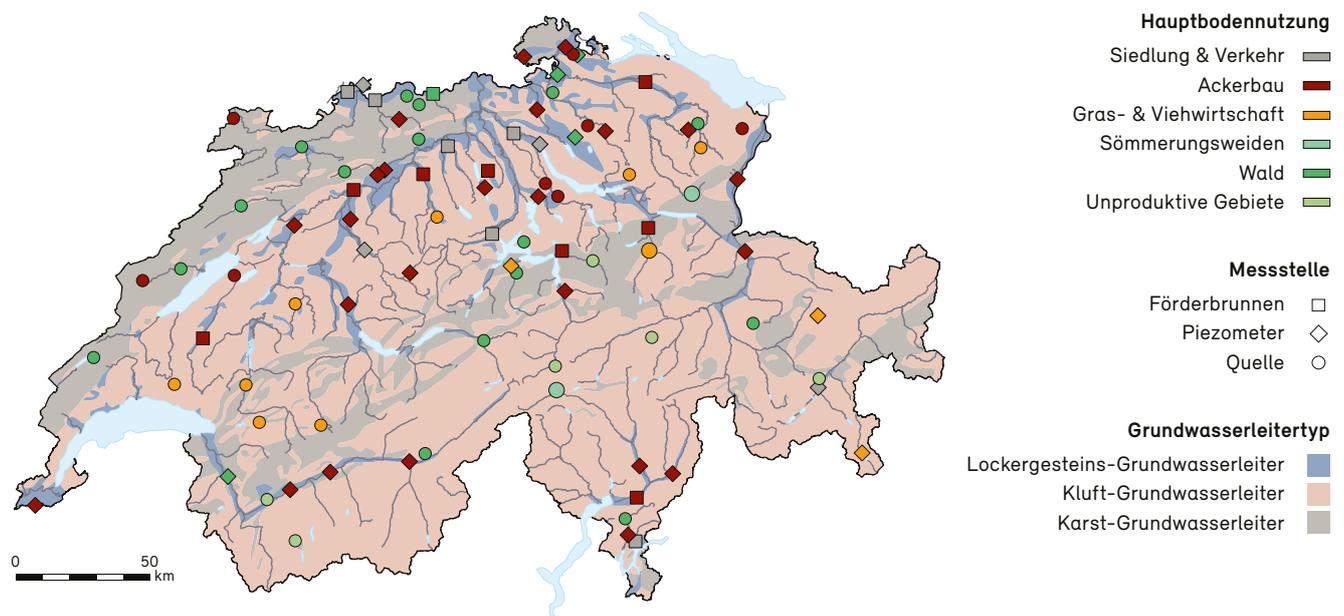
#### Modul SPEZ – Fokus Schadstoffe

Das Modul SPEZ bildet die Grundlage für die landesweiten statistischen Analysen zum Auftreten von Fremdstoffen im Grundwasser der Schweiz sowie zu deren langfristigen Entwicklung. Es fokussiert auf Substanzen, die aus Landwirtschaft, Industrie, Gewerbe, Haushalten und/oder Verkehr stammen. Untersucht werden Nitrat, Rückstände von Pflanzenschutzmitteln, Abwasserindikatoren sowie weitere organische Spurenstoffe, wie z. B. halogenierte Kohlenwasserstoffe. Das Modul SPEZ umfasst knapp 500 über die Schweiz verteilte Messstellen (Abb. 3.3) und wird seit 2002 vom BAFU in enger Zusammenarbeit mit den kantonalen Fachstellen betrieben. Die Messstellen decken die verschiedenen Landesregionen und Naturräume, die unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnisse und insbesondere die potenziellen Schadstoffquellen ab, die über die Bodennutzung im Einzugsgebiet der Messstellen erfasst werden.

Abbildung 3.2

Messstellen des Moduls QUANT zur Beobachtung der Grundwasser-Quantität mit Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet sowie Grundwasserleitertyp

Stand 2016.



### Rund 70 Substanzen im Langzeitmonitoring

Die Substanzen, die im Langzeitmonitoring der Module TREND und SPEZ regelmässig, d. h. ein- bis viermal pro Jahr, analysiert werden, werden jedes Jahr überprüft und gegebenenfalls angepasst. Dies erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse des Vorjahres und aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie der Empfehlungen der Arbeitsgruppe «Parameter NAQUA». Die Zahl der Substanzen, für die landesweit Daten vorliegen, hat sich aufgrund verbesserter analytischer Möglichkeiten von knapp 20 Substanzen im Jahr 2002 auf mittlerweile rund 70 Substanzen quasi verdreifacht.

### Pilotstudien

Weitere für das Grundwasser potenziell relevante Sachverhalte werden im Rahmen zeitlich befristeter Pilotstudien untersucht. Dabei arbeitet das BAFU häufig mit anderen Bundesämtern und Forschungsinstitutionen zusammen. Seit 2007 wurden Pilotstudien mit folgenden Schwerpunkten realisiert:

### Organische Spurenstoffe

Perfluorierte Chemikalien (2007/2008, Kap. 14), Screening Mikroverunreinigungen (2007/2008, Kap. 15), Dynamik Pflanzenschutzmittel (2010/2011, Kap. 11), 1,4-Dioxan (2011/2012, 2015, Kap. 12), Glyphosat (2016/2017, Kap. 11)

### Anorganische Spurenstoffe

Antimon (2006/2007, Kap. 9), Wasserisotope im Grundwasser (2006 bis 2013, Kap. 6); Spurenelemente (2007/2008, Kap. 9), Natürliche Radioaktivität und Spurenelemente (2012, Kap. 9)

### Mikrobiologie und Fauna

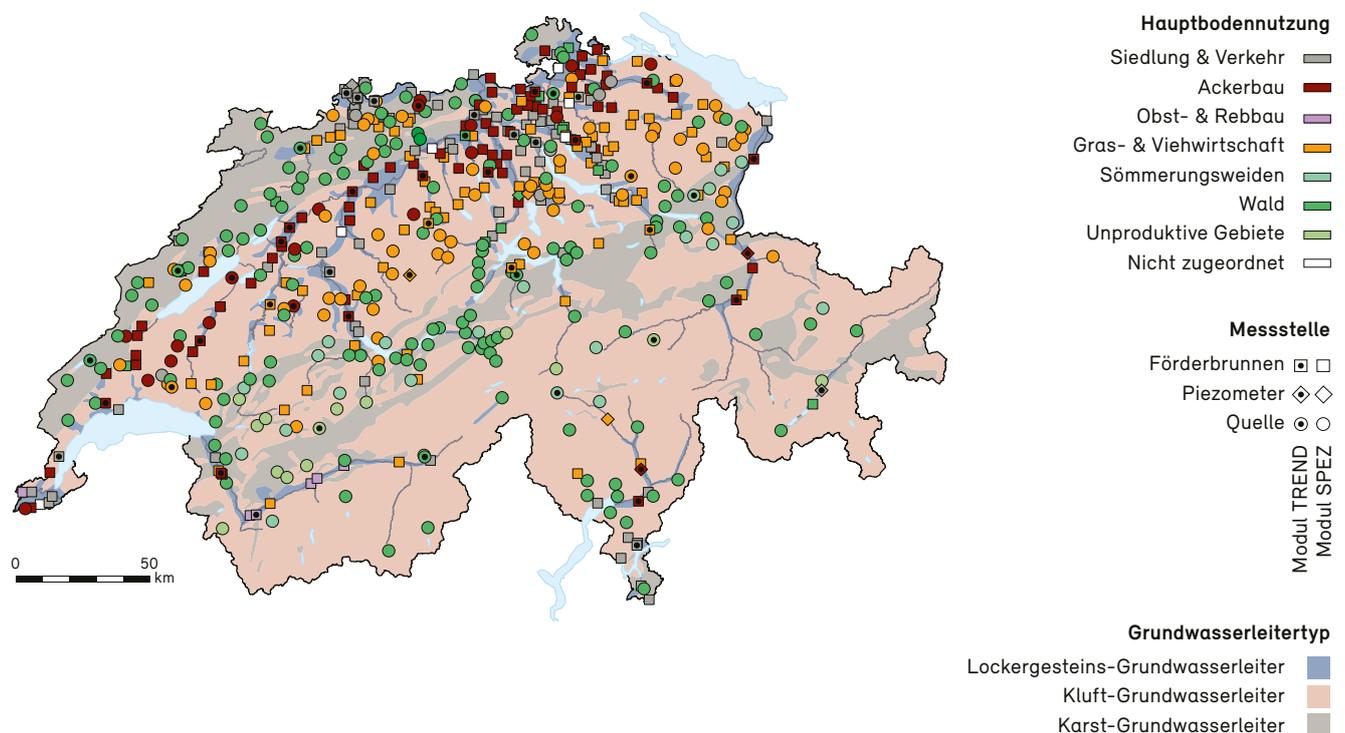
Mikroorganismen (2009/2010, Kap. 16), Microbial Source Tracking (2012/2013, Kap. 16), Mikrobielle Gemeinschaften (2012/2013), Grundwasserfauna (2013/2014, Kap. 16)

### Weitere Substanzen

Neben den Substanzen des Langzeitmonitorings sowie den verschiedenen chemischen und biologischen Parametern der Pilotstudien werden auch die Substanzen

Abbildung 3.3

Messstellen der Module TREND und SPEZ zur Beobachtung der Grundwasser-Qualität mit Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet sowie Grundwasserleitertyp  
Stand 2016.



erfasst, welche die Kantone an den NAQUA-Messstellen zusätzlich analysieren und an das BAFU übermitteln. Insgesamt liegen damit in der Datenbank Analysen von rund 1000 verschiedenen Substanzen vor.

### 3.3.3 Modul ISOT (Wasserisotope)

#### Referenzdaten

Das Modul ISOT dient der Beobachtung der Wasserisotope im Wasserkreislauf und liefert Referenzdaten für hydrogeologische Untersuchungen, wie z. B. zur Herkunft und Neubildung des Grundwassers. Es ermöglicht zudem die Dokumentation langfristiger Auswirkungen der Klimaänderung auf die Isotopensignatur in Niederschlag und Fließgewässern. Das Modul ISOT umfasst insgesamt 13 Niederschlags- und 9 Fließgewässer-Messstellen (Abb. 3.4), nachdem 2013 die beiden Fließgewässer-Messstellen Rhein – Weil und Rhône – Chancy in das Modul aufgenommen wurden. Bis ins Jahr 2009 gehörten auch 3 Grundwasser-Messstellen zum Modul ISOT.

#### Messstellen Niederschlag

Die 13 Niederschlags-Messstellen sind über die verschiedenen Naturräume der Schweiz verteilt. Sie decken

zudem mehrere Höhenstufen entlang eines NW/SE-Profiles von Bern (541 m.ü.M.) über den Grimselpass (1950 m.ü.M.) nach Locarno (379 m.ü.M.) ab. Die Messstellen liegen in der Nähe von meteorologischen Stationen von MeteoSchweiz, an denen weitere Parameter wie Lufttemperatur und Dampfdruck bestimmt werden.

#### Messstellen Fließgewässer

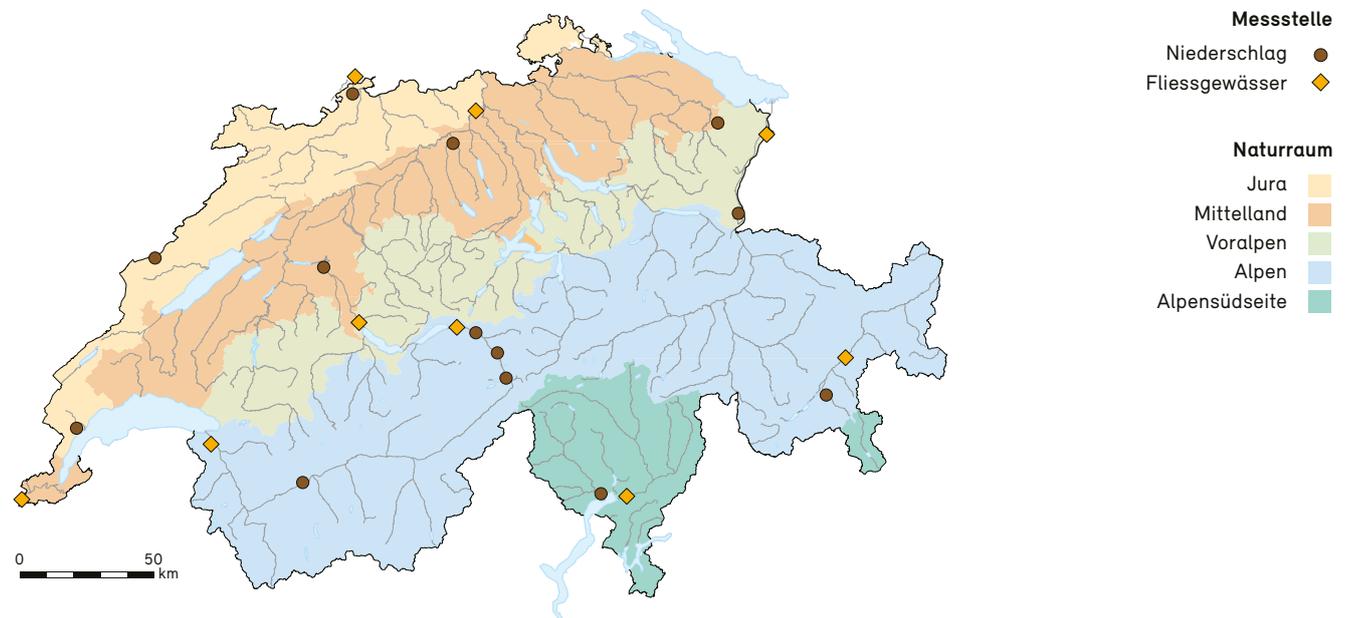
Die 9 Fließgewässer-Messstellen liegen an den grossen Flüssen, die in den Alpen entspringen (Aare, Inn, Rhein, Rhône und Ticino). Sie befinden sich in der Regel an der jeweiligen Mündung in die grossen Seen oder an der Grenze zu den Nachbarländern. Gleichzeitig sind sie auch Messstellen der Nationalen Daueruntersuchung der Fließgewässer NADUF.

#### Messstellen ausgewählte Grundwasservorkommen

Die 3 Grundwasser-Messstellen waren seinerzeit ausgewählt worden, um exemplarisch zu beobachten, wie sich das Grundwasser als Integrator der Isotopensignatur aus dem Niederschlag verhält. Da sie ausschliesslich lokale Aussagekraft besitzen, wurden sie nach Abschluss der Studien Ende 2009 aufgehoben.

Abbildung 3.4

Messstellen des Moduls ISOT zur Beobachtung der Isotope in Niederschlag und Fließgewässern sowie Naturräume  
Stand 2016.



### Parameter

An allen Messstellen des Moduls ISOT werden seit 1992 monatlich die stabilen Wasserisotope *Sauerstoff-18* und *Deuterium* erfasst. Von den Niederschlags-Messstellen entlang des NW/SE-Profiles stehen zudem Daten aus den Jahren 1980 bis 1991 zur Verfügung, welche von der Universität Bern erhoben wurden. Die ebenfalls 1992 begonnenen *Tritium*-Analysen an den ISOT-Messstellen wurden Ende 2009 eingestellt, da die *Tritium*-Werte nach Rückgang der Atomwaffenversuche wieder weitgehend auf die natürlichen Hintergrundwerte gesunken sind; somit können sie nicht mehr für die Bestimmung des Wasseralters verwendet werden. Je nach Messstellentyp werden an den ISOT-Messstellen weitere Parameter wie Dampfdruck, Lufttemperatur, Wasserstand bzw. Abfluss, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit gemessen.

## 3.4 Qualitätssicherung

### Validierung Daten

Im Rahmen der Qualitätssicherung werden alle NAQUA-Daten in einem mehrstufigen Prozess evaluiert und auf ihre Plausibilität geprüft. Auffällige Analysewerte werden im Detail mit den beteiligten Labors abgeklärt. Publiziert werden ausschliesslich validierte Daten.

### Ringversuche und Vergleichsanalysen

Die mit den chemischen Analysen beauftragten Privatlabors sind akkreditiert und nehmen regelmässig an internationalen Ringversuchen teil. Darüber hinaus finden zweimal pro Jahr Vergleichsanalysen zwischen diesen Labors an jeweils 10 NAQUA-Messstellen statt. Sie erlauben es, systematische Abweichungen bei den Analytikresultaten frühzeitig zu erkennen und zu beheben.

### Qualitätsstandards

Um zu gewährleisten, dass alle Daten vergleichbar sind, legt das BAFU für die Substanzen des Langzeitmonitorings maximale Bestimmungsgrenzen fest, die von allen beteiligten Labors eingehalten werden müssen. Diese Bestimmungsgrenzen werden so gewählt, dass sie dem Stand der Technik entsprechen und deutlich unterhalb der numerischen Anforderungen der Gewässerschutzverordnung (GSchV) liegen.

## 3.5 Information und Kommunikation

### Print- und Online-Publikationen

Zentrales Element der Berichterstattung über die Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung sind das regelmässige Reporting im Internet ([www.bafu.admin.ch/grundwasser](http://www.bafu.admin.ch/grundwasser)) sowie der NAQUA-Bericht, von dem bisher zwei Ausgaben (BUWAL/BWG 2004, BAFU 2009a) erschienen sind. Weiterhin informiert das Grundwasserbulletin regelmässig über die aktuellen Grundwasserstände und Quellabflüsse sowie deren Entwicklung. Daten einzelner Messstellen zur Grundwasser-Quantität und zur Grundwassertemperatur stehen zudem online ([www.hydrodaten.admin.ch](http://www.hydrodaten.admin.ch)) zur Verfügung. Des Weiteren werden ausgewählte Daten und Analysen regelmässig in Fachartikeln, im Hydrologischen Jahrbuch (z. B. BAFU 2018a), im Umweltbericht Schweiz (z. B. Bundesrat 2018), in der Taschenstatistik Umwelt (z. B. BFS 2018), im Agrarbericht (z. B. BLW 2016a) sowie in den Berichten zuhanden der Weltgesundheitsorganisation WHO (z. B. BLV/BAFU 2016), der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD (z. B. OECD 2013) und der Vereinten Nationen UNO (z. B. CH 2016) publiziert.

### Indikatoren

NAQUA-Daten und -Analysen werden zudem, je nach Kontext, zu spezifischen Indikatoren aggregiert. Neben verschiedenen Indikatoren der Umweltbeobachtung des BAFU leistet NAQUA so auch einen Beitrag zu den Nachhaltigkeitsindikatoren von Cercle Indicateurs (z. B. ARE 2015) und den Agrarumweltindikatoren des Bundesamts für Landwirtschaft (z. B. BLW 2014).

### Datenlieferungen

Jährliche Datenlieferungen erfolgen zuhanden der Europäischen Umweltagentur EUA (z. B. EUA 2018), der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA (Global Network of Isotopes in Precipitation [GNIP] und Global Network of Isotopes in Rivers [GNIR]) sowie des International Groundwater Resources Assessment Centre IGRAC (Global Groundwater Network [GGMN]).

## 4 Grundwasser in der Schweiz

### 4.1 Grundwasserressourcen

#### Komponente des Wasserkreislaufs

Grundwasser ist Teil des natürlichen Wasserkreislaufs. Regen- und Schmelzwasser, welches nicht verdunstet oder an der Oberfläche abfließt, versickert und führt zur Neubildung von Grundwasser. Zudem entsteht es durch Infiltration von Flusswasser. Dabei können Grundwasserleiter im Flachland mitunter durch die hohen Niederschlagsmengen in den alpinen Einzugsgebieten der grossen Flüsse beeinflusst sein. Erreicht das versickerte Wasser den wassergesättigten Untergrund, fließt es als Grundwasser bis zum natürlichen Austrittspunkt an Quellen oder hin zu künstlichen Entnahmestellen (Förderbrunnen); zudem kann es aus den Grundwasserleitern in Oberflächengewässer übertreten. Diese Exfiltration trägt entscheidend zum Basisabfluss der Fließgewässer bei und ist essenziell für den Erhalt grundwasserabhängiger Ökosysteme.

#### 150 Milliarden m<sup>3</sup> vorhanden

Das gesamte im Untergrund der Schweiz vorhandene Grundwasser hat ein Volumen von etwa 150 Milliarden m<sup>3</sup> (Sinreich et al. 2012). Das Grundwasservolumen ist damit in etwa so gross wie das Wasservolumen aller Schweizer Seen zusammen. Unter natürlichen Bedingungen tritt im Mittel genauso viel Grundwasser an Quellen oder in Oberflächengewässern aus, wie durch Niederschlag und Flussinfiltration neu gebildet wird, d. h. das Grundwasservolumen bleibt langfristig konstant. Allerdings kann es sich verringern, wenn ein Grundwasservorkommen übernutzt wird, also wenn die Entnahme nicht in nachhaltiger Weise erfolgt.

#### 18 Milliarden m<sup>3</sup> pro Jahr nachhaltig nutzbar

Das nutzbare Grundwasserdargebot ist die jährliche Wassermenge, die auf nachhaltige Weise – d. h. ohne dauerhafte Absenkung des Grundwasserspiegels oder sonstige nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt – dem Untergrund entnommen werden kann. Es basiert auf der natürlichen Grundwasserneubildung und dem Anteil an Oberflächenwasser, welcher in den ergiebigen Grundwasservorkommen der Flusstäler durch die Wirkung

flussnaher Förderbrunnen zusätzlich infiltrieren kann. In der Schweiz beläuft sich das theoretisch nachhaltig nutzbare Grundwasserdargebot auf jährlich etwa 18 Milliarden m<sup>3</sup>, also gut 10 % des gesamten Grundwasservolumens (Sinreich et al. 2012). Veränderungen bei der Grundwasserneubildung, z. B. infolge der Klimaänderung, dürften diese Zahlen mittel- bis langfristig beeinflussen.

#### Nutzbarkeit vielerorts eingeschränkt

Berücksichtigt man allerdings nur die Standorte, an denen eine rechtskonforme Grundwassernutzung möglich ist (Ausscheidung von Grundwasserschutzonen ohne wesentliche Nutzungskonflikte, Umsetzung der erforderlichen Nutzungseinschränkungen), sowie die Grundwasservorkommen, die auch qualitativ eine Trinkwassernutzung erlauben, reduziert sich die effektiv nutzbare Grundwassermenge erheblich. Insbesondere in den ergiebigen Lockergesteins-Grundwasserleitern im Mittelland und in den Alpentälern ist die Erschliessung neuer Standorte für die Trinkwassernutzung aufgrund der hohen Nutzungsintensität und Überbauung vielerorts sehr stark erschwert.

#### 1,3 Milliarden m<sup>3</sup> für Trinkwasser pro Jahr

Aus Grundwasser werden jährlich etwa 1,3 Milliarden m<sup>3</sup> Trinkwasser gewonnen, was ca. 80 % der gesamten öffentlichen Trinkwasserversorgung in der Schweiz ausmacht (Freiburghaus 2009). Dies entspricht zwar nur etwa 7 % der Wassermenge, welche entsprechend dem theoretisch nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebot pro Jahr entnommen werden könnte. Aufgrund der beschriebenen intensiven Flächennutzung weiter Teile der Schweiz ist der Anteil der genutzten an der effektiv nutzbaren Wassermenge jedoch erheblich grösser.

### 4.2 Grundwasserleiter

#### 3 Grundwasserleitertypen

In der Schweiz kommen verschiedene Typen von Grundwasserleitern vor. Entsprechend ihrer Geologie unterscheidet man 3 Haupttypen, deren hydrogeologische Eigenschaften (Fließgeschwindigkeit, Empfindlichkeit

gegenüber dem Eintrag von Fremdstoffen) deutlich voneinander abweichen: Lockergesteins-Grundwasserleiter, Kluft-Grundwasserleiter und Karst-Grundwasserleiter (Abb. 4.1).

### Lockergesteins-Grundwasserleiter

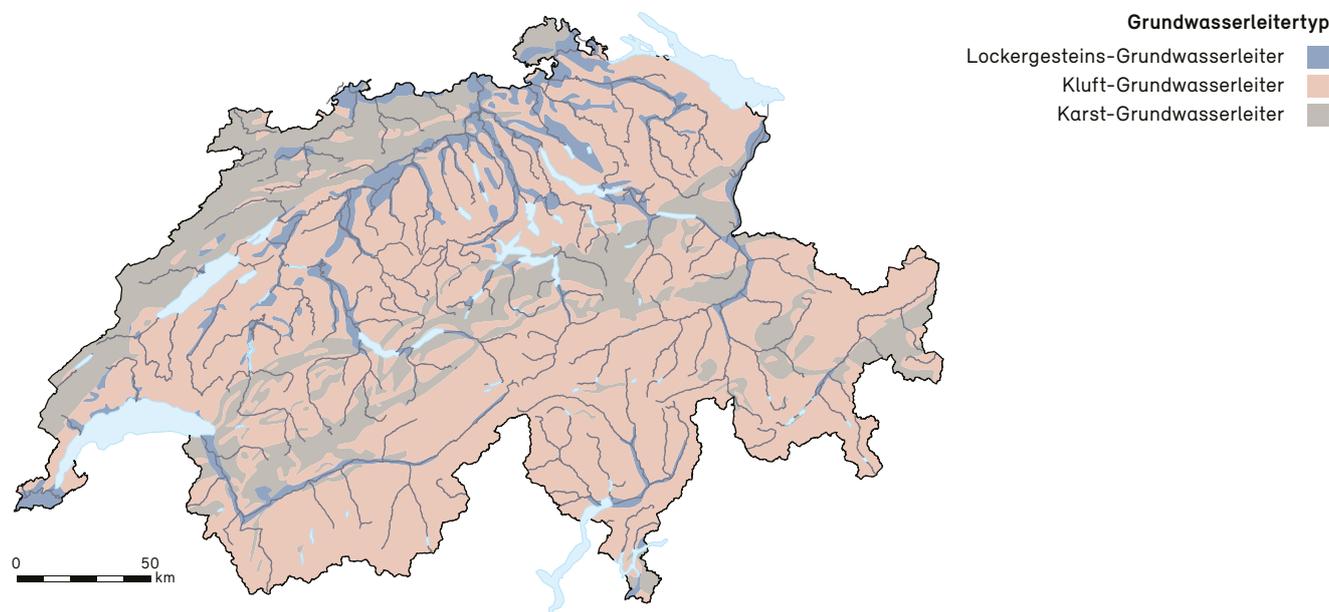
In Lockergesteins-Grundwasserleitern fliesst das Wasser langsam und gleichmässig durch die Poren von z. B. Sanden und Kiesen und erreicht dabei selten Fliessgeschwindigkeiten von mehr als einigen Metern pro Tag. Bedeutende Vorkommen erstrecken sich in der Schweiz vor allem entlang der grossen Flüsse des Mittellands sowie der Alpentäler und nehmen etwa 6 % der Landesfläche ein (BAFU 2004). Wenn Fluss- und Grundwasser in direktem hydraulischem Kontakt stehen, erfolgt ein signifikanter Anteil der Grundwasserneubildung durch die Infiltration von Flusswasser. Obwohl in der Schweiz Grundwasservorkommen in Lockergesteinen meist nahe der Oberfläche liegen, bieten Boden und andere natürliche Deckschichten im Allgemeinen einen guten Schutz vor dem Eintrag von Fremdstoffen. Mit ihrer grossen Ergiebigkeit stellen Lockergesteins-Grundwasserleiter trotz der vergleichsweise geringen räumlichen Verbreitung mit ca. 36 % einen wesentlichen Anteil der öffentlichen Trinkwasserversorgung der Schweiz sicher (Sprefico und

Weingartner 2005). Diese Vorkommen sind in der Regel durch Förderbrunnen erschlossen, welche in Flussnähe mit einem wesentlichen Anteil an Uferfiltrat oft besonders ergiebig sind. Falls die Distanz zum Fliessgewässer zu gering ist, können ufernahe Fassungen jedoch für mikrobiologische Verunreinigungen insbesondere bei Hochwasser anfällig sein.

### Kluft-Grundwasserleiter

In weiten Teilen des Mittellands und der Alpen besteht der Untergrund aus geklüfteten Festgesteinen, die insgesamt 78 % der Landesfläche einnehmen und zum Teil von geringmächtigen Lockergesteinen bedeckt sind. Dabei treten unterschiedliche Formen von Kluft-Grundwasserleitern auf. In kristallinen Kluft-Grundwasserleitern (z. B. Granite und Gneise), die v. a. in den Alpen und auf der Alpensüdseite vorkommen, fliesst das Wasser entlang eines Netzes von Klüften und grösseren geologischen Störungen. In klastischen Kluft-Grundwasserleitern (z. B. Sandsteine und Konglomerate) kann zusätzlich ein Teil des Wassers durch die Poren des Gesteins fliesen, wie z. B. in den Molasse-Sandsteinen des Mittellands. Die Fliessgeschwindigkeiten in Kluft-Grundwasserleitern sind dementsprechend variabel und können mehrere 100m pro Tag erreichen. Im Gegensatz zu vielen

Abbildung 4.1  
Grundwasserleitertypen



---

klastischen Kluft-Grundwasserleitern in tieferen Lagen fehlt bei kristallinen Kluft-Grundwasserleitern häufig eine ausreichende natürliche Schutzschicht, da sie sich meist in alpinen Gebieten mit schlecht ausgebildeten Böden befinden. Grundwasser aus Kluftgesteinen deckt etwa 30 % des Trinkwasserbedarfs der Schweiz und wird hauptsächlich an Quelfassungen gewonnen.

### **Karst-Grundwasserleiter**

Karst-Grundwasserleiter sind in den Alpen und im Jura verbreitet und machen rund 16% der Landesfläche aus. Durch Lösungsprozesse entstehen in Kalksteinen Hohlräume unterschiedlicher Grösse (Verkarstung), z. T. auch Höhlen, in denen das Grundwasser sehr schnell – bis zu mehreren 100 m pro Stunde – fließen kann. Karst-Grundwasserleiter stehen zudem häufig hydraulisch direkt mit der Geländeoberfläche in Verbindung. Sie sind deshalb und wegen des oft fehlenden oder nur schwach ausgebildeten Bodens sehr empfindlich (vulnerabel) gegenüber dem Eintrag von Fremdstoffen, besonders von mikrobiologischen Verunreinigungen. Dabei spielen auch die hydrologischen Bedingungen, wie Niederschlagsereignisse und Schneeschmelze, eine wichtige Rolle. Karstquellen tragen mit etwa 18% zur Trinkwasserversorgung der Schweizer Bevölkerung bei.

# 5 Grundwasserstände und Quellabflüsse

## 5.1 Grundlagen

### Einflussfaktoren

Veränderungen der Grundwassermenge werden anhand von Grundwasserständen und Quellabflüssen erfasst. Deren Jahresgang wird bestimmt durch die zeitliche Entwicklung von Niederschlag, Lufttemperatur und Schneeschmelze, den Grad der hydraulischen Anbindung des Grundwassers an Fließgewässer und die hydrogeologischen Eigenschaften des jeweiligen Grundwasserleiters. Grundwassernutzung, Bodennutzung, Meliorationen, bauliche Eingriffe sowie Klimaänderung können ebenfalls Auswirkungen auf die Entwicklung von Grundwasserständen und Quellabflüssen haben. Infolge der oberflächennahen Lage der meisten Grundwasservorkommen der Schweiz wirken sich diese Einflüsse rasch, d. h. innert Tagen bis wenigen Monaten, auf die Grundwasserstände und Quellabflüsse aus.

### 3 Grundwasserregime

Grundwasserstände und Quellabflüsse zeigen in der Regel ein wiederkehrendes, jährliches Muster. In der Hydrogeologie wird es – in Anlehnung an den Begriff «Abflussregime» für Fließgewässer (BAFU 1992) – als «Grundwasserregime» bezeichnet. In der Schweiz werden 3 Grundwasserregime unterschieden: das pluviale, das pluvio-nivale und das nivo-glaziale Grundwasserregime. Das Grundwasserregime charakterisiert den langjährigen, mittleren Jahresgang sowohl von Grundwasserständen (Schürch et al. 2010) als auch von Quellabflüssen (Schürch et al. 2016).

#### Pluviales Grundwasserregime

Beim pluvialen Grundwasserregime handelt es sich um das standorttypische Regime der Naturräume Jura und Mittelland. Es zeichnet sich durch eine von örtlichen Niederschlägen geprägte Grundwasserneubildung aus, die vor allem im Winter und Frühling erfolgt. Daher treten hier die Maxima des Grundwasserstands bzw. des Quellabflusses generell in den Monaten Januar bis März und die Minima im Spätsommer von August bis September

auf. Bei grösseren Grundwasserflurabständen sind die Grundwasserneubildung und damit die Maxima und Minima der Grundwasserstände mehr oder weniger verzögert (Beispiel «Wilchingen, Klettgau» in Abb. 5.4).

#### Pluvio-nivales Grundwasserregime

Ein pluvio-nivales Grundwasserregime ist durch eine kombinierte Grundwasserneubildung aus Niederschlag und Schneeschmelze geprägt. Es handelt sich um das standorttypische Regime der Naturräume Voralpen und Alpensüdseite. Das Maximum der Grundwasserstände und Quellabflüsse tritt hier meist im März bzw. April im Zuge der Schneeschmelze und zusätzlicher Frühjahrsniederschläge auf; das Minimum liegt im Winter. Auf der Alpensüdseite setzt das Maximum später ein (Mai bzw. Juni) und kann durch ein zweites Maximum im Oktober ergänzt werden, beides aufgrund von häufigen Niederschlagsperioden (Südstaulagen) im Frühling und Herbst.

#### Nivo-glaziales Grundwasserregime

Das nivo-glaziale Grundwasserregime ist standorttypisch für den Naturraum Alpen. Hier fallen die Winterniederschläge grösstenteils als Schnee und tragen deshalb nicht unmittelbar zur Grundwasserneubildung bei. Somit weisen Grundwasserstände und Quellabflüsse mit nivo-glazialen Regime ihr Minimum zwischen Dezember und Februar auf. Das Maximum liegt infolge der Schnee- und Gletscherschmelze in mittleren und höheren Lagen zwischen Mai und Juli.

#### Importiertes Grundwasserregime

Liegt das Einzugsgebiet eines Grundwasser speisenden Fließgewässers in einem anderen Naturraum als der Grundwasserleiter selbst, weisen der Abfluss des Fließgewässers und die Grundwasserneubildung durch örtliche Niederschläge jeweils einen abweichenden langjährigen, mittleren Jahresgang auf. Wird durch Infiltration von Flusswasser dessen Abflussregime in den Grundwasserleiter übertragen und dabei das standorttypische Grundwasserregime überprägt, wird dies als «importiertes» Grundwasserregime bezeichnet. So importieren die gros-

sen Flüsse aus den Alpen (Aare, Linth, Reuss, Rhein und Rhone) das nivo-glaziale Abflussregime ins Grundwasser der Talschotterebenen des Mittellands. Flüsse aus den Voralpen (Emme, Saane und Thur) wiederum importieren in gleicher Weise das pluvio-nivale Abflussregime. In den Lockergesteins-Grundwasserleitern der Talschotterebenen nimmt mit zunehmender Distanz vom Fluss das importierte Grundwasserregime ab und geht sukzessive in das standorttypische Grundwasserregime über, wie z. B. im Berner Seeland von nivo-glazial zu pluvial.

#### **GSchG: keine dauernde Absenkung**

Gemäss den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) sollen Grundwasserstände und Abflussverhältnisse naturnahen Verhältnissen entsprechen. Das Gewässerschutzgesetz sieht vor, dass zur Erhaltung von Grundwasservorkommen diesen langfristig nicht mehr Wasser entnommen werden darf, als ihnen zufließt; dies bedeutet, dass es zu keiner weiträumigen und dauernden Absenkung der Grundwasserstände kommen darf (GSchG, Art. 43 Abs. 1 und 6). Bei Quellabflüssen sind hinsichtlich der Grundwasserentnahme die Restwasservorschriften für Oberflächengewässer gemäss GSchG (Art. 31–34) zu berücksichtigen.

#### **Grundwasserstand und Quellabfluss als Indikatoren**

Die Indikatoren «Hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse» und «Tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse» sind BAFU-Indikatoren im Bereich Umweltzustand der Gewässer. Die langfristige und landesweite Erhebung der Grundwasserstände und Quellabflüsse im Rahmen von NAQUA ermöglicht es, Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Quantität auf Landesebene aufzuzeigen und problematische Einflüsse zu identifizieren. Ausgewählte Daten werden zudem regelmässig an die Europäische Umweltagentur EUA (z. B. EUA 2018) und das International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC) übermittelt.

## **5.2 Datenerhebung**

### **Messung alle 5 Minuten**

Für die Jahre 2007 bis 2016 liegen von 91 Messstellen des Moduls QUANT (Kap. 3) kontinuierliche Daten zu Grundwasserstand bzw. Quellabfluss vor. Die Messung erfolgt jeweils mithilfe fest installierter Sonden, die alle 5 Minuten einen Messwert aufzeichnen.

### **Statistik**

Die statistischen Auswertungen basieren an Piezometern und Quellen auf dem Mittelwert des Grundwasserstandes bzw. des Abflusses pro Messstelle und Monat, welcher aus den Tagesmittelwerten berechnet wird. An Förderbrunnen basieren die statistischen Auswertungen ebenfalls auf dem Mittelwert des Grundwasserstandes pro Messstelle und Monat, jedoch werden sie aus den Tagesmaximalwerten berechnet. Für den Vergleich des Grundwasserzustandes eines Jahres mit der langfristigen Entwicklung werden jeweils die Messwerte der vorherigen 20 Jahre herangezogen. Aktuell liegen solche kontinuierlichen Datenserien für insgesamt 40 NAQUA-Messstellen vor. Alle anderen Messstellen, die im Jahr 2016 in Betrieb waren, weisen eine kürzere Datenreihe auf.

### **Referenzwerte**

Die Einordnung von Grundwasserstand bzw. Quellabfluss in die langjährige Entwicklung erfolgt auf Basis des sogenannten Normalbereichs. Dieser stellt den statistisch mit grosser Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Schwankungsbereich des Grundwasserstands bzw. Quellabflusses an einer Messstelle im entsprechenden Zeitintervall dar und umfasst alle Werte zwischen dem 10. und 90. Perzentil der Referenzwerte. In die Berechnung der Perzentile fliessen jeweils die Mittelwerte pro Monat der vorherigen 20 Jahre ein; an Messstellen mit einer kürzeren Messperiode sind es die Mittelwerte der vorhandenen, kürzeren Datenreihe. Hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse herrschen vor, wenn sie über dem Normalbereich liegen (>90. Perzentil), d. h., wenn der Messwert zu den höchsten 10% der in den letzten 20 Jahren gemessenen Werte des betreffenden Monats gehört. Entsprechend als tief bezeichnet werden Grundwasserstände und Quellabflüsse unterhalb des Normalbereichs (<10. Perzentil), d. h. Messwerte, die zu den tiefsten 10% der in den letzten 20 Jahren gemessenen

Werte des betreffenden Monats zählen. Für eine detailliertere Darstellung ist der Normalbereich noch weiter in unterdurchschnittliche (10. – 25. Perzentil), durchschnittliche (25. – 75. Perzentil) sowie überdurchschnittliche (75. – 90. Perzentil) Grundwasserstände bzw. Quellabflüsse unterteilt.

### Berechnung Indikatoren

Der Indikator «Hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse» wird berechnet als Prozentsatz von Messstellen pro Jahr, an denen im Vergleich mit dem langjährigen Mittel überdurchschnittlich häufig hohe Grundwasserstände bzw. Quellabflüsse auftreten. Der Indikator «Tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse» entspricht dem Prozentsatz von Messstellen pro Jahr, an denen im jeweiligen Jahr überdurchschnittlich häufig tiefe Grundwasserstände bzw. Quellabflüsse vorliegen. Beide Indikatoren basieren auf den rund 40 NAQUA-Messstellen, welche eine kontinuierliche Datenreihe von mindestens 20 Jahren aufweisen.

## 5.3 Zustand

### Einfluss Niederschlag und Fließgewässer

Niederschlag (Abb. 5.1) und Abfluss in den Fließgewässern sind zentrale Einflussgrößen auf die Grundwasserstände und Quellabflüsse (Abb. 5.2). Dies belegen z. B. die aussergewöhnlichen Verhältnisse während der Hochwasserereignisse in den Jahren 2007, 2012 und 2014 bzw. während der Trockenperioden 2011 und 2015.

**2007 – im Norden über-, im Süden unterdurchschnittlich**  
Infolge der überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen wiesen Messstellen mit pluvialem, pluvio-nivalem oder nivo-glazialen Regime 2007 im Norden überdurchschnittliche, teilweise sogar hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse auf. Insbesondere während der Starkniederschläge vom 7./8. August stiegen die Flusspegel markant an, was zu einer erhöhten Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser führte. In der Folge kam es an der Emme sowie entlang der Aare zwischen Emmemündung und Rhein zu einem raschen Anstieg der Grundwasserstände. In der Ostschweiz waren dagegen infolge der durchschnittlichen Niederschlagsmengen die Grundwasserstände und Quellabflüsse normal. Im pluvio-ni-

valen Regime der Alpensüdseite waren infolge geringer Niederschlagsmengen die Grundwasserstände tief.

**2008 – im Norden überdurchschnittlich, im Süden hoch**  
Grundwasserstände und Quellabflüsse bewegten sich infolge durchschnittlicher Niederschlagsmengen 2008 generell im Normalbereich. Der sehr nasse April führte an Messstellen mit pluvialem oder nivo-pluvialem Regime teilweise zu hohen Grundwasserständen und Quellabflüssen. Auf der Alpensüdseite lagen sie an den Messstellen mit pluvio-nivalem Regime infolge der aussergewöhnlich hohen Niederschlagsmengen vom April und Mai im weiteren Jahresverlauf hoch.

### 2009 – weitgehend normal

Messstellen mit pluvialem oder nivo-glazialen Regime verzeichneten 2009 – entsprechend den durchschnittlichen bis unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen – Grundwasserstände und Quellabflüsse innerhalb des Normalbereichs. Im pluvio-nivalen Regime der Voralpen waren diese infolge der trockenen zweiten Jahreshälfte tief; zeitgleich lagen sie auf der Alpensüdseite wegen überdurchschnittlicher Niederschlagsmengen jedoch hoch.

### 2010 – uneinheitlich

Im Westen waren aufgrund geringer Niederschlagsmengen die Grundwasserstände und Quellabflüsse 2010 normal, lokal teilweise auch tief. In der Ostschweiz und auf der Alpensüdseite lagen sie trotz überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen und Starkniederschlägen grösstenteils noch im Normalbereich, lokal jedoch auch darüber.

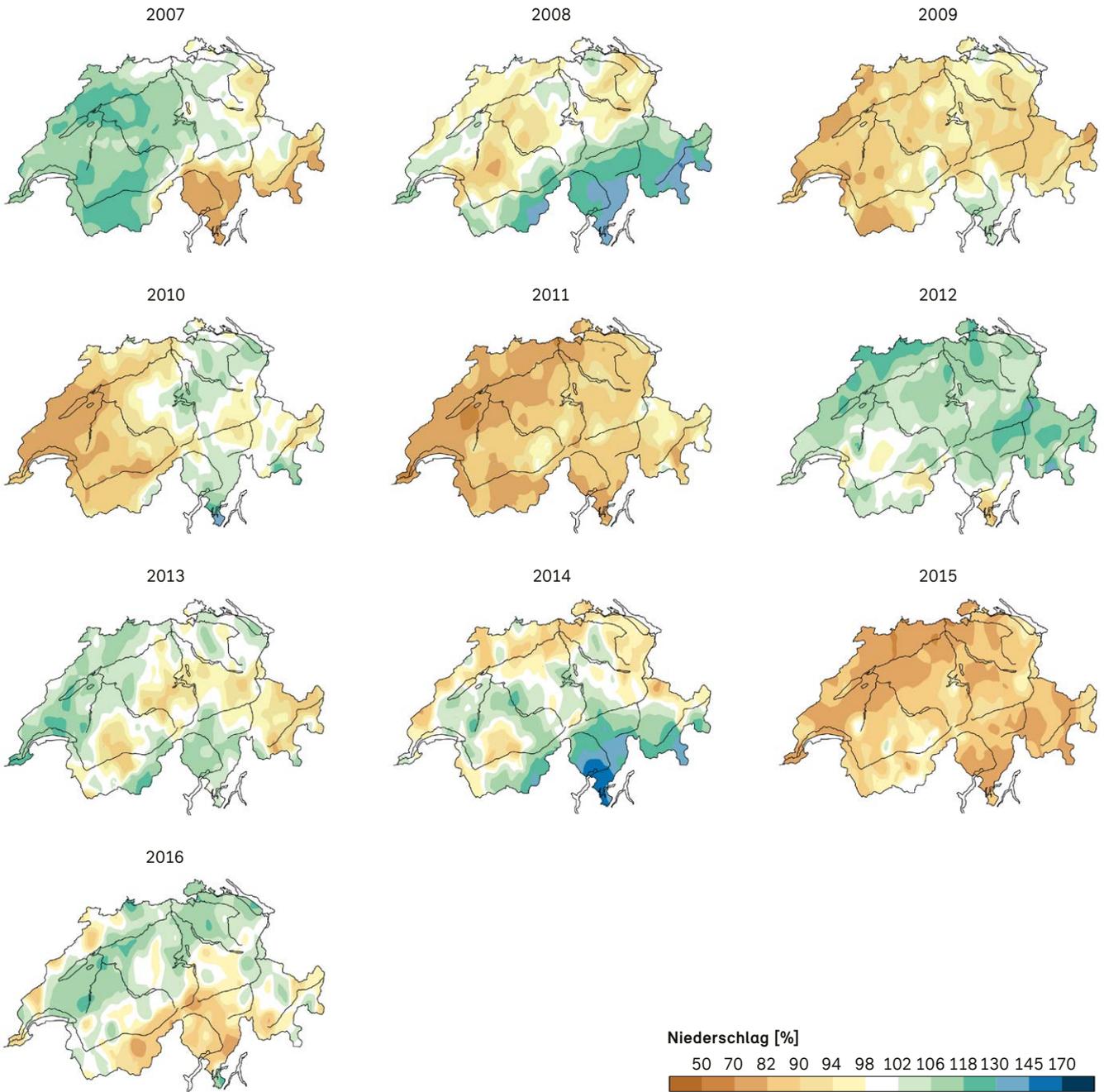
### 2011 – aussergewöhnlich tief

Grundwasserstände und Quellabflüsse waren 2011 bereits im Mai und Juni niedriger als im Hitzesommer 2003. So lagen in den kleinen Flusstälern des Jura, des Mittellands (pluviales Regime) und des Alpenvorlandes inkl. Tessin (pluvio-nivales Regime) die Grundwasserstände in diesen beiden Monaten tief. In den Tälern der grossen Alpenflüsse (nivo-glaziales Regime) waren sie infolge der geringen Niederschlags- und Schmelzwassermengen ebenfalls tief. Im Zuge der geringen Niederschlagsmengen im Herbst waren bis Ende Dezember dann verbreitet und anhaltend tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse zu beobachten.

Abbildung 5.1

Niederschlag (2007 bis 2016)

Niederschlagssumme pro Jahr in Prozent des langjährigen Mittelwerts (1981 bis 2010).



Quelle: MeteoSchweiz

**2012 – weitgehend normal, am Jahresende hoch**

Die landesweit tiefen Grundwasserstände und Quellabflüsse am Jahresende 2011 normalisierten sich grösstenteils zu Beginn des Jahres 2012 infolge überdurchschnittlicher Niederschläge. Hohe Niederschlagsmengen in der zweiten Jahreshälfte liessen Grundwasserstände und Quellabflüsse auf der Alpennordseite mit einem pluvialen bzw. pluvio-nivalen Regime weiter ansteigen; lokal wurden für den Monat Dezember teilweise sogar neue Höchststände erreicht.

**2013 – verbreitet hoch**

Starkniederschläge verursachten 2013 von Anfang Juni entlang von Aare, Limmat, Reuss und Hochrhein zusätzlich zur Schnee- und Gletscherschmelze eine erhöhte

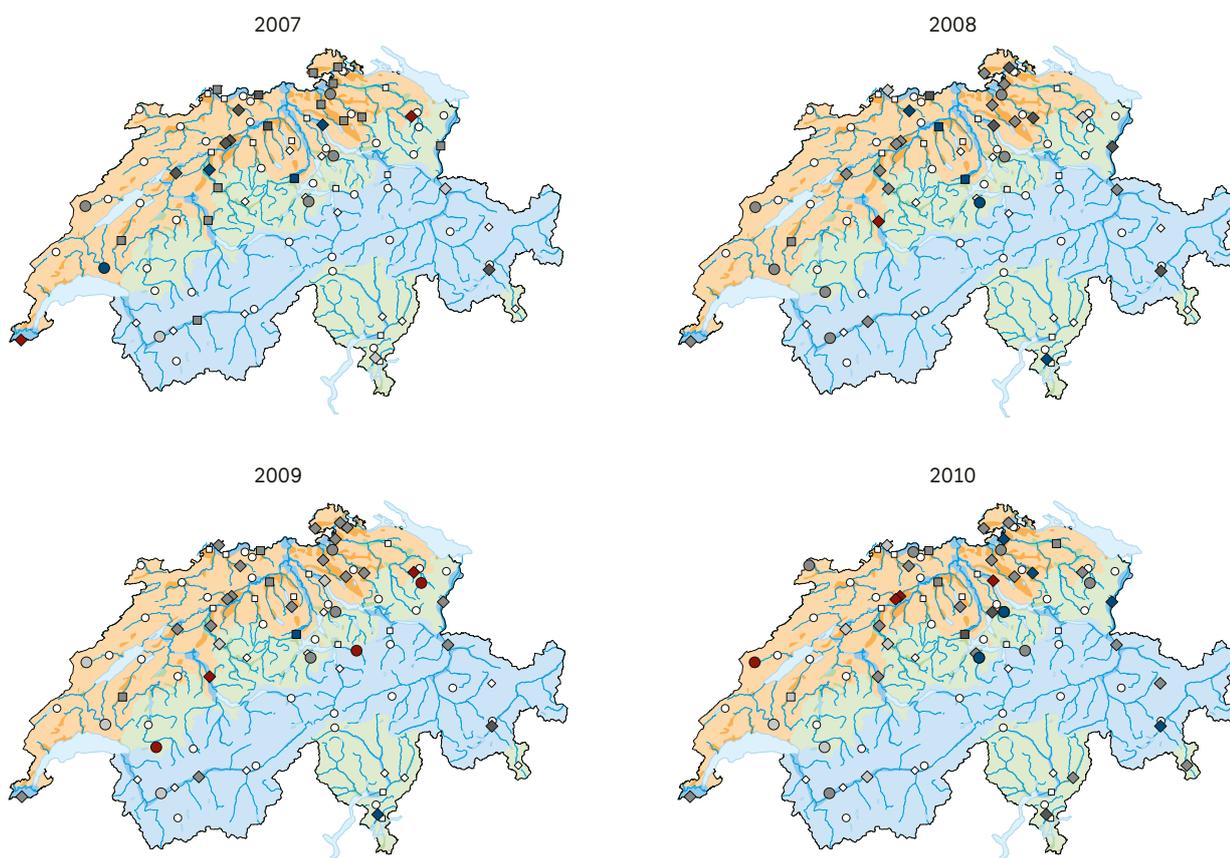
Flusswasserinfiltration, welche hier die Grundwasserstände weiter ansteigen liess. Durch überdurchschnittliche Niederschläge im Herbst traten im Jura und im Mittelland hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse auf.

**2014 – weitgehend normal**

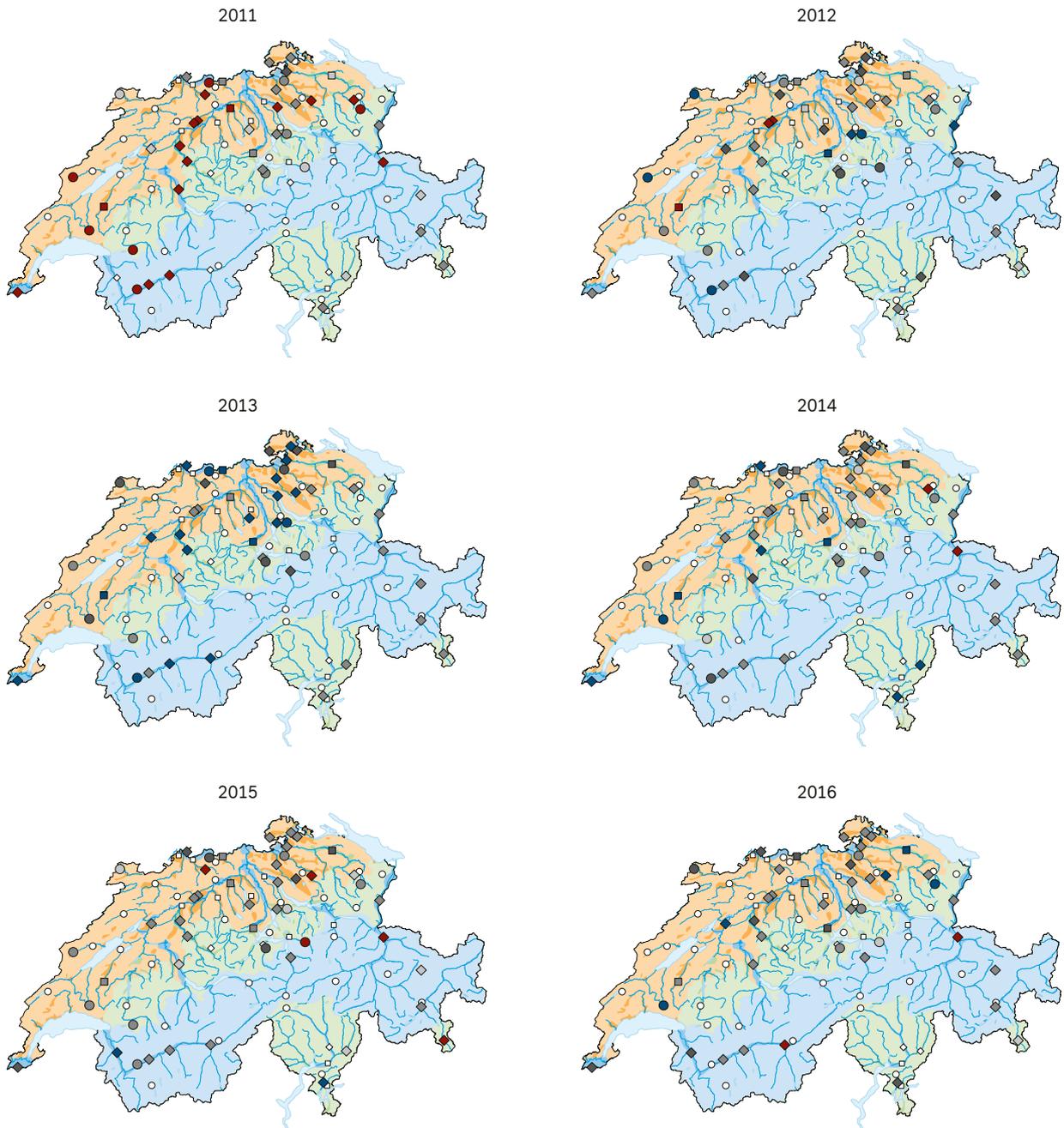
Grundwasserstände und Quellabflüsse lagen 2014 infolge durchschnittlicher Niederschlagsmengen landesweit im Normalbereich. Starkniederschläge im Juli führten entlang der Aare vorübergehend zu hohen Grundwasserständen (nivo-glaziales Regime) und weitere Starkniederschläge im November zu neuen Grundwasserhöchstständen für diesen Monat im Tessin (pluvio-nivales Regime).

**Abbildung 5.2****Grundwasserstand und Quellabfluss (2007 bis 2016) sowie Grundwasserregime**

Mittelwert pro NAQUA-Messstelle und Jahr in Relation zum langjährigen Mittelwert der jeweils vorherigen 20 Jahre. Grundwasserstände und Quellabflüsse tief: <10. Perzentil; unterdurchschnittlich: 10. – 25. Perzentil; durchschnittlich: 25. – 75. Perzentil; überdurchschnittlich: 75. – 90. Perzentil; hoch: >90. Perzentil.



Fortsetzung auf der nächsten Seite



**Grundwasserstand und Quellabfluss**

- hoch ■
- überdurchschnittlich ■
- durchschnittlich ■
- unterdurchschnittlich ■
- tief ■
- Datenserie unvollständig

**Messstelle**

- Förderbrunnen
- Piezometer
- Quelle

**Grundwasserregime**

**nach Naturraum**

- pluvial ■
- pluvio-nival ■
- nivo-glazial ■

**in Talsohlen**

- pluvial ■
- pluvio-nival ■
- nivo-glazial ■

**2015 – zunehmend tief**

Starkniederschläge von Anfang Mai 2015 liessen die Flusspegel auf der Alpennordseite und in der Westschweiz stark ansteigen; daher infiltrierte vermehrt Flusswasser in das angrenzende Grundwasser. Aufgrund der ab Mitte Juli anhaltenden Trockenperiode traten in kleinen Flusstälern im Jura und Mittelland sowie in den Voralpen vermehrt tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse auf. Die Hitze und die damit verbundene intensive Schnee- und Gletscherschmelze zog dagegen entlang von Fließgewässern aus den Alpen eine überdurchschnittliche Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser nach sich.

**2016 – im Frühling hoch, am Jahresende tief**

Starkniederschläge von April bis Juni 2016 führten verbreitet zu hohen Grundwasserständen und Quellabflüssen. Im Zuge der anhaltend niedrigen Niederschlagsmengen ab Juli lagen diese im Jura (pluviales Regime), in den Alpen (nivo-glaziales Regime) und im Tessin (pluvio-nivales Regime) zunehmend tief. Ende Dezember waren an jeder dritten Messstelle die Grundwasserstände bzw. Quellabflüsse tief.

**5.4 Entwicklung**

**Mehrjährige Schwankungen**

Die längerfristige Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen lässt zusätzlich zum Jahrgang (Grundwasserregime) deutliche mehrjährige Schwankungen mit einer gewissen Periodizität erkennen. So lösten sich in den letzten 4 Jahrzehnten im Grundwasser der Schweiz regelmässig mehrjährige Niedrig- und Hochstandssituationen ab.

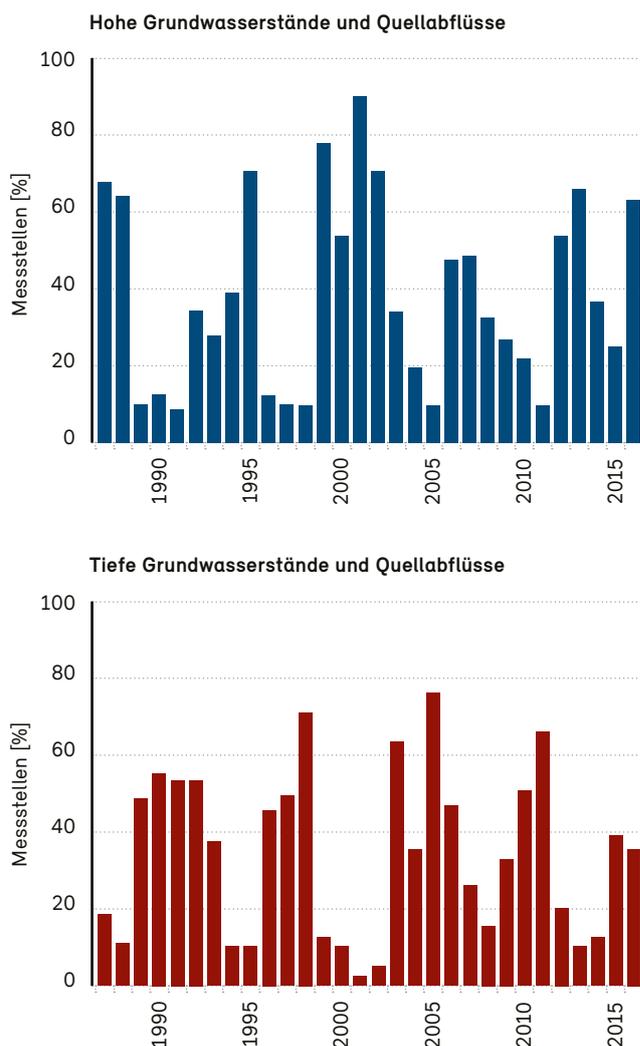
**Hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse**

In den Jahren 1987/1988, 1995, 1999 bis 2002, 2006/2007, 2012/2013 und 2016 lag der Indikator «Hohe Grundwasserstände und Quellabflüsse» (Abb. 5.3) meist deutlich über 50%. Das heisst, an der Mehrzahl der Messstellen traten überdurchschnittlich viele Tage mit hohen Grundwasserständen bzw. Quellabflüssen auf. Das Hochwasser des Jahres 1999 sowie der von 2000 bis 2002 anhaltende Niederschlagsüberschuss bzw. die Starkniederschläge 2013 und 2016 führten dabei zu aussergewöhnlich hohen Werten für den Indikator.

**Tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse**

In den Jahren 1990 bis 1992, 1997/1998, 2003, 2005 und 2010/2011 lag der Indikator «Tiefe Grundwasserstände und Quellabflüsse» (Abb. 5.3) über 50%. Das heisst, an der Mehrzahl der Messstellen traten überdurchschnittlich viele Tage mit tiefen Grundwasserständen bzw. Quellabflüssen auf. Der Hitzesommer des Jahres 2003, das von 2003 bis 2005 anhaltende Niederschlagsdefizit (BUWAL/BWG/MeteoSchweiz 2004) und die langanhaltende Trockenperiode des Jahres 2011 führten dabei zu aussergewöhnlich hohen Werten für diesen Indikator.

Abbildung 5.3  
Indikatoren Grundwasser-Quantität (1987 bis 2016)



### Übergangsbereich

Zwischen Perioden mit Niedrig- und Hochstandsituationen – mit jeweils gegenläufigem Ausschlag der beiden Indikatoren – liegt häufig ein Übergangsbereich. In diesem treten weder ausgesprochen hohe noch tiefe Grundwasserstände bzw. Quellabflüsse (entsprechend Definition der Indikatoren) auf. Beispiele hierfür sind die Jahre 1993/94, 2004, 2008 und 2014.

### Ausprägung von Grundwasserleiter abhängig

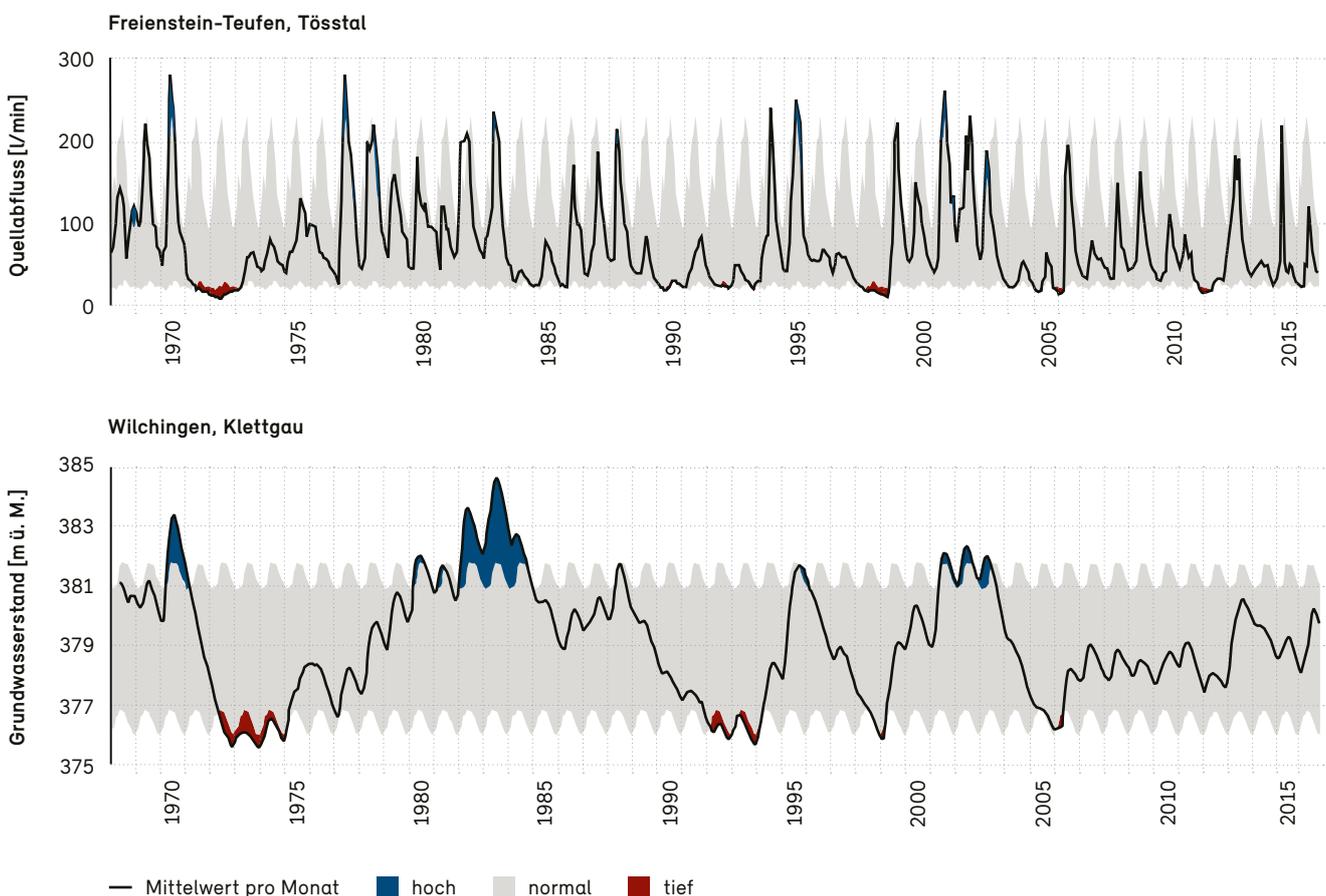
Je nach den Eigenschaften des Grundwasserleiters sind Niedrig- und Hochstandsituationen unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei Grundwasserleitern, welche schnell auf die Grundwasserneubildung reagieren, dominiert der

Jahresgang – d.h. das Grundwasserregime. Mehrjährige Tendenzen sind hingegen dort nur untergeordnet erkennen. Dies ist etwa der Fall an Quellen in Lockergesteinen, wie z. B. den Deckenschottern am Irchel (Messstelle «Freienstein-Teufen, Tösstal», Abb. 5.4). Dagegen reagieren Grundwasserstände in Lockergesteinen mit einer mächtigen ungesättigten Deckschicht, wie z. B. mit 35 m im Klettgau (Messstelle «Wilchingen, Klettgau», Abb. 5.4), um einige Monate verzögert sowie im Jahresgang gedämpft. Die längerfristige Entwicklung wird dort durch die Perioden von Niedrig- und Hochstandsituationen dominiert, welche den jahreszeitlichen Gang des Grundwasserregimes weitgehend überlagern.

Abbildung 5.4

#### Grundwasserstand bzw. Quellabfluss (1968 bis 2016) an ausgewählten Messstellen

Mittelwert pro NAQUA-Messstelle und Monat. Referenzwerte: langjähriger Mittelwert (1968 bis 2016) pro Monat. Grundwasserstand bzw. Quellabfluss tief: <10. Perzentil; normal: 10. – 90. Perzentil («Normalbereich»); hoch: >90. Perzentil. Beide Messstellen liegen in der Nordostschweiz (pluviales Grundwasserregime).



## 5.5 Analyse

Der regelmässige natürliche Jahresverlauf des Grundwasserstands bzw. des Quellabflusses charakterisiert das jeweilige Grundwasserregime eines Grundwasserleiters. Die Schwankungen von Grundwasserstand und Quellabfluss besitzen zudem meist eine mehrjährige Periodizität mit länger andauernden Niedrig-, Normal- und Hochstandsituationen.

### Grundwassermenge stabil

Bezogen auf das gesamte Grundwasservolumen in der Schweiz machen Änderungen der Grundwasserstände in der Regel nur einen kleinen Anteil aus (Sinreich et al. 2012). So liegen die für die Lockergesteins-Grundwasservorkommen dokumentierten natürlichen Schwankungen im Bereich von Zentimetern bis Dezimetern, bezogen auf eine Gesamtmächtigkeit von meist einigen 10er Metern. Hohe Abflussänderungen an Quellen, insbesondere in Karst-Grundwasserleitern, können dagegen auf starke Veränderungen des Füllungsgrades in solchen Grundwasserleitern hinweisen. Das wiederkehrende Muster der Entwicklung der Grundwasserstände und Quellabflüsse innerhalb der jeweiligen Grundwasserregime dokumentiert die regelmässige und vollständige Wiederauffüllung der Grundwasserressourcen. So kann in quantitativer Hinsicht, zumindest in der mehrjährigen Bilanz, von einem weitgehend stabilen Zustand der Ressource Grundwasser gesprochen werden.

### Insgesamt genügend Grundwasser

Die Tatsache, dass die meist oberflächennahen Grundwasserleiter der Schweiz sich nach Trockenperioden rasch wieder auffüllen, hat zur Folge, dass in der Regel ganzjährig genügend Trink- und Brauchwasser zur Verfügung steht. Rein quantitativ stellt die Gesamtentnahme aus dem Schweizer Grundwasser nur einen kleinen Teil des theoretisch nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots dar (Kap. 4). Jedoch wird die effektive Nutzbarkeit der Grundwasservorkommen durch steigenden Siedlungsdruck zunehmend eingeschränkt. Auch kommt es in Gebieten mit weniger ergiebigen Quellen, die in Lockergesteins- und Festgesteins-Grundwasserleitern ausserhalb von Talsohlen im Mittelland, im Jura und in den Voralpen entspringen, während Trockenperioden immer wieder lokal und zeitlich begrenzt zu Wasserknappheit.

Wasserverbundnetze bieten die Möglichkeit, auch in diesen Fällen die Versorgung mit Trink- und Brauchwasser sicherzustellen.

### Auswirkungen Klimaänderung tendenziell gering

Hydrologische Klimastudien wie CH2014 und NFP61 (2015) prognostizieren, dass im Sommer zukünftig häufiger Trockenperioden auftreten werden, während im Winter leicht höhere Niederschlagsmengen und eine steigende Schneefallgrenze zu einer verstärkten Grundwasserneubildung führen dürften. Die Studien gehen zudem tendenziell davon aus, dass infolge der Klimaänderung die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen langfristig zunehmen werden. Damit dürfte es in schnell reagierenden Karst- und oberflächennahen Lockergesteins-Grundwasserleitern häufiger zu kurzfristig hohen Grundwasserständen und Quellabflüssen kommen. Gemäss CCHydro (BAFU 2012) werden sich die Wasserressourcen der Schweiz, einschliesslich der Grundwasserressourcen, in Zukunft jedoch insgesamt nur geringfügig verändern. Lokal bis regional könnten aber infolge Verschiebung der saisonalen Verteilung der Niederschläge und Abflüsse vermehrt Engpässe in der Wasserversorgung auftreten.

## 6 Wasserisotope

### 6.1 Grundlagen

#### Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotope

Isotope sind unterschiedliche Arten eines Atoms, deren Atomkerne gleich viele Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten. Es gibt 3 Wasserstoff-Isotope und 3 Sauerstoff-Isotope: Die Wasserstoff-Isotope  $^1\text{H}$  und  $^2\text{H}$  (*Deuterium*) sowie die Sauerstoff-Isotope  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$  sind stabil, d. h., sie zerfallen nicht. Das Wasserstoff-Isotop  $^3\text{H}$  (*Tritium*) ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,43 Jahren. Die leichten Isotope  $^1\text{H}$  und  $^{16}\text{O}$  kommen in der Natur im Wassermolekül wesentlich häufiger vor als die entsprechenden schweren Isotope. Bestimmt wird das Verhältnis zwischen den stabilen Wasserstoff-Isotopen  $^1\text{H}$  und  $^2\text{H}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) bzw. zwischen den Sauerstoff-Isotopen  $^{16}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) einer Probe relativ zu einem Standard (ausgedrückt in negativen ‰-Werten), im Folgenden als *Deuterium* und *Sauerstoff-18* bezeichnet.

#### Isotopensignatur des Niederschlags

Durch das unterschiedliche Gewicht der Wassermoleküle kommt es zur Auftrennung der Isotope im Wasserkreislauf. Leichte Wassermoleküle verdunsten eher von der Wasseroberfläche, schwere kondensieren dagegen früher bei der Bildung von Niederschlag. Deshalb sind *Deuterium* und *Sauerstoff-18* im Wassermolekül korreliert. Je höher die Lufttemperatur während der Kondensation, umso mehr ist der Niederschlag an schweren Isotopen angereichert (Temperatureffekt). Die Isotopensignatur des Niederschlags zeigt daher einen ähnlichen Jahresgang wie die Lufttemperatur zur Zeit des Niederschlags. Da die Lufttemperatur ausserdem mit zunehmender Höhe generell abnimmt, ist der Niederschlag mit zunehmender Höhenlage an schweren Isotopen abgereichert (Höheneffekt).

#### Datierung von Grundwasser mit Tritium

Radioaktives *Tritium* wird in geringen Mengen auf natürliche Weise durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre gebildet. Durch die Kernwaffenversuche in den 1950er- und 1960er-Jahren gelangten zusätzlich grosse Mengen *Tritium* in die Atmosphäre und damit in

den gesamten Wasserkreislauf. Da die *Tritium*-Aktivität in den Niederschlägen weltweit durch die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) dokumentiert wurde, konnte das Grundwasseralter bzw. die durchschnittliche Aufenthaltszeit im Untergrund durch den Vergleich der im Grundwasser gemessenen *Tritium*-Aktivität mit derjenigen in den Niederschlägen gut bestimmt werden. Seit 1980 fanden keine oberirdischen Atomwaffenversuche mehr statt, sodass die *Tritium*-Aktivität im Niederschlag durch den natürlichen Zerfall laufend abgenommen hat und sich heute immer mehr den natürlichen Hintergrundwerten annähert.

#### Stabile Isotope in Praxis und Forschung

Stabile Isotope werden als natürliche Tracer insbesondere in hydrogeologischen, hydrologischen und klimatologischen Studien eingesetzt. In der hydrogeologischen Praxis werden *Deuterium* und *Sauerstoff-18* vor allem dazu benutzt, die mittlere Höhe von Einzugsgebieten des Grundwassers zu ermitteln bzw. einzelne Komponenten im Grundwasser und in Fliessgewässern zu unterscheiden (Etcheverry und Vennemann 2009).

#### GSchV: keine numerischen Anforderungen

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) enthält keine Anforderungen für Wasserisotope. Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Für Trinkwasser gilt gemäss der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) ein Richtwert von 100 Bq/l für *Tritium*, was ca. 840 TU entspricht; die Höchstwerte der TBDV gelten durch den Verweis der GSchV auf die TBDV auch als numerische Anforderungen der GSchV für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser.

#### Stabile Isotope als Klimaparameter

Die IAEA begann 1953 mit dem Aufbau eines weltweiten Messnetzes zur Beobachtung der Isotope im Niederschlag GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), um die Dynamik des Wasserkreislaufs anhand dieser natürlichen Tracer zu beobachten. Später entstand das weltweite

Messnetz zur Beobachtung der Isotope in Flüssen GNIR (Global Network of Isotopes in Rivers). Das nationale Klimabeobachtungssystem Schweiz (GCOS Schweiz) führt die Wasserisotope seit 2007 als essenzielle Klimavariablen (MeteoSwiss 2018). Das Modul ISOT liefert die Referenzdaten der Schweiz für GNIP, GNIR und GCOS.

## 6.2 Datenerhebung

### Messstellen

Bereits in den 60er-Jahren begann die Universität Bern (Institut für Klima- und Umwelphysik), Isotope im Wasserkreislauf der Schweiz zu analysieren. Im Jahr 1992 wurden die repräsentativen Niederschlags- und Fließgewässer-Messstellen der Universität Bern in die nationale Isotopenbeobachtung (heute NAQUA-Modul ISOT) übernommen.

### Deuterium und Sauerstoff-18

*Deuterium* und *Sauerstoff-18* werden heute im Rahmen des Moduls ISOT an 13 Niederschlags- und 9 Fließgewässer-Messstellen analysiert (Kap. 3). Bei den Niederschlagsproben handelt es sich um Monatssammelproben, bei den Fließgewässern z. T. um abflussproportionale 4-Wochensammelproben und z. T. um 14-tägige Stichproben. Zusätzlich wurden 3 ausgewählte Grundwasser-Messstellen bis 2009 auf *Deuterium*, *Sauerstoff-18* und *Tritium* analysiert.

### Tritium-Analysen 2009 eingestellt

Die Erhebung von *Tritium* im Rahmen des Moduls ISOT wurde 2009 eingestellt, da die inzwischen gemessenen Werte kaum noch für eine Bestimmung des Grundwasseralters geeignet sind. Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) führt im Rahmen der nationalen Überwachung der Umweltradioaktivität weiterhin *Tritium*-Analysen durch (BAG 2017).

### Pilotstudie «Isotope im Grundwasser» 2006 bis 2013

Im Rahmen einer Pilotstudie wurden von 2006 bis 2013 die 50 Grundwasser-Messstellen des Moduls TREND auf *Deuterium* und *Sauerstoff-18* analysiert, um die Dynamik der Grundwasserneubildung und die Oberflächenwasser-/Grundwasser-Wechselwirkung zu charakterisieren.

Pro Messstelle und Jahr wurden dazu jeweils 2 bis 4 Proben entnommen.

### Statistik – Mittel- und Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen der stabilen Isotope basieren jeweils auf dem *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Mittelwert pro Messstelle, die des radioaktiven *Tritiums* auf dem entsprechenden Maximalwert der Aktivität pro Messstelle. Die *Tritium*-Aktivität wird in *Tritium*-Einheiten (*Tritium*-Units, TU) angegeben. Analysiert und dargestellt werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings bis und mit 2016 sowie die Ergebnisse der Pilotstudie «Isotope im Grundwasser 2006 bis 2013».

## 6.3 Zustand

### Deuterium und Sauerstoff-18 im Niederschlag

An den Niederschlags-Messstellen im Jura und im Mittelland lagen die Jahresmittelwerte für *Deuterium* und *Sauerstoff-18* von 1980 bis 2016 bei ca.  $-70\text{‰}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) bzw.  $-10\text{‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ), in den Alpen an der Grimsel bei ca.  $-100\text{‰}$  bzw.  $-13\text{‰}$ . Auf der Alpensüdseite und in der Nordostschweiz waren die Werte am höchsten (Abb. 6.1).

### Deuterium und Sauerstoff-18 im Grundwasser

Im Grundwasser folgte die mittlere *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Verteilung generell den regionalen mittleren Isotopenwerten im Niederschlag (Abb. 6.1). In den Regionen Basel und Genf sowie im Tessin wurden die höchsten *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte gemessen, d. h., das Wasser war hier tendenziell mit schweren Isotopen angereichert. Im Jura und im Mittelland lagen die Werte generell tiefer. Die niedrigsten *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte, d. h., die am stärksten mit schweren Isotopen abgereicherten Wässer traten in den Alpen auf (nivo-glaziales Grundwasserregime). An flussnahen Grundwasser-Messstellen, wie z. B. entlang der Aare und des Rheins, wurden z. T. auch im Mittelland niedrige *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte beobachtet, da durch die Flüsse das nivo-glaziale Regime ins Mittelland transportiert und dort häufig durch Infiltration ins Grundwasser übertragen wird (Kap. 5).

Abbildung 6.1

**Deuterium und Sauerstoff-18 in Niederschlag, Fließgewässern und Grundwasser (2013) sowie Naturraum bzw. Grundwasserregime in Talsohlen**

$\delta^2H$ - und  $\delta^{18}O$ -Mittelwert pro NAQUA-Messstelle. Niederschlags- und Fließgewässer-Messstellen des Moduls ISOT, Grundwasser-Messstellen des Moduls TREND.

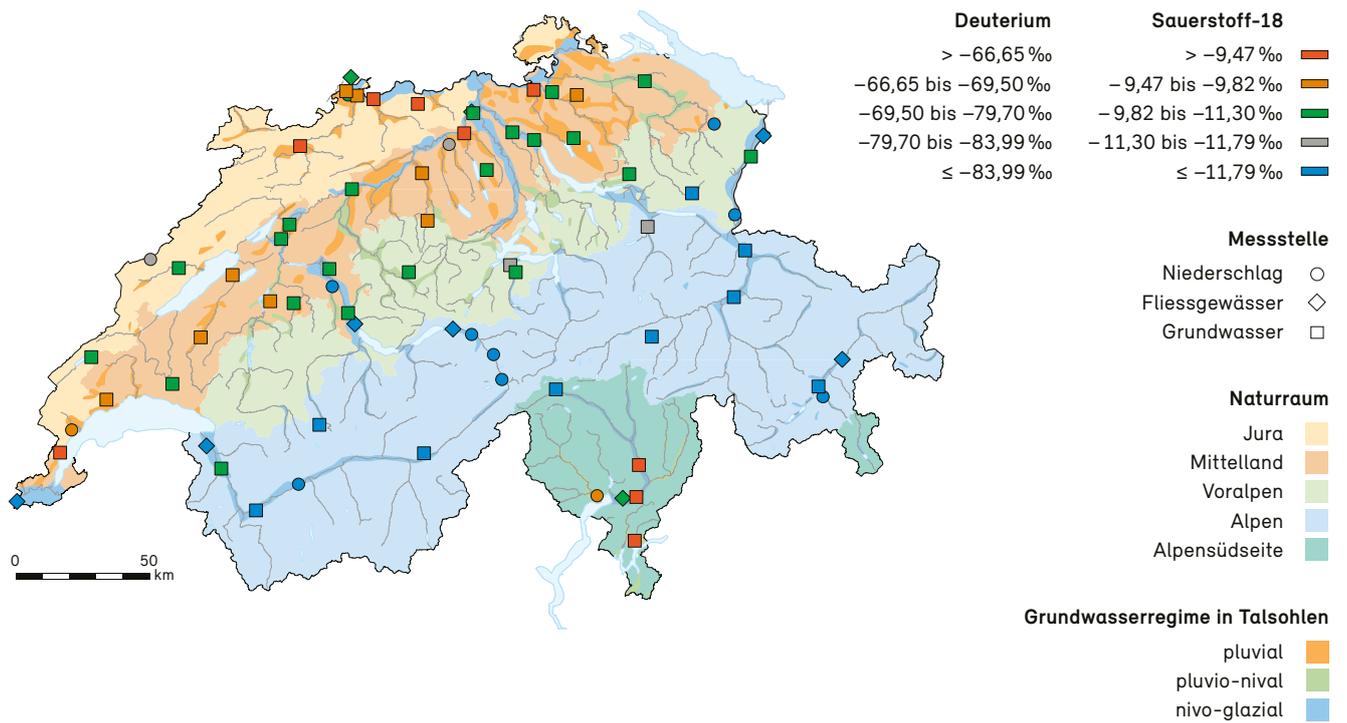
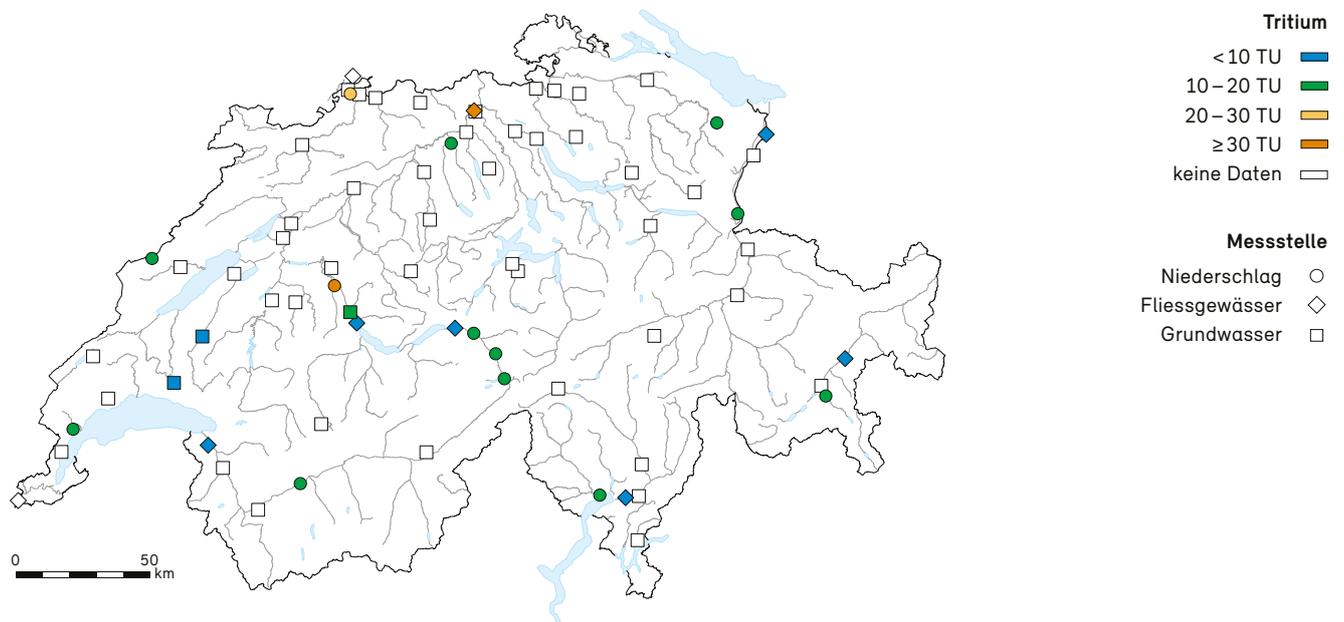


Abbildung 6.2

**Tritium in Niederschlag, Fließgewässern und Grundwasser (2009)**

Maximalwert der Tritium-Aktivität pro NAQUA-Messstelle. Niederschlags- und Fließgewässer-Messstellen des Moduls ISOT, Grundwasser-Messstellen des Moduls TREND.



**Tritium vor allem im Mittelland leicht erhöht**

Die niedrigsten *Tritium*-Aktivitäten mit weniger als 8 TU wurden im Oberengadin, im Tessin und im Unterwallis gemessen (Abb. 6.2). In den Alpen, den Voralpen und in der Westschweiz lagen sie generell etwas höher (zwischen 8 und 10 TU). Die höchsten *Tritium*-Aktivitäten traten mit mehr als 60 TU im Niederschlag in Bern und in Vaduz auf sowie mit mehr als 100 TU in der Aare bei Brugg.

**6.4 Entwicklung**

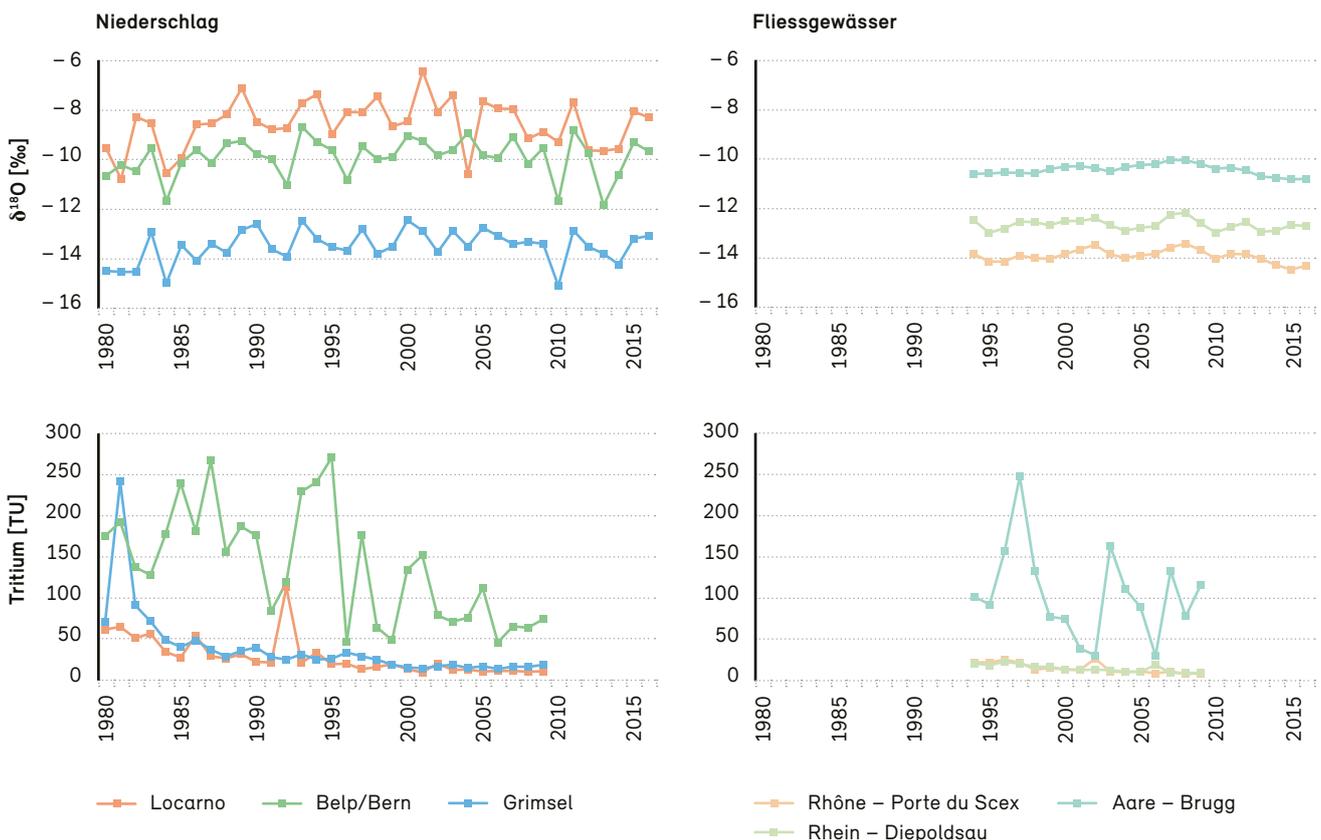
**Deuterium und Sauerstoff-18 variabel**

Im Niederschlag stiegen die *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte an allen Messstellen von 1980 bis etwa 2005 tendenziell an; danach ist keine einheitliche Entwicklung mehr zu erkennen (Abb. 6.3). Auch in der Aare und in der Rhone ist ein leichter Anstieg der *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte bis 2008 sichtbar, danach gingen die Werte wieder zurück und lagen 2016 tiefer als zu Beginn der Erhebungen. An der Grundwasser-Messstelle in Savigny stiegen die *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte zwischen 1996 bis 2009 tendenziell ebenfalls leicht an; danach gingen sie auch hier wieder zurück. An den meisten Grundwasser-Messstellen, die 2006 bis 2013 im Rahmen der Pilotstudie «Isotope im Grundwasser» untersucht wurden, waren die *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte zwischen 2008 und 2010 am höchsten.

Abbildung 6.3

Sauerstoff-18 und Tritium in Niederschlag und Fließgewässern an ausgewählten Messstellen (1980 bis 2016)

$\delta^{18}O$ -Mittelwert bzw. Maximalwert der Tritium-Aktivität pro NAQUA-Messstelle und Jahr.



### **Tritium tendenziell sinkend**

Die *Tritium*-Aktivität nahm zwischen 1980 und 2009 an allen Niederschlags-Messstellen von Werten zwischen 60 und 180 TU auf Werte zwischen 10 und 70 TU ab (Abb. 6.3). An den Fliessgewässer-Messstellen ging die *Tritium*-Aktivität über die gesamte Messperiode von 1994 bis 2009 ebenfalls zurück. Auch im Grundwasser nahm sie an den 3 Messstellen von 1996 bis 2009 auf tiefem Niveau leicht ab.

### **Einstellung Atomwaffenversuche**

Generell ist die *Tritium*-Aktivität in Niederschlag, Fliessgewässern und Grundwasser infolge des natürlichen Zerfalls seit Einstellung der Atomwaffenversuche in der Atmosphäre im Jahr 1980 wieder auf die natürlichen Hintergrundwerte gesunken (Abb. 6.3). Lokal bis regional leicht erhöhte Werte im Niederschlag (Bern, Vaduz) bzw. in Fliessgewässern (Aare – Brugg) sind auf die Abgabe von Industrie-*Tritium* (z. B. Emissionen aus Kernkraftwerken, Leuchtfarbenindustrie) zurückzuführen (BAG 2017).

## **6.5 Analyse**

### **Stabile Wasserisotope als natürliche Tracer**

Die Isotopensignale des Niederschlags und des Flusswassers werden bei der Grundwasserneubildung ins Grundwasser übertragen und können daher als natürlicher Tracer für diesen Prozess verwendet werden. Entlang der grossen Flüsse kann die Infiltration von Oberflächenwasser einen wesentlichen Teil der Grundwasserneubildung ausmachen. Die *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte im Grundwasser weichen von denjenigen im lokalen Niederschlag ab, wenn das Fliessgewässer ein höher gelegenes Einzugsgebiet besitzt. Mithilfe der *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte kann basierend auf Mischungsrechnungen so der Anteil von Flusswasser an der Grundwasserneubildung berechnet werden. Diese Methode wurde zur Charakterisierung der Einzugsgebiete der Messstellen des Moduls TREND herangezogen.

### **Stabile Wasserisotope in Fliessgewässern gedämpft**

Die Variationen der *Deuterium*- und *Sauerstoff-18*-Werte im Jahresverlauf sind in den Fliessgewässern durch die Integration von Wässern unterschiedlicher Herkunft und wegen der Grösse der Einzugsgebiete deutlich gedämpfter als in den Niederschlägen (Abb. 6.3).

### **Tritium weit unter TBDV-Richtwert**

Die bis 2009 beobachteten *Tritium*-Aktivitäten im Niederschlag bzw. in Fliessgewässern und Grundwasser sind gering. Sie liegen mit Werten von 10 bis 70 TU im Niederschlag und von 10 bis 140 TU in Fliessgewässern beträchtlich unter dem Richtwert von 100 Bq/l für *Tritium* in Trinkwasser gemäss TBDV, was ca. 840 TU entspricht.

# 7 Grundwassertemperatur

## 7.1 Grundlagen

Die Grundwassertemperatur ist eine wesentliche Eigenschaft und ein wichtiger Einflussfaktor hinsichtlich des hydrochemischen und biologischen Zustands des Grundwassers. Sie hat Auswirkungen auf den Anteil an gelöstem Sauerstoff im Wasser sowie den Grad der Mineralisierung. Mit höherer Temperatur kann zudem die mikrobielle Aktivität im Grundwasser ansteigen (Garnier 2012).

### **Einflussfaktoren**

Die Wassertemperatur in oberflächennahen Grundwasservorkommen wird durch die Lufttemperatur bzw. in flussgebundenen Vorkommen auch durch die Temperatur des infiltrierenden Flusswassers geprägt. In 30 bis 50 m Tiefe ist der Oberflächeneinfluss kaum mehr spürbar, und die Grundwassertemperatur wird zunehmend durch den geothermischen Wärmefluss bestimmt (Burger et al. 1985). Die Grundwassertemperatur in urbanen Gebieten wird zudem beeinflusst von Infrastrukturen wie Erdwärmesonden, Grundwassernutzungen zum Kühlen und Heizen oder Installationen im Untergrund (Tunnel, Tiefgeschosse, Leitungen).

### **GSchV: naturnahe Temperaturverhältnisse**

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) sollen im Grundwasser naturnahe Temperaturverhältnisse herrschen. Die Grundwassertemperatur darf gemäss Anhang 2 GSchV durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand – vorbehältlich örtlich eng begrenzter Einflüsse – um höchstens 3 °C verändert werden.

## 7.2 Datenerhebung

### **Messung in Modulen QUANT und TREND**

Die Grundwassertemperatur wird systematisch in den Modulen QUANT und TREND (Kap. 3) erfasst. Seit 1999 wurden die Messstellen dieser Module sukzessive mit Temperatursonden ausgerüstet. Im Jahr 2016 wurde die Grundwassertemperatur an insgesamt 93 Messstellen

kontinuierlich erfasst, und zwar mit einem Messintervall von 5 Minuten. Die kontinuierliche Beobachtung erfolgt mittels Multiparametersonden, die gleichzeitig die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur aufzeichnen. Es werden zwei unterschiedliche Gerätetypen mit einer Auflösung von 0,01 bzw. 0,1 °C und einer Messgenauigkeit von jeweils  $\pm 0,2$  °C eingesetzt.

### **Referenzwerte**

Die Einordnung der Grundwassertemperatur in die langjährige Entwicklung erfolgt auf Basis des sogenannten Normalbereichs. Dieser stellt den statistisch mit grosser Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Schwankungsbereich der Grundwassertemperatur an einer Messstelle im entsprechenden Zeitintervall dar und umfasst alle Werte zwischen dem 10. und 90. Perzentil der Referenzwerte. In die Berechnung der Perzentile fliessen jeweils die Mittelwerte pro Monat der betrachteten Messperiode ein. Hohe Grundwassertemperaturen herrschen vor, wenn sie über dem Normalbereich liegen (> 90. Perzentil), d. h., wenn der Messwert zu den höchsten 10 % der in der Messperiode gemessenen Werte des betreffenden Monats gehört. Entsprechend als tief bezeichnet werden Grundwassertemperaturen unterhalb des Normalbereichs (< 10. Perzentil), d. h. Messwerte, die zu den tiefsten 10 % der in der Messperiode gemessenen Werte des betreffenden Monats zählen.

### **Statistik – Mittelwerte**

Die statistischen Auswertungen basieren auf dem Mittelwert der Grundwassertemperatur pro Messstelle und Monat, welcher seinerseits aus den Tagesmittelwerten berechnet wird. Für die Analyse mehrjähriger Tendenzen werden die Messwerte von 2000 bis 2016 herangezogen. Für diesen Zeitraum liegen kontinuierliche Datenreihen von insgesamt 48 Messstellen vor. Alle anderen Messstellen, die im Jahr 2016 in Betrieb waren, weisen eine kürzere Datenreihe auf.

## 7.3 Zustand

### Charakteristischer Jahresgang

Die Grundwassertemperatur in den oberflächennahen Grundwasservorkommen wies einen charakteristischen Jahresgang mit einem Minimum im März/April und einem Maximum im September/Oktobre auf. Im Vergleich zur Lufttemperatur traten die Maxima und Minima im Grundwasser rund zwei Monate später auf. Ein Jahresgang war in allen Grundwasserleitertypen (Lockergesteine, Kluft-, Karst-Festgesteine) und allen Grundwasserregimen (pluvial, pluvio-nival, nivo-glazial) gleichermassen ersichtlich. Mit zunehmender Tiefe nahm die Amplitude dieses Jahresgangs ab und war in Grundwasservorkommen ab einer Tiefe von etwa 30 m nicht mehr erkennbar.

### Schwankungen in Lockergesteinen am stärksten

Je nach Messstelle variierte die Grundwassertemperatur 2016 im Jahresverlauf über einen Bereich von einem bis mehreren Grad Celsius. In Lockergesteinen, in denen die Grundwassertemperatur an Förderbrunnen und Piezometern meist im oberen Teil des Grundwasserleiters gemessen wird, war der Schwankungsbereich deutlich grösser als an Quellmessstellen der Kluft- und Karst-Grundwasserleiter (Abb. 7.1).

### Höhenlage

Insgesamt lag der Mittelwert der Grundwassertemperatur an den einzelnen Messstellen zwischen 5 und 15 °C (Abb. 7.1, Abb. 7.2). Entsprechend der Höhenlage der Einzugsgebiete traten die tiefsten Grundwassertemperaturen von unter 10 °C im Jura und in den Alpen auf. Im Mittelland und auf der Alpensüdseite lagen sie bei 10 bis 13 °C. Die höchsten Werte – d.h. Grundwassertemperaturen von über 13 °C – wurden in urbanen Zentren wie Basel und Zürich registriert.

## 7.4 Entwicklung

### Tendenz stabil bis leicht steigend

Die Messstellen wurden hinsichtlich der berechneten Tendenzen der mittleren Jahrestemperatur über eine Messperiode von 10 Jahren in 4 Gruppen unterteilt (Abb. 7.2):

- sinkende Tendenz:  $\leq -0,2\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ ;
- konstante Tendenz:  $> -0,2\text{ °C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,2\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ ;
- steigende Tendenz:  $\geq 0,2\text{ °C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,6\text{ °C}/10\text{ Jahre}$  und
- deutlich steigende Tendenz:  $\geq 0,6\text{ °C}/10\text{ Jahre}$ .

Abbildung 7.1

Grundwassertemperatur und deren Variabilität (2016) in Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleitern

Grundlage: Mittelwert pro NAQUA-Messstelle und Monat. Die Messstellen sind jeweils nach aufsteigender Höhenlage dargestellt.

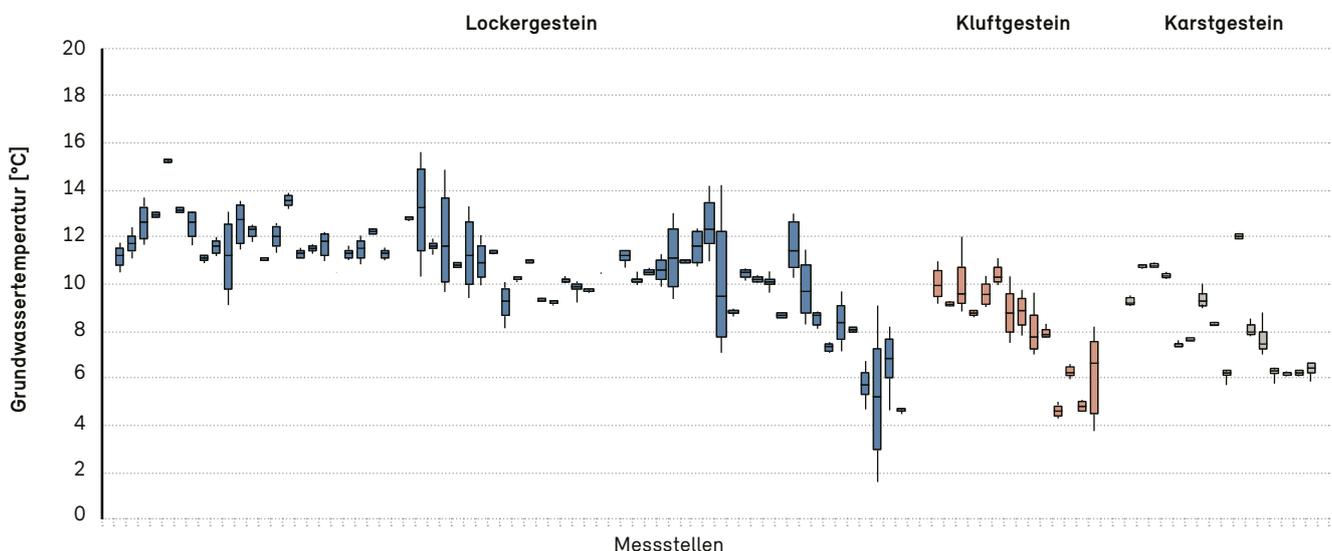
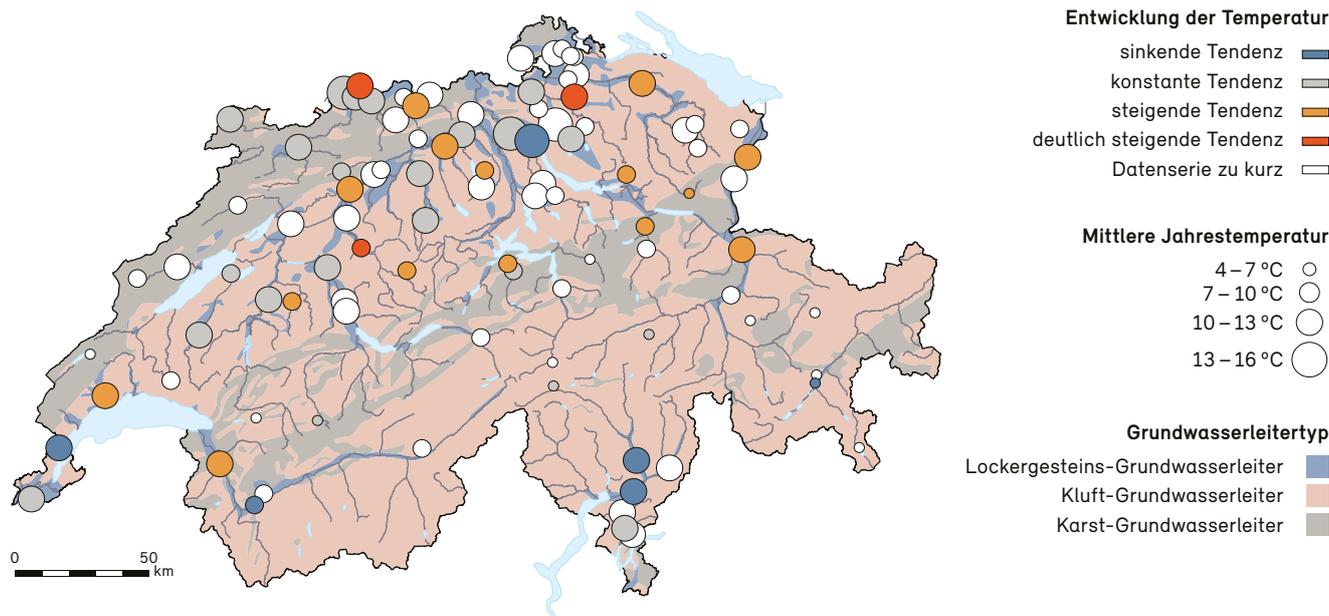


Abbildung 7.2

**Grundwassertemperatur (2016) und deren Entwicklung (2000 bis 2016) sowie Grundwasserleitertyp**

Mittelwert pro NAQUA-Messstelle. Entwicklung 2000 bis 2016: sinkend:  $\leq -0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; konstant:  $> -0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; steigend:  $\geq 0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,6\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; deutlich steigend:  $\geq 0,6\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ . Datenserie zu kurz: Daten  $< 10\text{ Jahre}$ .



An insgesamt 46% der Messstellen blieb die Grundwassertemperatur in den letzten 10 Jahren weitgehend unverändert, d. h., es war mittelfristig weder eine signifikante Zu- noch Abnahme zu erkennen. An 45% der Messstellen stieg die Grundwassertemperatur um mehr als 0,2 Grad pro 10 Jahre, an 9% der Messstellen sank sie um mehr als 0,2 Grad pro 10 Jahre.

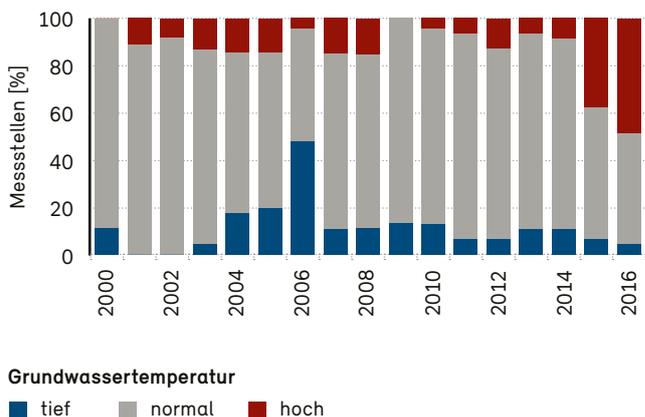
**Von Jahr zu Jahr unterschiedlich**

Die Mittelwerte der Grundwassertemperatur waren an den einzelnen Messstellen von Jahr zu Jahr leicht unterschiedlich. So lagen sie im Vergleich zur Referenzperiode 2000 bis 2016 z. B. in den Jahren 2004/2005 an rund jeder fünften Messstelle und im Jahr 2006 an rund jeder zweiten Messstelle tief (Abb. 7.3) – d. h. unter dem langjährigen Normalbereich. In den Jahren 2015 und 2016 traten an gut jeder dritten bzw. jeder zweiten Messstelle hohe Grundwassertemperaturen auf, die über dem langjährigen Normalbereich lagen.

Abbildung 7.3

**Grundwassertemperatur (2000 bis 2016)**

Grundlage: Mittelwert pro NAQUA-Messstelle und Jahr in Relation zum langjährigen Mittelwert (2000 bis 2016). Grundwassertemperatur tief:  $< 10.$  Perzentil des langjährigen Jahresmittels; normal: 10. bis 90. Perzentil («Normalbereich»); hoch:  $> 90.$  Perzentil. Berücksichtigt wurden ausschliesslich die 48 Messstellen, an denen die Grundwassertemperatur in diesem Zeitraum vollständig aufgezeichnet wurde.



### Grundwasserleitertyp

Je nach Grundwasserleitertyp traten an den Messstellen von 2000 bis 2016 unterschiedliche Tendenzen der Grundwassertemperatur auf (Abb. 7.4). In Lockergesteins-Grundwasserleitern wiesen ca. 10% der insgesamt 36 Messstellen eine sinkende Tendenz auf, 50% konstante Verhältnisse, 30% eine steigende Tendenz und 10% eine deutlich steigende Tendenz der Grundwassertemperatur. Diese prozentualen Anteile variierten zwischen Januar und Dezember nur geringfügig. An den meisten der 5 bzw. 7 Messstellen in Kluft- und Karst-Gesteinen war die Grundwassertemperatur unverändert. Vor allem in den Sommermonaten verzeichneten 1 bis 2 der Messstellen in Kluft-Grundwasserleitern bzw. 1 bis 3 der Messstellen in Karst-Grundwasserleitern eine steigende Tendenz.

### Grundwasserregime

In Lockergesteins-Grundwasserleitern traten zudem unterschiedliche Tendenzen je nach Grundwasserregime auf. Eher konstant bzw. steigend war die Grundwassertemperatur zwischen 2000 und 2016 an Messstellen, die von einem Fluss mit einem Einzugsgebiet im Jura und im Mittelland (pluviales Regime) bzw. in den Voralpen (pluvio-nivales Regime) beeinflusst sind. In Lockergesteins-Grundwasserleitern, in welche Flüsse aus den Alpen (nivo-glaziales Regime) infiltrieren, wurden dagegen auch sinkende Tendenzen der Grundwassertemperatur beobachtet (Abb. 7.2).

## 7.5 Analyse

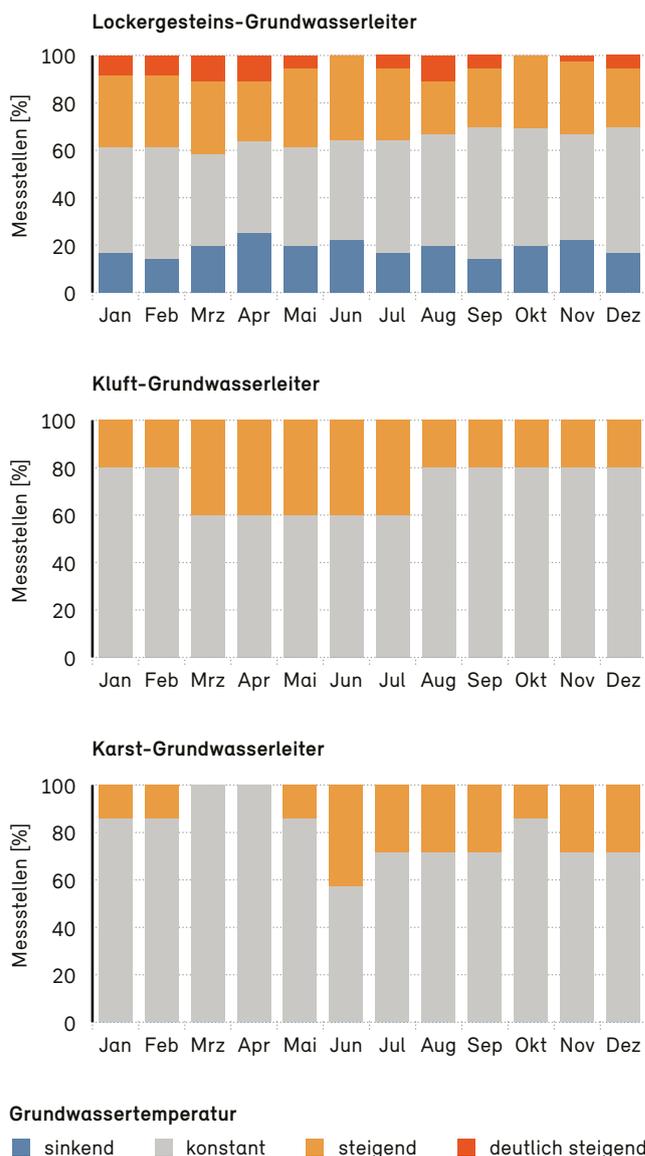
### Exemplarische Standorte

Mit dem vorliegenden Datensatz ist keine landesweit statistisch belastbare und repräsentative Analyse der Grundwassertemperatur und ihrer Entwicklung möglich. Jedoch lassen sich anhand der für die Schweiz exemplarischen Standorte die verschiedenen natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren aufzeigen. Naturraum, Höhenlage, Klima, Exposition, Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung sowie Boden- und Untergrundnutzung wirken sich auf die Wassertemperatur in oberflächennahen Grundwasservorkommen aus.

Abbildung 7.4

Langfristige Entwicklung der Grundwassertemperatur im Jahresverlauf (2000 bis 2016) in Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleitern

Grundlage: Mittelwert pro NAQUA-Messstelle und Monat. Grundwassertemperatur sinkend:  $\leq -0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; konstant:  $> -0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; steigend:  $\geq 0,2\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$  und  $< 0,6\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ ; deutlich steigend:  $\geq 0,6\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ Jahre}$ . Berücksichtigt wurden die 48 Messstellen, an denen die Grundwassertemperatur in diesem Zeitraum jährlich aufgezeichnet wurde. Messstellen je Grundwasserleitertyp: Lockergesteins-Grundwasserleiter: 36 Mst., Kluft-Grundwasserleiter: 5 Mst., Karst-Grundwasserleiter: 7 Mst.



### **Einfluss Naturraum und Nutzung**

In den verschiedenen Regionen der Schweiz fallen diese Faktoren unterschiedlich stark ins Gewicht. Im Mittelland liegen die ergiebigen flussgebundenen Grundwasservorkommen in den Talsohlen – ebenso wie die urbanen Zentren und Verkehrswege. Darum ist hier das Potenzial einer anthropogenen Veränderung der Grundwassertemperatur am höchsten. Der Jura und der alpine Raum weisen eine deutlich geringere Besiedlungsdichte auf. Dafür ist das Relief stärker ausgeprägt, und die Witterungsverhältnisse sind somit extremer als im Mittelland. Die Alpensüdseite ist gekennzeichnet durch urbane Zentren und Verkehrswege in den Talebenen, ein ausgeprägtes Relief sowie ausgeprägte Perioden mit Starkniederschlägen.

### **Höhenlage entscheidend**

Die langjährige mittlere Grundwassertemperatur wird in erster Linie durch die Höhenlage der Einzugsgebiete der einzelnen Messstellen bestimmt. Sie spiegelt die mittlere jährliche Lufttemperatur im Einzugsgebiet der Messstellen wider. Mit unter 10 °C am tiefsten ist die Grundwassertemperatur im Jura (mittlere Höhenlage: 500 bis 1150 m ü. M.) und in den Alpen (800 bis 1900 m ü. M.). Im Mittelland (500 bis 850 m ü. M.) liegt sie zwischen 10 und 13 °C.

### **Oberflächeneinfluss von Bedeutung**

Grundwasser, welches aufgrund seiner hydrogeologischen Eigenschaften relativ direkt mit der Oberfläche in Kontakt steht, wie z.B. flussgebundene Lockergesteins-Grundwasserleiter, reagieren meist deutlicher auf externe Temperatureinflüsse als isolierte oder tiefer liegende Grundwasservorkommen.

### **Unterschiedliche anthropogene Einflüsse erkennbar**

An einzelnen Messstellen, v. a. in Lockergesteins-Grundwasserleitern der Talsohlen, ist die Grundwassertemperatur infolge anthropogener Aktivitäten erhöht. So sind etwa hohe Grundwassertemperaturen in dicht besiedelten Gebieten, wie z. B. im Raum Basel, auf Infrastrukturen und Einbauten ins Grundwasser zurückzuführen (Epting et al. 2017). Andere direkte Einwirkungen im urbanen Raum können auch einen gegenläufigen Effekt haben, wie etwa der Wärmeentzug durch geothermische Nutzung des Untergrunds.

### **Kein grossräumiger Anstieg**

Ein signifikanter, grossräumiger Anstieg der Grundwassertemperatur – wie dies infolge der Klimaänderung erwartet werden könnte und z. B. regional in Österreich beobachtet wird (Umweltbundesamt 2011) – lässt sich in der Schweiz bislang nicht erkennen. Dies schliesst nicht aus, dass lokal die Grundwassertemperatur über mehrere Jahre ansteigt. Andererseits kann in Grundwasservorkommen mit nivo-glazialen Grundwasserregime eine klimabedingt verstärkte Gletscherschmelze mittelfristig zu einem Rückgang der Grundwassertemperatur führen, wenn durch das Schmelzwasser die Temperatur der ins Grundwasser infiltrierenden Fließgewässer sinkt. Ende der 1980er-Jahre ist die Grundwassertemperatur zudem vielerorts sprunghaft gestiegen, da sich die Arktische Oszillation und damit das Klima in weiten Teilen der nördlichen Hemisphäre abrupt geändert haben (Figura et al. 2011). Solche Phänomene sind bei der Interpretation der Entwicklung der Grundwassertemperatur ebenfalls zu berücksichtigen.

### **Lange Datenreihen von grossem Wert**

Die Datenreihen von NAQUA zur Grundwassertemperatur der letzten rund 15 Jahre sind jedoch noch zu kurz für fundierte Aussagen zu möglichen Auswirkungen der Klimaänderung und weiterer anthropogener Faktoren auf die Grundwassertemperatur. Wie sich diese mittel- bis längerfristig auf die Grundwassertemperatur auswirken, werden die Erhebungen der nächsten Jahre zeigen. Die Grundwassertemperatur ist daher auch in Zukunft Bestandteil des Langzeitmonitorings von NAQUA. Zusätzlich zu den NAQUA-Daten wurden in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie SGH punktuell lange Datenreihen zur Grundwassertemperatur bei Gemeinden und Wasserversorgungen erhoben und digital gesichert (Schürch et al. 2018).

### **Hohe Messgenauigkeit erforderlich**

Die Schwankung der Grundwassertemperatur im Jahresverlauf bzw. deren langjährige Entwicklung waren in der Vergangenheit an einigen Messstellen geringer als die Präzision der verwendeten Messsonden von  $\pm 0,2$  °C. Neue Sonden müssen eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,1$  °C erreichen, um auch geringe Variationen der Grundwassertemperatur erfassen zu können. Dazu werden die NAQUA-Messstellen im Rahmen der «Technischen Erneuerung der Hydrologischen Messnetze» mit neuen Sonden ausgerüstet.

## 8 Hauptinhaltsstoffe

### 8.1 Grundlagen

#### Milligramm pro Liter

Chemische Elemente, die im Wasser in Konzentrationen von Milligramm pro Liter (mg/l) auftreten, werden als Hauptinhaltsstoffe bezeichnet. Zu den Hauptinhaltsstoffen gehören primär die Kationen *Calcium*, *Magnesium*, *Natrium*, *Kalium*, die Anionen *Hydrogenkarbonat*, *Sulfat*, *Chlorid*, *Nitrat* (Kap. 10) sowie *Silizium*.

#### Löslichkeit und Grundwasserverweilzeiten

Die Konzentration der einzelnen Hauptinhaltsstoffe im Grundwasser wird durch die Wechselwirkung des Sickerwassers mit den Bodenpartikeln und die Reaktion des Grundwassers mit dem Gestein bestimmt. Ausschlaggebend ist eine Vielzahl von Faktoren, insbesondere die Art des Gesteins bzw. die Löslichkeit der einzelnen Minerale und die Verweilzeit des Wassers im Untergrund. Darüber hinaus können einzelne Hauptinhaltsstoffe auch aus anthropogenen Quellen ins Grundwasser gelangen,

wie z. B. aus Dünger, Streusalz, häuslichem bzw. industriellem Abwasser sowie Deponiesickerwässern.

#### Elektrische Leitfähigkeit als Mass für Mineralisation

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Mass für die gesamthaft im Wasser gelösten Kationen und Anionen. Je höher die elektrische Leitfähigkeit, desto mehr Ionen sind im Wasser gelöst.

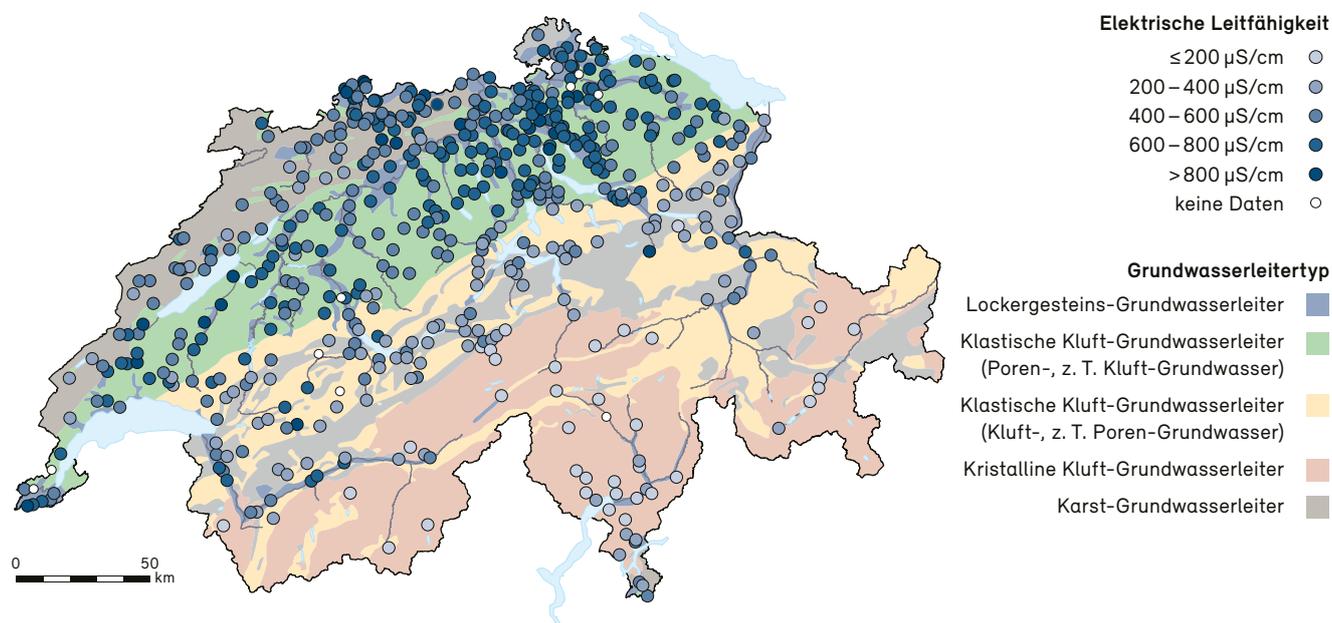
#### GSchV: 40 mg/l für Sulfat und Chlorid

Für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, gilt nach Anhang 2 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) eine numerische Anforderung von je 40 mg/l *Sulfat* bzw. *Chlorid*; ausgenommen sind erhöhte Werte aufgrund natürlicher Verhältnisse. Für *Calcium*, *Magnesium*, *Natrium*, *Kalium* und *Kieselsäure* führt die Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004) Indikatorwerte auf, die potenziell auf eine problematische anthropogene Belastung des Grundwassers hinweisen.

Abbildung 8.1

Elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers (2007 bis 2014) und Grundwasserleitertyp

Mittelwert pro NAQUA-Messstelle.



## 8.2 Datenerhebung

### Hauptinhaltsstoffe im Modul TREND

Die verschiedenen Hauptinhaltsstoffe werden seit 1997 an den 50 Messstellen des Moduls TREND (Kap. 3) analysiert. Pro Messstelle wurden von 2007 bis 2014 jeweils 2 bis 4 Proben pro Jahr entnommen. Seither werden Hauptinhaltsstoffe an diesen Messstellen zweimal pro Jahr untersucht.

### Elektrische Leitfähigkeit – landesweite Daten

Die elektrische Leitfähigkeit wird sowohl an den 50 Messstellen des Moduls TREND als auch an den knapp 500 Messstellen des Moduls SPEZ gemessen. An allen Messstellen werden 1 bis 4 Messungen pro Jahr vor Ort bzw. im Labor durchgeführt. An den Messstellen des Moduls TREND wird die elektrische Leitfähigkeit zudem kontinuierlich aufgezeichnet.

### Statistik – Mittel- und Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren jeweils auf dem Mittelwert der Konzentration der einzelnen Hauptinhaltsstoffe pro Messstelle für den Zeitraum von 2007 bis 2016. Eine Ausnahme bildet die elektrische Leitfähigkeit, für welche der Mittelwert der vorhandenen, validierten Daten bis und mit 2014 pro Messstelle herangezogen wird. Ein Vergleich mit den numerischen Anforderungen der GSchV erfolgt anhand des entsprechenden Maximalwerts der Konzentrationen pro Messstelle für die Jahre 2007 bis 2016.

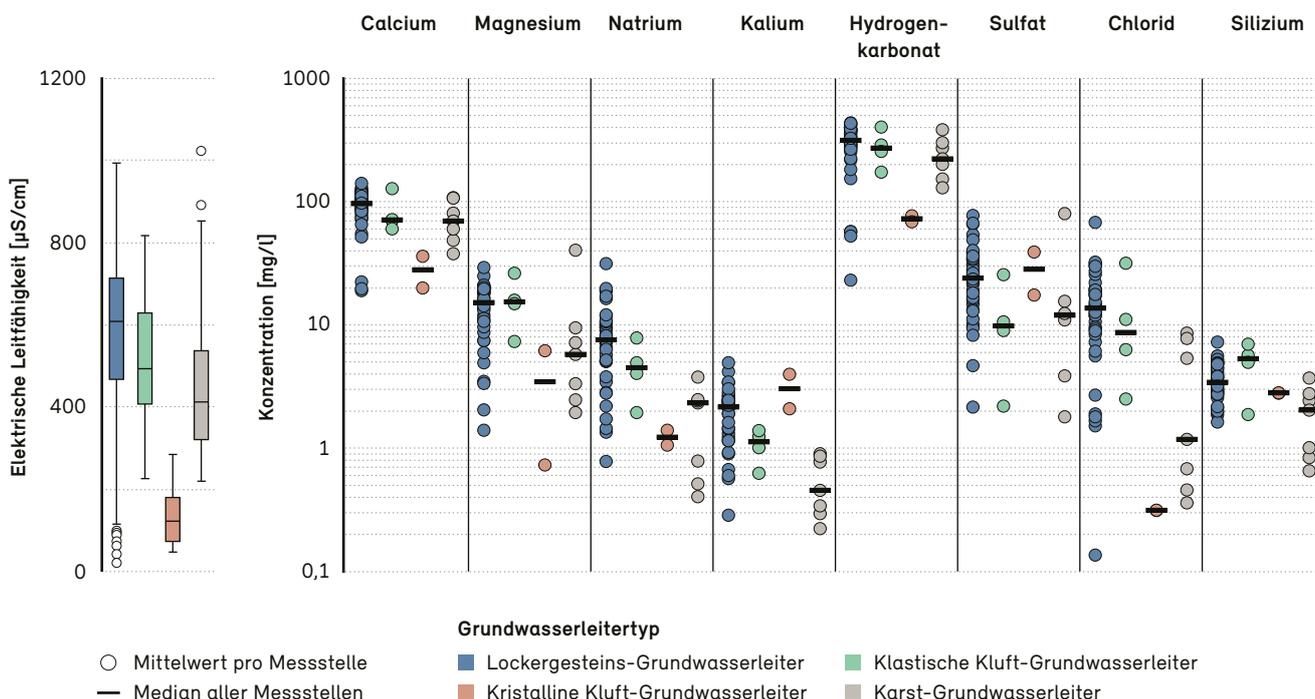
## 8.3 Zustand

### Elektrische Leitfähigkeit und Grundwasserleitertypen

Die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers lag landesweit zwischen 20 und 1020  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Eine niedrige elektrische Leitfähigkeit von weniger als 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  trat

Abbildung 8.2

**Elektrische Leitfähigkeit (2007 bis 2014) und Hauptinhaltsstoffe (2007 bis 2016) im Grundwasser in Relation zum Grundwasserleitertyp**  
 Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit und der Konzentration der einzelnen Hauptinhaltsstoffe pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Grundwasserleitertyp: Lockergesteins-Grundwasserleiter: 363 Mst. (elektr. Leitfähigkeit) bzw. 37 Mst. (Hauptinhaltsstoffe); klastische Kluft-Grundwasserleiter: 54 bzw. 4 Mst.; kristalline Kluft-Grundwasserleiter: 18 bzw. 2 Mst.; Karst-Grundwasserleiter: 101 bzw. 7 Mst.



in den kristallinen Kluft-Grundwasserleitern der Alpen und der Alpensüdseite auf, eine hohe elektrische Leitfähigkeit von über 600 µS/cm vor allem in den Lockergesteins-Grundwasserleitern des Mittellands (Abb. 8.1 und Abb. 8.2). In klastischen Kluft-Grundwasserleitern (z.B. Molassesandsteine oder Bündnerschiefer) und in Karst-Grundwasserleitern lag die elektrische Leitfähigkeit im Allgemeinen zwischen 200 und 600 µS/cm.

**Hauptinhaltsstoffe und Grundwasserleitertypen**

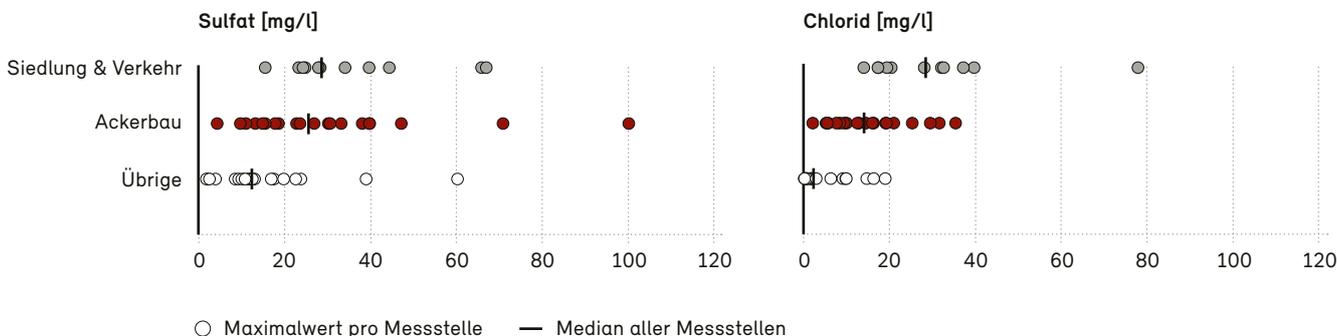
Die Konzentrationen von *Calcium* und *Hydrogenkarbonat* lagen generell zwischen 10 und 400 mg/l, von *Mag-*

*nesium, Natrium, Sulfat* und *Chlorid* zwischen 0,1 und 100 mg/l sowie von *Kalium* und *Silizium* bei weniger als 10 mg/l (Abb. 8.2). *Calcium* und *Hydrogenkarbonat* wiesen insbesondere in Lockergesteins- und klastischen Kluft-Grundwasserleitern sowie in Karst-Grundwasserleitern hohe Konzentrationen auf (Abb. 8.2). Neben *Calcium* und *Hydrogenkarbonat* waren in klastischen Kluft-Grundwasserleitern auch die Konzentrationen an *Magnesium* und *Silizium* ähnlich hoch wie in Lockergesteins-Grundwasserleitern.

**Abbildung 8.3**

**Sulfat und Chlorid im Grundwasser (2016) in Relation zur Hauptbodennutzung**

Maximalwert der Sulfat- und Chlorid-Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 11 Mst.; Ackerbau: 20 Mst.; Übrige: 19 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle.



**Tabelle 8.1**

**Chlorid und Sulfat im Grundwasser (2007 bis 2016) in Relation zur numerischen Anforderung GSchV**

Grundlage: Maximalwert der Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. 50 Messstellen des Moduls TREND (ausser 2008 und 2009: 49 Mst.).

| Hauptinhaltsstoff | Ursprung           | Messstellen [Anzahl]    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
|-------------------|--------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|                   |                    | Konzentration > 40 mg/l |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
|                   |                    | 2007                    | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2007–2016 |
| Chlorid           |                    | 1                       | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 1    | 1    | 1    | 3         |
| Sulfat            | total              | 12                      | 12   | 8    | 10   | 10   | 12   | 12   | 8    | 9    | 7    | 15        |
|                   | primär anthropogen | 3                       | 3    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 2    | 2    | 1    | 3         |
|                   | primär geogen      | 9                       | 9    | 6    | 8    | 8    | 10   | 9    | 6    | 7    | 6    | 12        |

Numerische Anforderung GSchV: 40 mg/l (natürliche Verhältnisse ausgenommen)

### Sulfat und Chlorid – GSchV vereinzelt überschritten

Die numerische Anforderung der GSchV von 40 mg/l für *Sulfat* und *Chlorid* wurde 2007 bis 2016 an nahezu allen Messstellen eingehalten. 2016 wurde sie lediglich an einer Messstelle überschritten (Tab. 8.1). In den Jahren zuvor überschritten *Chlorid* bzw. *Sulfat* an 1 bis 2 weiteren Messstellen die numerische Anforderung. Pro Jahr traten zudem an weiteren 6 bis 10 Messstellen *Sulfat*-Konzentrationen von über 40mg/l auf, welche jedoch ausschliesslich bzw. überwiegend natürlichen Ursprungs bzw. geogen sind und somit keine Überschreitung der numerischen Anforderung der GSchV darstellen.

### Sulfat und Chlorid – bei Siedlung und Ackerbau erhöht

Die durchschnittlich höchsten *Sulfat*- und *Chlorid*-Konzentrationen wiesen Messstellen auf, deren Einzugsgebiet von der Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» geprägt ist (Abb. 8.3). Auch an Messstellen, die mit Hauptbodennutzung «Ackerbau» klassiert sind, lagen die Konzentrationen im Schnitt höher als an den übrigen Messstellen.

## 8.4 Entwicklung

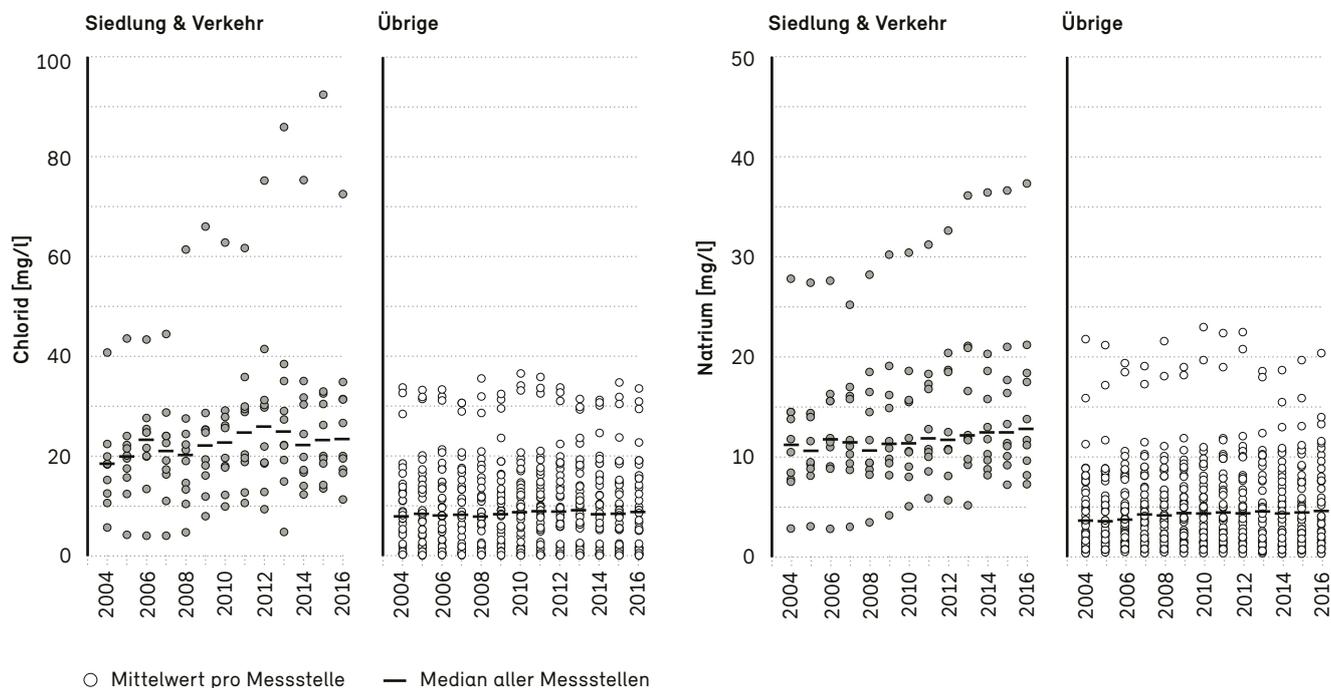
### Chlorid und Natrium – Anstiege bei Siedlungen

Während bei der elektrischen Leitfähigkeit und den meisten Hauptinhaltsstoffen kein signifikanter langfristiger Trend erkennbar ist, war die zeitliche Entwicklung der *Chlorid*- und weniger ausgeprägt auch der *Natrium*-Konzentrationen v.a. im Siedlungsgebiet auffällig: Nachdem die *Chlorid*-Konzentrationen an den meisten Messstellen, deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» geprägt ist, von 2004 bis 2006 leicht gestiegen waren, sind sie 2007 und 2008 gesunken, anschliessend bis 2012 gestiegen und danach wieder gesunken (Abb. 8.4). An Messstellen mit anderen Hauptbodennutzungen war diese Entwicklung nur sehr abgeschwächt zu beobachten.

Abbildung 8.4

### Chlorid und Natrium im Grundwasser (2004 bis 2016) in Relation zur Hauptbodennutzung

Mittelwert der *Chlorid*- und *Natrium*-Konzentrationen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. Berücksichtigt wurden ausschliesslich Messstellen, die in diesem Zeitraum jeweils mindestens einmal pro Jahr beprobt wurden. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 10 Mst., Übrige: 38 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle.



## 8.5 Analyse

### 8.5.1 Geogene Einflüsse

#### Exemplarische Standorte

Das Grundwasser weist je nach Grundwasserleitertyp und Geologie charakteristische Werte für die elektrische Leitfähigkeit und die einzelnen Hauptinhaltsstoffe auf (Abb. 8.1, Abb. 8.2). Eine landesweit statistisch belastbare Analyse ist allerdings nur für die elektrische Leitfähigkeit möglich. Für die anderen Parameter basieren die Resultate in Anbetracht der geringen Anzahl an Messstellen lediglich auf einer Analyse an für das Grundwasser der Schweiz typischen Einzelstandorten.

#### Lockergesteins-Grundwasserleiter

In Lockergesteins-Grundwasserleitern sind die Konzentrationen an Hauptinhaltsstoffen und damit die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers vergleichsweise hoch. Dies ist zum einen bedingt durch die geringeren Fließgeschwindigkeiten und damit längeren Verweilzeiten in Lockergesteinen sowie die grosse Kontaktfläche zwischen dem Wasser und dem Gestein (Kap. 4). Zum anderen sind v. a. die Lockergesteine im Mittelland karbonatreich und deshalb generell gut löslich. Weiterhin liegen diese Grundwasserleiter mehrheitlich in tieferen Lagen, in denen Grundwassertemperatur (Kap. 7) und Bodenaktivität in gut entwickelten Böden vergleichsweise hoch sind. Dies führt zu erhöhter Konzentration von Kohlendioxid im Sickerwasser und dadurch zu einer beschleunigten Karbonatlösung im Grundwasser. Besteht der Lockergesteins-Grundwasserleiter dagegen vorwiegend aus schwerlöslichen kristallinen Gesteinen, wie z. B. in der Leventina im Tessin, so sind die Konzentrationen an Hauptinhaltsstoffen und die elektrische Leitfähigkeit im Grundwasser niedriger. An flussnahen Messstellen führt die Infiltration von geringer mineralisiertem Flusswasser in der Regel zu tieferen Werten der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers.

#### Kristalline Kluft-Grundwasserleiter

Grundwasser in kristallinen Kluftgesteinen weist die geringsten Konzentrationen an Hauptinhaltsstoffen und die niedrigsten Werte für die elektrische Leitfähigkeit auf. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass solche Grundwasserleiter vorwiegend aus schwerlöslichen kris-

tallinen Gesteinen bestehen und das Grundwasser hier in einem Netz von Klüften vergleichsweise schnell fliesst (Kap. 4). Andererseits weist das Grundwasser durch die höhere Lage der Einzugsgebiete (> 1200 m ü. M.) eine entsprechend tiefere Wassertemperatur auf, was ebenfalls eine geringere Mineralisation des Grundwassers zur Folge haben kann.

#### Klastische Kluft-Grundwasserleiter

Grundwasser in klastischen Kluft-Grundwasserleitern mit einem hohen Porenanteil, wie z. B. Molassesandsteinen, weist eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit auf als Grundwasser in kristallinen Kluft-Grundwasserleitern. Neben hohen Fließgeschwindigkeiten entlang der Klüfte fliesst das Grundwasser dort zusätzlich auch langsam durch die Poren der Sandsteine (Kap. 4). Durch die grössere Kontaktfläche sowie die längere Verweilzeit können sich mehr Mineralstoffe aus dem Gestein lösen. Da solche Gesteine meist hohe Karbonat- und Silikatgehalte aufweisen, enthält das Grundwasser ähnlich hohe Konzentrationen an *Calcium*, *Magnesium*, *Hydrogenkarbonat* und *Silizium* wie Grundwasser in Lockergesteins-Grundwasserleitern.

#### Karst-Grundwasserleiter

Karst-Grundwasserleiter bestehen aus karbonatischen oder evaporitischen Gesteinen, wie Kalkstein, Dolomit oder Gips/Anhydrit. Karst-Grundwasser besitzt dementsprechend einen hohen Anteil an *Calcium* und *Hydrogenkarbonat* bzw. an *Sulfat*. Aufgrund sehr kurzer Verweilzeiten eines erheblichen Teils des Wassers im verkarsteten Untergrund (Kap. 4) und der Zusammensetzung des Gesteins weist Karst-Grundwasser trotz der generell guten Löslichkeit mit Ausnahme von *Calcium* und *Hydrogenkarbonat* eher geringe Konzentrationen an Hauptinhaltsstoffen und nur eine mittlere elektrische Leitfähigkeit auf.

### 8.5.2 Anthropogene Einflüsse

An den allermeisten Messstellen wird die Konzentration der Hauptinhaltsstoffe durch das Gestein im Untergrund bestimmt, ist also geogen. Lediglich an 4 der 50 Messstellen lassen sich von 2007 bis 2016 erhöhte Konzentrationen an *Sulfat* und/oder *Chlorid* erkennen, die grösstenteils auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind.

---

### **Sulfat – Mineraldünger, Kanalisationen, Deponien**

Bei den 3 Messstellen, an denen die *Sulfat*-Konzentration die numerische Anforderung der GSchV von 40 mg/l von 2007 bis 2016 mindestens einmal überschritt, handelt es sich um Messstellen im Landwirtschafts- oder Siedlungsgebiet. Mögliche anthropogene Quellen für *Sulfat* sind schwefelhaltige Mineraldünger, undichte Kanalisationen und Deponien sowie Aufschüttungen mit erhöhtem Bauschuttanteil.

### **Chlorid – Streusalz**

*Chlorid* gelangt anthropogen in erster Linie im Winter über die Versickerung von mit Streusalz belastetem Strassenabwasser ins Grundwasser. Der Konzentrationsverlauf von *Chlorid* an Messstellen im Siedlungsgebiet (Abb. 8.4) stimmt weitgehend mit den jährlichen mittleren Wintertemperaturen und dem Absatz von Streusalz (Schweizer Salinen 2017) überein: Kältere Winter gehen jeweils mit einem höheren Verbrauch von Streusalz und einer Zunahme der *Chlorid*-Konzentration im Grundwasser einher. Während *Chlorid* praktisch vollständig aus dem Boden ausgewaschen wird und folglich ungehindert ins Grundwasser gelangt, wird *Natrium* teilweise in der ungesättigten Zone zurückgehalten. Daher schwanken die *Natrium*-Konzentrationen weniger ausgeprägt als die *Chlorid*-Konzentrationen.

### **8.5.3 Monitoring**

#### **Pilotstudie «Hauptinhaltsstoffe» 2018/2019**

Um die bisher statistisch wenig belastbare Datengrundlage für Hauptinhaltsstoffe zu verbessern, findet 2018 und 2019 eine entsprechende Pilotstudie an den knapp 500 Messstellen des Moduls SPEZ statt.

## 9 Spurenelemente

### 9.1 Grundlagen

#### Nanogramm bis Mikrogramm pro Liter

Chemische Elemente, die in sehr geringen Konzentrationen natürlicherweise in der Erdkruste vorkommen, werden als Spurenelemente bezeichnet. Im Grundwasser treten Spurenelemente in der Regel in Konzentrationen von Nanogramm pro Liter (ng/l) oder Mikrogramm pro Liter ( $\mu\text{g/l}$ ) auf.

#### Hauptsächlich geogene Quellen

Spurenelemente gelangen hauptsächlich durch die Verwitterung von Gesteinen ins Grundwasser. Da die einzelnen Elemente zudem in vielen Alltagsprodukten zum Einsatz kommen, können sie auch anthropogen in die Umwelt eingetragen werden. Ins Grundwasser gelangen sie dann entweder durch Infiltration von Flusswasser, das gereinigtes Abwasser oder Abwasser aus Regenwasserüberläufen enthält, durch Einsatz von Hof- und Mineraldüngern oder punktuell durch defekte Kanalisations- oder Altlasten und Deponien. Ausserdem können einzelne Spurenelemente mit dem Niederschlag von Dächern, Plätzen und Strassen, insbesondere über Versickerungsanlagen ohne Bodenfilter, ins Grundwasser gelangen.

#### Wegleitung Grundwasserschutz: Indikatorwerte

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) enthält keine spezifischen numerischen Anforderungen für Spurenelemente im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist. Das Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Die Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004) führt für einzelne Spurenelemente Indikatorwerte auf (Tab. 9.1), die potenziell auf eine problematische anthropogene Belastung des Grundwassers hinweisen; ausgenommen sind erhöhte Werte aufgrund natürlicher (geogener) Verhältnisse. Für *Antimon* und *Uran*, die in der Wegleitung Grundwasserschutz nicht aufgeführt sind, gilt gemäss Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) ein Höchstwert für Trinkwasser von  $5\mu\text{g/l}$  bzw.  $30\mu\text{g/l}$ . Alle Höchstwerte der TBDV gelten durch den

Verweis der GSchV auf die TBDV auch als numerische Anforderungen der GSchV für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser.

### 9.2 Datenerhebung

#### Spurenelemente im Modul TREND

Spurenelemente werden seit 1997 an den 50 Messstellen des Moduls TREND (Kap. 3) analysiert. Pro Messstelle wurde von 2007 bis 2014 jeweils eine Probe pro Jahr entnommen (Tab. 9.1). Seither werden Spurenelemente nur noch alle 4 Jahre untersucht. Die Bestimmungsgrenze liegt für die einzelnen Spurenelemente jeweils bei 0,2 bis  $10\mu\text{g/l}$ .

#### 3 Pilotstudien

Zusätzlich fanden an den 50 Messstellen des Moduls TREND zwischen 2006 und 2012 insgesamt 3 Pilotstudien zu Spurenelementen statt, bei denen die Bestimmungsgrenzen um bis zu zwei Grössenordnungen tiefer lagen als im Langzeitmonitoring. Im Rahmen der Pilotstudien wurden zudem Spurenelemente analysiert, die bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Rahmen des Moduls TREND untersucht worden waren (Tab. 9.1). Während der Pilotstudie «Antimon» (2006/2007) wurden die Messstellen je einmal auf *Antimon* sowie weitere 12 Spurenelemente analysiert. Während der Pilotstudie «Spurenelemente» (2007/2008) und der Pilotstudie «Natürliche Radioaktivität und Spurenelemente» (2012) wurden je 2 Proben pro Messstelle auf jeweils ca. 20 verschiedene Spurenelemente untersucht.

#### Qualitätssicherung bei Probenahme

Um eine Verunreinigung der Proben durch die in den Wasserfassungen verwendeten Werkstoffe zu verhindern, wurden die Proben für die Analytik der Spurenelemente, wenn möglich mithilfe einer speziellen Pumpe, direkt aus den Förderbrunnen entnommen. 2 Messstellen, die nicht auf diese Art beprobt werden konnten und bei denen sich eine Verfälschung der Ergebnisse durch feuerverzinkte Installationen nicht ausschliessen liess, blieben bei der statistischen Auswertung der Zink-Daten unberücksichtigt.

Tabelle 9.1

## Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Spurenelemente pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND (ausser Zink: 48 Mst.). Langzeitmonitoring und Pilotstudien.

| Spurenelement                       | Langzeit-<br>monitoring     | Pilotstudie |      |           | Bestimmungs-<br>grenze | Messstellen [Anzahl] |            |               | Indikator-<br>wert*  |        |    |        |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------|------|-----------|------------------------|----------------------|------------|---------------|----------------------|--------|----|--------|
|                                     |                             | Start       | Ende | 2006/2007 |                        | 2007/2008            | 2012       | Konzentration |                      |        |    |        |
|                                     |                             |             |      |           | [µg/l]                 | beprob               | <BG        | ≥BG           | >Indikator-<br>wert* | [µg/l] |    |        |
| <b>Alkali- und Erdalkalimetalle</b> |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Barium                              | <sup>56</sup> Ba            | 1997        |      | –         | x                      | –                    | 0,2–10     | 50            | –                    | 50     | –  | 500*** |
| Beryllium                           | <sup>4</sup> Be             | 1997        |      | –         | –                      | –                    | 1          | 50            | 50                   | –      | /  | /      |
| Lithium                             | <sup>3</sup> Li             | 1997        |      | –         | x                      | x                    | 0,0001–1   | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Strontium                           | <sup>38</sup> Sr            | 1997        |      | –         | –                      | –                    | 10         | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| <b>(Übergangs-)metalle</b>          |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Blei                                | <sup>82</sup> Pb            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–2     | 50            | 10                   | 40     | 2  | 1**    |
| Cadmium                             | <sup>48</sup> Cd            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,005–0,2  | 50            | 18                   | 32     | 2  | 0,05** |
| Chrom                               | <sup>24</sup> Cr            | 1997        |      | x         | x                      | –                    | 0,07–0,1   | 50            | 1                    | 49     | 4  | 2      |
| Gallium                             | <sup>31</sup> Ga            | –           |      | –         | –                      | x                    | 0,002      | 50            | 5                    | 45     | /  | /      |
| Kobalt                              | <sup>27</sup> Co            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–1     | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Kupfer                              | <sup>29</sup> Cu            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–2     | 50            | –                    | 50     | 12 | 2**    |
| Molybdän                            | <sup>42</sup> Mo            | 1997        | 2000 | x         | –                      | –                    | 0,01       | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Nickel                              | <sup>28</sup> Ni            | 1997        |      | –         | x                      | x                    | 0,09–1     | 50            | 1                    | 49     | –  | 5**    |
| Scandium                            | <sup>21</sup> Sc            | –           |      | –         | x                      | –                    | 0,06       | 50            | 48                   | 2      | /  | /      |
| Thallium                            | <sup>81</sup> Tl            | 1997        | 2000 | –         | x                      | –                    | 0,07       | 50            | 49                   | 1      | /  | /      |
| Thorium                             | <sup>90</sup> Th            | –           |      | –         | –                      | x                    | 0,001      | 50            | 24                   | 26     | /  | /      |
| Titan                               | <sup>22</sup> Ti            | 1997        |      | –         | –                      | –                    | 1          | 50            | 50                   | –      | /  | /      |
| Vanadium                            | <sup>23</sup> V             | 1997        | 1999 | x         | x                      | –                    | 0,01–0,09  | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Yttrium                             | <sup>39</sup> Y             | –           |      | –         | x                      | x                    | 0,001–0,08 | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Zink                                | <sup>30</sup> Zn            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–1     | 48            | –                    | 48     | 15 | 5**    |
| Zinn                                | <sup>50</sup> Sn            | 1997        | 1998 | x         | x                      | x                    | 0,01–0,2   | 50            | 47                   | 3      | /  | /      |
| <b>Halbmetalle</b>                  |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Antimon                             | <sup>51</sup> Sb            | –           |      | x         | x                      | –                    | 0,005–0,06 | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| Arsen                               | <sup>33</sup> As            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–0,5   | 50            | –                    | 50     | 1  | 5      |
| Selen                               | <sup>34</sup> Se            | 1997        |      | x         | x                      | x                    | 0,01–1     | 50            | –                    | 50     | –  | 5      |
| <b>Lanthanoide</b>                  |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Cer                                 | <sup>58</sup> Ce            | –           |      | –         | x                      | x                    | 0,002–0,02 | 50            | 14                   | 36     | /  | /      |
| Lanthan                             | <sup>57</sup> La            | –           |      | –         | x                      | x                    | 0,001–0,01 | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| <b>Actinoide</b>                    |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Uran                                | <sup>92</sup> U             | –           |      | x         | x                      | x                    | 0,001–0,05 | 50            | –                    | 50     | /  | /      |
| <b>Halogene</b>                     |                             |             |      |           |                        |                      |            |               |                      |        |    |        |
| Fluorid                             | <sup>9</sup> F <sup>-</sup> | 1997        |      | –         | –                      | –                    | 0,01       | 50            | –                    | 50     | –  | 500*** |

BG Bestimmungsgrenze

\* Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004)

\*\* in gelöster Form

\*\*\* mehr als im naturnahen Zustand

/ kein Indikatorwert vorhanden

### Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren jeweils auf dem Maximalwert der Konzentration der einzelnen Spurenelemente pro Messstelle. Präsentiert und analysiert werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings bis und mit 2014 sowie die Ergebnisse der 3 Pilotstudien.

*Chrom* überschritt den Indikatorwert an 4 Messstellen, *Cadmium* und *Blei* an je 2 Messstellen und *Arsen* an 1 Messstelle (Tab. 9.1, Abb. 9.1). An mehr als der Hälfte der betroffenen Messstellen lagen im Zeitraum von 2006 bis 2014 die Konzentrationen allerdings lediglich bei einer einzigen Probe über diesem Wert. *Barium*, *Nickel*, *Selen* und *Fluor* überschritten die Indikatorwerte der Begleitung Grundwasserschutz an keiner Messstelle.

## 9.3 Zustand

### Indikatorwerte v. a. durch Zink und Kupfer überschritten

Die Indikatorwerte der Begleitung Grundwasserschutz wurden 2006 bis 2014 von 6 verschiedenen Spurenelementen jeweils mindestens einmal überschritten. Am häufigsten lagen die Konzentrationen von *Zink* (15 Messstellen) und *Kupfer* (12 Messstellen) über diesem Wert.

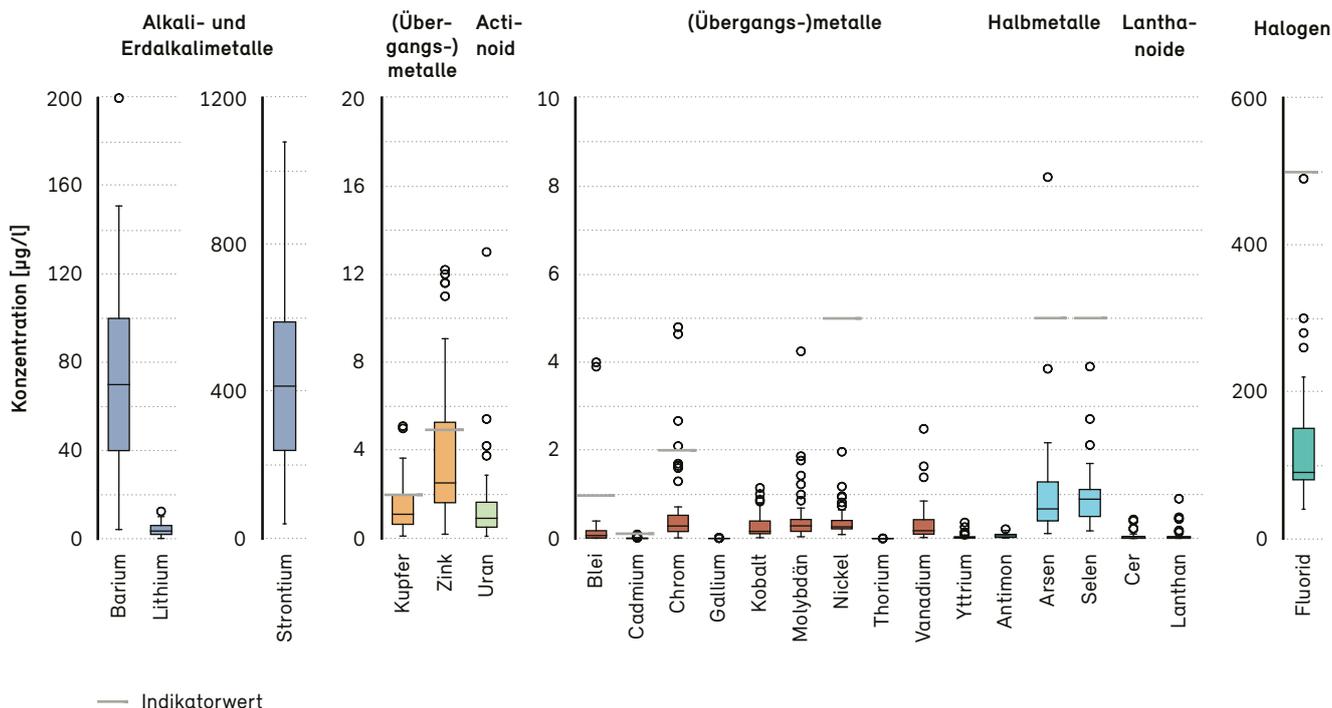
### Antimon und Uran – unterhalb Höchstwert TBDV

Die *Antimon*-Konzentration lag an allen Messstellen unter 0,25 µg/l und damit deutlich unter dem Höchstwert der TBDV von 5 µg/l. *Uran* überschritt den Höchstwert der TBDV von 30 µg/l ebenfalls nicht; in den allermeisten Fällen war die *Uran*-Konzentration geringer als 3 µg/l. Auch die übrigen Spurenelemente überschritten den jeweiligen Höchstwert der TBDV nicht.

Abbildung 9.1

#### Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014)

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Spurenelemente pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND (Ausnahme Zink: 48 TREND-Mst.). Dargestellt sind Spurenelemente, die an mehr als 50 % der Messstellen nachgewiesen wurden. Wurde ein Spurenelement an einer Messstelle nicht nachgewiesen, ist diese Messstelle mit dem Wert der zugehörigen Bestimmungsgrenze berücksichtigt. Indikatorwert: Begleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004).



### Chrom – im westlichen Mittelland leicht erhöht

Während *Kupfer* und *Zink* landesweit, insbesondere an Förderbrunnen, die Indikatorwerte überschritten, traten erhöhte *Chrom*-Konzentrationen fast ausschliesslich im westlichen Mittelland auf (Abb. 9.2).

### Kupfer, Blei, Antimon – bei Siedlungen erhöht

Messstellen, deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» geprägt ist, wiesen tendenziell leicht höhere Konzentrationen von *Kupfer*, *Blei* und *Antimon* auf als die übrigen Messstellen (Abb. 9.3). Eine der höchsten *Antimon*-Konzentrationen wurde allerdings an einer abgelegenen Quelle in den Bündner Alpen detektiert.

### Uran – bei Siedlungen und Ackerbau leicht erhöht

Messstellen, die mit Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» oder «Ackerbau» klassiert sind, wiesen zudem leicht höhere *Uran*-Konzentrationen auf als die übrigen Messstellen (Abb. 9.3). Die höchste *Uran*-Konzentration wurde jedoch an einer im Wald gelegenen Quelle im Wallis ermittelt.

## 9.4 Entwicklung

Anhand der vorliegenden Daten lassen sich keine signifikanten, langfristigen Veränderungen bzw. Tendenzen der Konzentrationen der einzelnen Spurenelemente erkennen.

## 9.5 Analyse

### Natürliche Hintergrundwerte

Die Konzentrationen der analysierten Spurenelemente sind insgesamt gering und spiegeln in erster Linie die natürlichen Hintergrundwerte im Grundwasser wider. Auch verschiedene erhöhte Werte im Mittelland und in den Alpen sind sehr wahrscheinlich geogen. So sind z. B. *Chrom* in der Oberen Meeresmolasse der Westschweiz sowie *Arsen*, *Antimon* und *Uran* im Kristallin des Gotthard- bzw. Aarmassivs natürlicherweise in erhöhten Konzentrationen vorhanden.

Abbildung 9.2

### Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014) sowie Grundwasserleitertyp

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Spurenelemente pro NAQUA-Messstelle. Messstellen des Moduls TREND.

Indikatorwert: Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004).

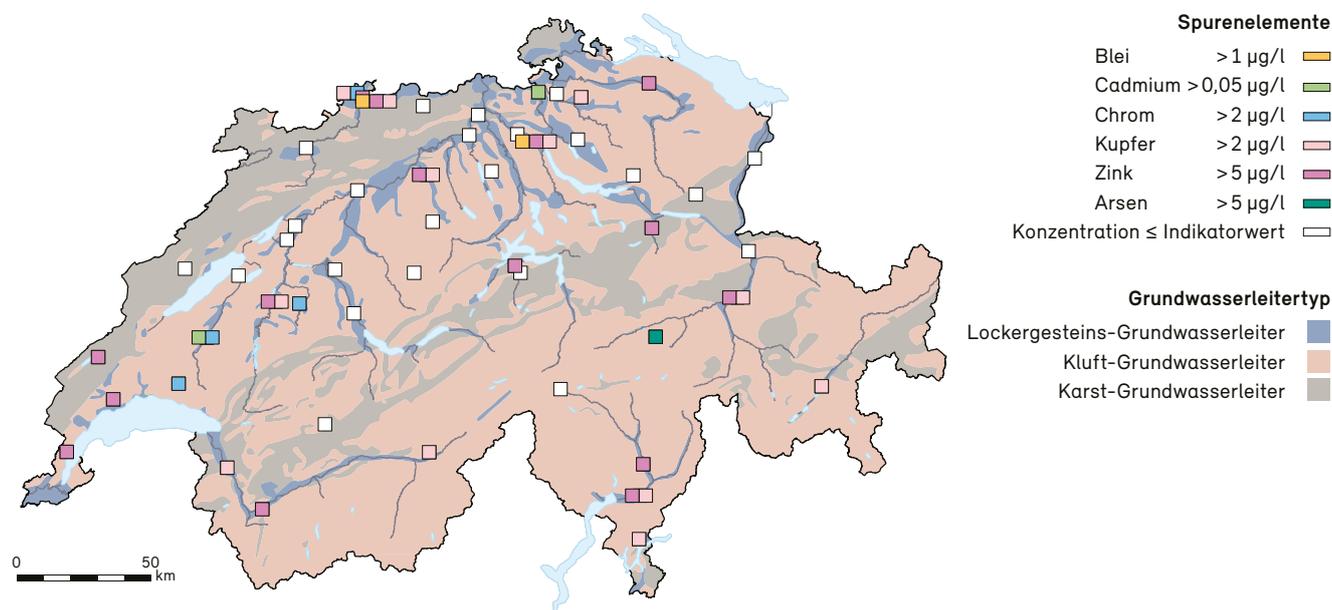
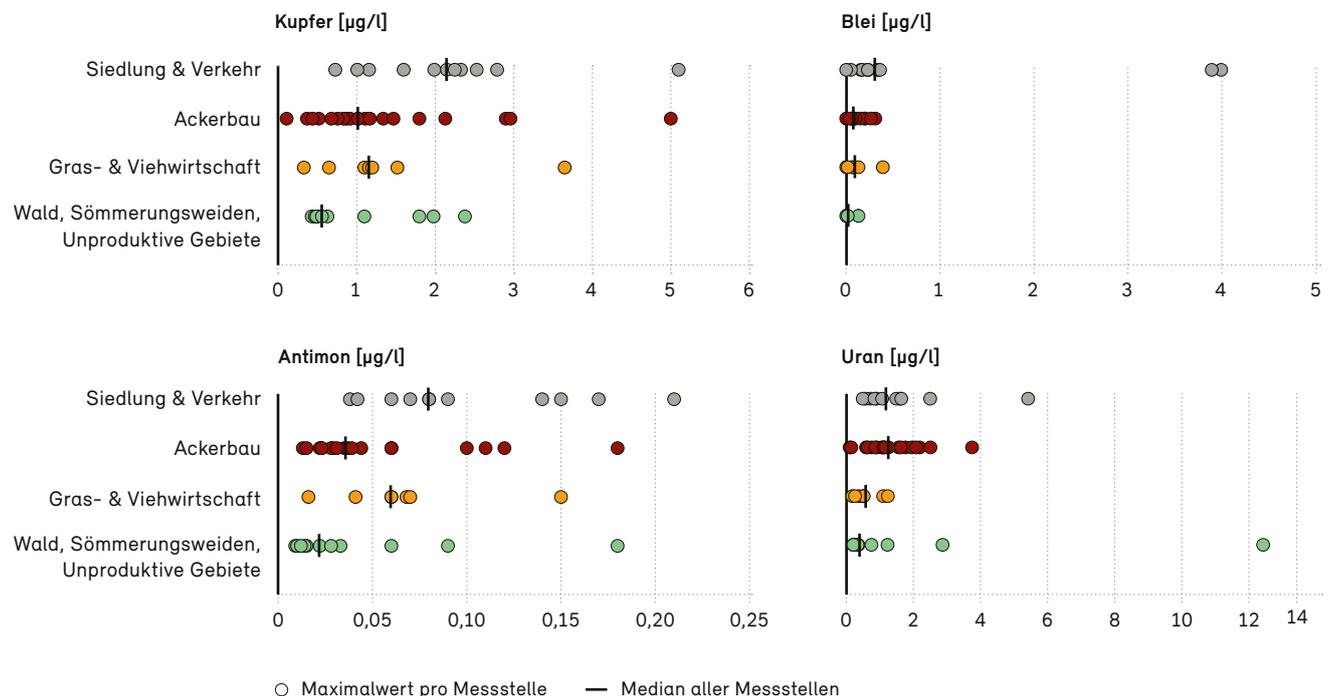


Abbildung 9.3

### Kupfer, Blei (2006 bis 2014), Antimon (2006 bis 2008) und Uran (2006 bis 2008 sowie 2012) im Grundwasser in Relation zur Hauptbodennutzung

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Spurenelemente pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 11 Mst. (Zink: 10 Mst.); Ackerbau: 20 Mst.; Gras- & Viehwirtschaft: 7 Mst.; Wald, Sömmerungsweiden, Unproduktive Gebiete: 11 Mst.

(Zink: 10 Mst.). Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle. Wurde ein Spurenelement an einer Messstelle nicht nachgewiesen, ist diese Messstelle mit dem Wert der zugehörigen Bestimmungsgrenze berücksichtigt.



#### Anthropogene Quellen

Die erhöhten Konzentrationen von *Zink*, *Kupfer*, *Cadmium* und *Blei* sowie in einem Fall von *Chrom* stammen dagegen vermutlich aus anthropogenen Quellen. Vor allem *Kupfer* und *Blei* weisen in besiedelten Gebieten tendenziell höhere Konzentrationen auf als ausserhalb von Siedlungen.

#### Zink, Kupfer, Blei – Gebäude, Verkehrswege, Dünger

*Zink*, *Kupfer* und *Blei* gelangen vor allem von Dächern, Fassaden und Bahnliesen sowie entlang von Strassen (Leitplanken, Abrieb von Bremsen, Reifen und Strassenbelägen) ins Grundwasser. *Zink* und *Kupfer* können zudem auch aus Hofdüngern stammen. Trotz aller Vorsichtsmassnahmen bei der Probenahme lässt sich allerdings nicht vollständig ausschliessen, dass einzelne Analyseergebnisse durch verzinkte Installationen oder

kupfer- bzw. bleihaltige Leitungsteile in den Messstellen verfälscht sind.

#### Cadmium – Düngemittel

*Cadmium* gelangt hauptsächlich durch Emissionen aus der Industrie sowie bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder Abfall in die Atmosphäre. In geringen Konzentrationen ist *Cadmium* auch in Phosphatdüngern enthalten. Die beiden Messstellen, an denen der Indikatorwert der Wegleitung Grundwasserschutz überschritten wird, liegen in einem überwiegend landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet.

### Chrom – belastete Standorte

*Chrom* kann von belasteten Betriebs- oder Deponiestandorten sowie aus undichten Kanalisationen im Siedlungsgebiet ins Grundwasser eingetragen werden.

### Antimon – Siedlungsgebiet

*Antimon*, das vor allem an den 11 Messstellen im Siedlungsgebiet in leicht erhöhten Konzentrationen auftritt (Abb. 9.3), verhält sich in Boden und Grundwasser im Vergleich zu vielen anderen Spurenelementen relativ mobil. *Antimon* ist u.a. in Batterien, Kabeln und Bleimunition enthalten und kommt auch als Katalysator und Stabilisator von Kunststoffen, als Gleitmittel in Bremsbelägen oder als Flammschutzmittel zum Einsatz (Mathys et al. 2007). An 7 der 9 Messstellen, an denen die *Antimon*-Konzentration über  $0,1 \mu\text{g/l}$  liegt, wird gleichzeitig auch der Abwassertracer EDTA im Grundwasser nachgewiesen. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass *Antimon* zumindest teilweise über die Infiltration von abwasserhaltigem Flusswasser oder über undichte Kanalisationen ins Grundwasser gelangt. Auf diesem Weg oder durch direkte Versickerung von Strassenabwasser kann *Antimon* auch als Abrieb von Bremsbelägen ins Grundwasser eingetragen werden. An 3 der insgesamt 7 Messstellen, in deren Einzugsgebiet sich Kugelfänge von Schiessanlagen befinden, tritt *Antimon* in Konzentrationen über  $0,1 \mu\text{g/l}$  im Grundwasser auf. An 2 dieser Messstellen wird auch der Abwassertracer EDTA nachgewiesen.

### Uran – Eintrag aus Phosphatdüngern nicht eindeutig

*Uran* ist u.a. als Verunreinigung in Phosphatdüngern enthalten. Ackerbaulich genutzte Böden weisen durchschnittlich 16 % höhere *Uran*-Gehalte auf als Wiesen und Weiden (Bigalke et al. 2016). Der Beitrag der Mineraldüngung zur *Uran*-Konzentration im schweizerischen Grundwasser wird nach heutigem Kenntnisstand auf weniger als  $0,1$  bis  $3 \mu\text{g/l}$  geschätzt (BAG 2014). An den meisten der beprobten 50 Messstellen liegt die *Uran*-Konzentration in diesem niedrigen Konzentrationsbereich. Messstellen im Ackerbau- und Siedlungsgebiet weisen geringfügig höhere mittlere Konzentrationen auf als die übrigen Messstellen. Ob und inwieweit diese auf landwirtschaftliche Aktivitäten in den Einzugsgebieten zurückzuführen sind, lässt sich nicht eindeutig feststellen. Bereits die intensive Bearbeitung der Böden könnte die Löslichkeit von *Uran*, das natürlicherweise im Boden vorhanden ist,

erhöhen und diese Unterschiede erklären. Mithilfe von Isotopenuntersuchungen wäre es – unter Voraussetzung niedriger geogener Hintergrundwerte – gegebenenfalls möglich, die Herkunft des *Urans* im Grundwasser zu klären (Kiefer & Fischer 2013).

### Pilotstudie «Spurenelemente» 2018

Um einen landesweiten, statistisch belastbaren Datensatz zu Spurenelementen zu erheben, wurden 2018 im Rahmen der Pilotstudie «Spurenelemente» alle Messstellen der Module TREND und SPEZ jeweils ein- bis zweimal auf rund 25 Spurenelemente untersucht. Dies wird auch Rückschlüsse erlauben, ob und allenfalls in welchem Ausmass *Cadmium* und *Uran* aus Mineraldüngern ins Grundwasser gelangen.

# 10 Nitrat

## 10.1 Grundlagen

### Stickstoffemissionen

Grundwasser enthält von Natur aus sehr wenig *Nitrat*, da im Gestein und im naturbelassenen Boden nur wenig *Nitrat* bzw. leicht verfügbarer Stickstoff enthalten ist. Erst durch den Einsatz grosser Mengen stickstoffhaltiger Hof-, Mineral- und Recyclingdünger in der Landwirtschaft reichert sich Stickstoff im Boden an. In geringeren Mengen können Stickstoffverbindungen auch über die Luft bzw. den Niederschlag in den Boden gelangen. Zu diesen Stickstoffverbindungen gehören verschiedene Stickoxide, die beim Verbrennen von Heiz- und Treibstoffen entstehen, sowie Ammoniak. Dieses bildet sich in grösseren Mengen aus Exkrementen von Nutztieren und wird daher v. a. aus Ställen und Laufhöfen sowie bei der Lagerung und Verwertung von Hofdünger in die Umwelt freigesetzt. Im Siedlungsgebiet kann Stickstoff lokal auch durch die Düngung von Sportplätzen, Grünanlagen und Privatgärten sowie aus defekten Abwasserleitungen in den Boden bzw. ins Grundwasser gelangen. Eine weitere Quelle von Stickstoff in flussnahen Lockergesteins-Grundwasserleitern stellt das gereinigte Abwasser dar, das nach Einleitung in die Fliessgewässer mit dem Flusswasser ins Grundwasser infiltriert. Durch die Ausrüstung vieler Kläranlagen mit einer Reinigungsstufe zur Stickstoffelimination ist dieser Eintrag ins Grundwasser jedoch mittlerweile von untergeordneter Bedeutung.

### Nitrat im Boden sehr mobil

Im Boden werden die verschiedenen Stickstoffverbindungen von Mikroorganismen abgebaut und in Abhängigkeit von Temperatur, Bodenfeuchte und Belüftung zum grossen Teil in *Nitrat* umgewandelt. Die landwirtschaftliche Bearbeitung und insbesondere das Umbrechen des Bodens beschleunigt diesen Prozess erheblich. *Nitrat* ist sehr gut wasserlöslich, wird kaum an Bodenpartikel gebunden und ist daher sehr mobil. Überschüssiges *Nitrat*, das von den Pflanzen nicht aufgenommen wird, kann rasch aus dem Boden ausgewaschen und mit dem Sickerwasser ins Grundwasser verlagert werden. Im Grundwasser selbst, d.h. ausserhalb der belebten Bodenzone, wird *Nitrat* kaum abgebaut. Lediglich unter sauerstoffarmen Bedin-

gungen kann *Nitrat* zu Nitrit bzw. elementarem Stickstoff reduziert werden, sodass die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser abnimmt. Durch Exfiltration von Grundwasser gelangt *Nitrat* in die Oberflächengewässer und von dort in die Nordsee, das Mittelmeer und das Schwarze Meer, wo der Stickstoff insbesondere in Küstennähe zur Eutrophierung beiträgt.

### Landwirtschaft als Hauptemittentin von Stickstoff

Hauptemittentin von *Nitrat* in der Schweiz ist die Landwirtschaft (BLW 2008). Von den landwirtschaftlich genutzten Flächen gelangen pro Jahr insgesamt mehr als 34 000 t überschüssiger *Nitrat*-Stickstoff in die Gewässer (Heldstab et al. 2010), was mehr als 150 000 t *Nitrat* entspricht. Ein Rückgang der Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft zeichnet sich zurzeit nicht ab; seit der Jahrtausendwende stagnieren die Verluste von überschüssigem Stickstoff auf unverändert hohem Niveau (BLW 2016a).

### Eintrag von Stickstoff aus Atmosphäre rückläufig

Der Eintrag von Stickstoff aus der Atmosphäre in den Boden ist tendenziell rückläufig, da durch Massnahmen zur Luftreinhaltung die Emission von Stickoxiden aus Verkehr und Feuerungen in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen ist (Heldstab et al. 2010). Die Emission von Ammoniak durch die Landwirtschaft in die Atmosphäre ist dagegen seit mehr als 15 Jahren unverändert hoch und liegt bei rund 48 000 t Ammonium-Stickstoff pro Jahr (BLW 2016a). Entsprechend dem im Umweltrecht begründeten Umweltziel Landwirtschaft muss die Ammoniakemission auf rund 25 000 t pro Jahr reduziert werden (BAFU/BLW 2016).

### GSchV: numerische Anforderung 25 mg/l

Gemäss Anhang 2 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) gilt für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, eine numerische Anforderung von 25 mg/l *Nitrat*.

### Internationale Verpflichtungen

Die Schweiz hat sich im Rahmen des OSPAR-Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR 1992) und der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR 1999) verpflichtet, die Stickstoffeinträge in die Oberflächengewässer um 50 % gegenüber 1985 zu reduzieren. Sie trägt damit zur Verringerung der Eutrophierung der stromabwärts liegenden Gewässer bei und übernimmt als Oberliegerstaat Verantwortung.

### Nitrat im Grundwasser als Indikator

«Nitrat im Grundwasser» ist einer der Kernindikatoren des BAFU im Bereich Umweltzustand der Gewässer. Die langfristige und landesweite Erhebung der Nitrat-Konzentration im Rahmen von NAQUA ermöglicht es, Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Qualität auf Landesebene abzubilden und problematische Einflüsse aus dem Landwirtschafts- und Siedlungsgebiet zu identifizieren. Die Nitrat-Konzentration im Grundwasser wird zudem auf nationaler Ebene vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) als Agrarumweltindikator genutzt (z. B. BLW 2016a, BLW 2014). Das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) verwendet die Nitrat-Konzentration im Rahmen des Cercle Indicateurs als Nachhaltigkeitsindikator, um die nachhaltige Entwicklung auf Kantons- und Landesebene zu bewerten (z. B. ARE 2015). Auf internationaler Ebene fließen die entsprechenden Analysen und Statistiken in das Reporting der Schweiz an die Weltgesundheitsorganisation WHO (z. B. BLV/BAFU 2016), die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD (z. B. OECD 2013) und die Vereinten Nationen UNO (z. B. CH 2016) ein. Ausgewählte Daten werden zudem an die Europäische Umweltagentur EUA (z. B. EUA 2018) übermittelt.

## 10.2 Datenerhebung

### Landesweite Daten

Landesweite Daten zur Nitrat-Konzentration im Grundwasser werden seit 2002 im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA erhoben. Alle knapp 550 Messstellen der Module TREND und SPEZ (Kap. 3) werden jeweils ein- bis viermal pro Jahr beprobt und auf Nitrat analysiert. Die Beprobungsfrequenz richtet sich nach der Belastung und der zeitlichen Variabilität der Nitrat-Konzentration

der jeweiligen Messstelle. Messstellen mit hoher oder variabler Nitrat-Konzentration werden häufiger beprobt als solche mit gleichbleibend niedriger Konzentration. Messstellen, deren Einzugsgebiet mit Hauptbodennutzung «Ackerbau» klassiert ist, werden mindestens zweimal pro Jahr auf Nitrat untersucht.

### Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren auf dem Maximalwert der Nitrat-Konzentration pro Messstelle und Jahr. Für die Analyse der langfristigen zeitlichen Entwicklung werden ausschliesslich solche Messstellen berücksichtigt, die im relevanten Zeitraum mindestens einmal pro Jahr untersucht wurden. Präsentiert und analysiert werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings bis und mit 2014.

## 10.3 Zustand

### GSchV häufig überschritten

Die numerische Anforderung der GSchV von 25 mg/l Nitrat wurde zwischen 2007 und 2014 jährlich an bis zu 105 Messstellen überschritten (Tab. 10.1); dies entspricht rund 15 bis 20 % aller Messstellen. An 2 bis 4 % der Messstellen wurde jeweils auch der Höchstwert der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) von 40 mg/l überschritten.

### Im Mittelland deutlich erhöht

Vor allem im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelland lag die Nitrat-Konzentration im Grundwasser über 25 mg/l (Abb. 10.1). Werte über 40 mg/l traten u. a. an mehreren Messstellen im westlichen Mittelland auf, z. B. im Seeland und in der Broye-Ebene, sowie im Zürcher Unterland und im Weinland. An 80 % der Messstellen im Mittelland lag die Nitrat-Konzentration bei mehr als 10 mg/l, in den Alpen dagegen meist unter 10 mg/l. Auf der Alpensüdseite und in grossen Teilen des Jura wurden Werte unter 25 mg/l registriert.

**Ackerbaugebiete: 40 % der Messstellen über 25 mg/l**

Die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser steht in direktem Zusammenhang mit der Bodennutzung im zugehörigen Einzugsgebiet. An Messstellen, die von der Hauptbodennutzung «Ackerbau» geprägt sind, wurde die numerische Anforderung der GSchV mit Abstand am häufigsten überschritten. Die *Nitrat*-Konzentration lag 2014 an 40 % dieser Messstellen über 25 mg/l, an 12 % der Messstellen sogar über 40 mg/l (Abb. 10.2). An Messstellen, die durch die Hauptbodennutzung «Wald» charakterisiert sind, lag die *Nitrat*-Konzentration dagegen typischerweise bei 5 bis 10 mg/l, an Messstellen in alpinen, landwirtschaftlich kaum genutzten Gebieten durchwegs unter 5 mg/l. Viele Einzugsgebiete sind kleinräumig strukturiert und durch unterschiedliche, eng miteinander verzahnte Bodennutzungen geprägt. Deshalb können auch kleinere Flächen mit hohem Stickstoffumsatz die *Nitrat*-Konzentration an einer Messstelle massgeblich beeinflussen.

Tabelle 10.1

**Nitrat im Grundwasser (2007 bis 2014)**

Grundlage: Maximalwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle und Jahr.

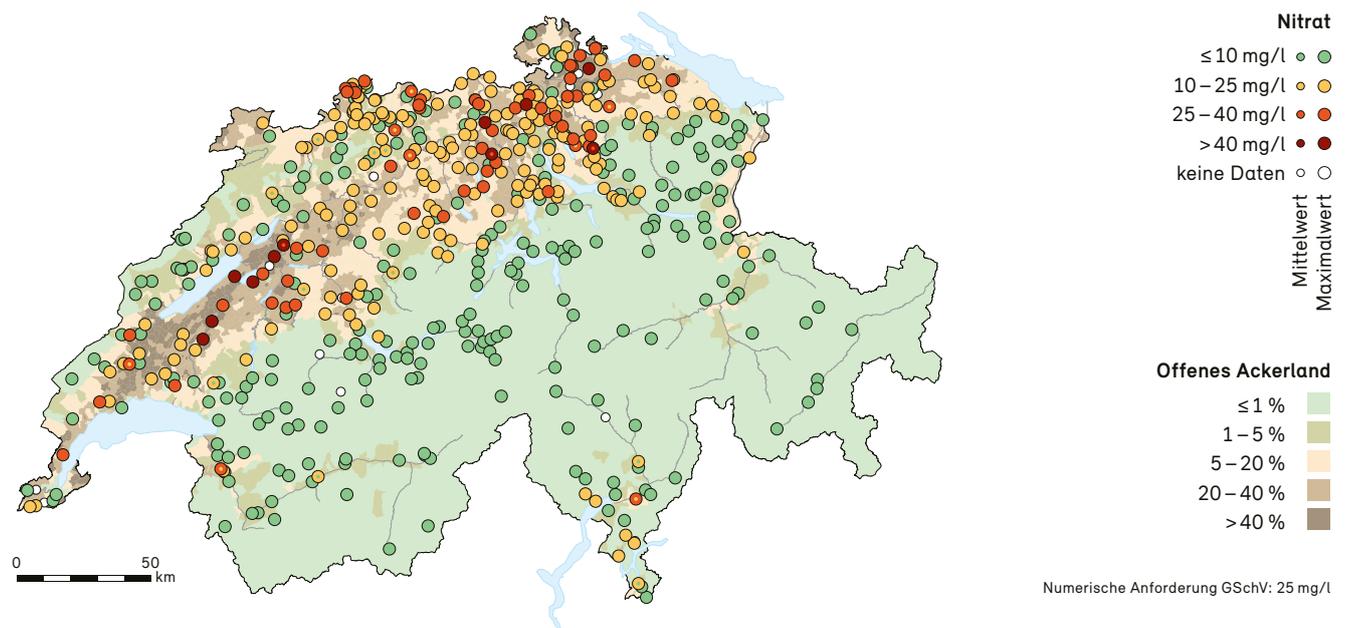
| Jahr | Messstellen [Anzahl] | Konzentration |           |           |           |           | Messstellen [%] |
|------|----------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
|      |                      |               |           |           |           |           | Konzentration   |
|      |                      | beprobte      | ≤ 10 mg/l | > 10 mg/l | > 25 mg/l | > 40 mg/l | > 25 mg/l       |
| 2007 | 482                  | 186           | 296       | 105       | 22        | 21,8      |                 |
| 2008 | 526                  | 246           | 280       | 87        | 19        | 16,5      |                 |
| 2009 | 531                  | 253           | 278       | 89        | 15        | 16,8      |                 |
| 2010 | 532                  | 246           | 286       | 86        | 18        | 16,2      |                 |
| 2011 | 531                  | 262           | 269       | 87        | 17        | 16,4      |                 |
| 2012 | 533                  | 256           | 277       | 75        | 16        | 14,1      |                 |
| 2013 | 531                  | 246           | 285       | 81        | 16        | 15,3      |                 |
| 2014 | 530                  | 260           | 270       | 72        | 11        | 13,6      |                 |

Numerische Anforderung GSchV: 25 mg/l

Abbildung 10.1

**Nitrat im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland**

Maximalwert und Mittelwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Anteil offenes Ackerland pro Gemeindefläche.



## 10.4 Entwicklung

### Seit 2006 leichter Rückgang

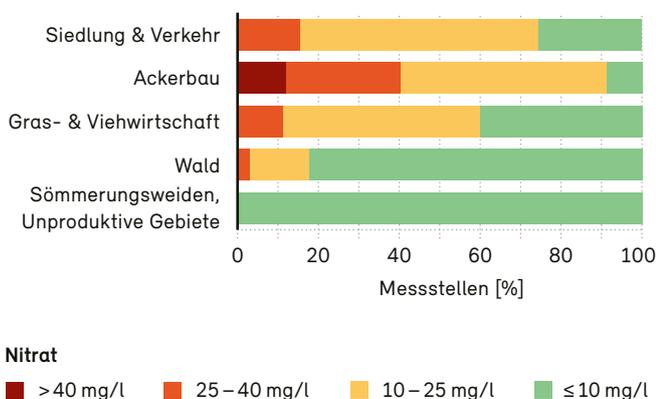
Nachdem die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser an vielen Messstellen zwischen 2003 und 2006 gestiegen war (BAFU 2009a), sank sie in der Folge meist wieder auf das Niveau von 2002 (Tab. 10.1).

### Markante Spitzen bei Ackerbau

Am markantesten war der Anstieg der *Nitrat*-Konzentration im Jahr 2006 an Messstellen, die von der Hauptbodennutzung «Ackerbau» geprägt sind (Abb. 10.3). Während von 2002 bis 2005 jährlich rund 45 % der Messstellen mit ackerbaulich genutztem Einzugsgebiet die numerische Anforderung der GSchV überschritten, stieg dieser Prozentsatz im Jahr 2006 auf insgesamt rund 60 % an. Seitdem war die *Nitrat*-Konzentration wieder rückläufig und lag 2014 erstmals leicht tiefer als 2002 zu Beginn der landesweiten Erhebungen im Rahmen von NAQUA.

Abbildung 10.2

**Nitrat im Grundwasser (2014) in Relation zur Hauptbodennutzung**  
 Grundlage: Maximalwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 90 Mst.; Ackerbau: 92 Mst.; Gras- & Viehwirtschaft: 142 Mst.; Wald: 159 Mst.; Sömmerungsweiden, Unproduktive Gebiete: 35 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle.



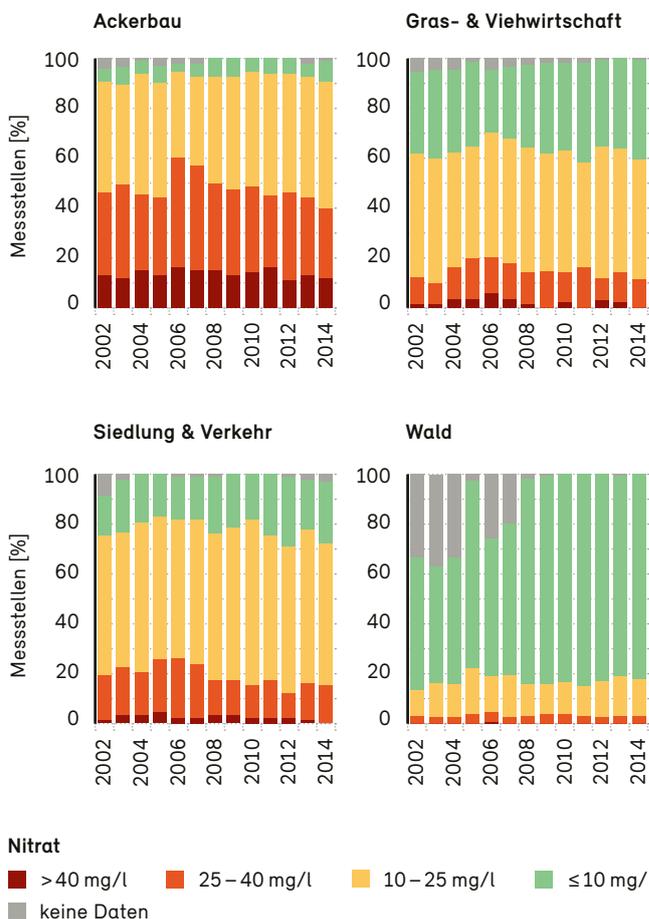
### Bei anderen Hauptbodennutzungen uneinheitlich

Auch an Messstellen, die mit der Hauptbodennutzung «Gras- & Viehwirtschaft», «Siedlung & Verkehr» sowie «Wald» charakterisiert sind, stieg die *Nitrat*-Konzentration 2005 bzw. 2006 tendenziell an (Abb. 10.3). Während im Siedlungsgebiet die Konzentrationen allerdings seit 2002 insgesamt rückläufig zu sein scheinen, lagen sie bei Grasland und Wald in den letzten Jahren ähnlich hoch oder sogar leicht höher als in den Jahren 2002 und 2003.

Abbildung 10.3

**Nitrat im Grundwasser (2002 bis 2014) in Relation zur Hauptbodennutzung**

Grundlage: Maximalwert der Nitrat-Konzentration pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Ackerbau: 93 Mst.; Gras- & Viehwirtschaft: 143 Mst., Siedlung & Verkehr: 93 Mst.; Wald: 159 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle.



## 10.5 Analyse

### Grundwasser-Qualität deutlich beeinträchtigt

Die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser liegt an rund 15 bis 20 % der Messstellen pro Jahr bei mehr als 25 mg/l. Damit verursacht *Nitrat* mit Abstand die meisten Überschreitungen der numerischen Anforderungen der GSchV im Grundwasser. An Messstellen mit der Hauptboden-nutzung «Ackerbau» wird dieser Wert sogar an 40 % der Messstellen überschritten.

### Stickstoffüberschuss Landwirtschaft

Der Schlüsselfaktor, der die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser bestimmt, ist der Überschuss an *Nitrat* bzw. Stickstoff im Boden. Deutlich erhöhte *Nitrat*-Konzentrationen treten vor allem dort auf, wo das Einzugsgebiet der Messstellen landwirtschaftlich intensiv bewirtschaftet und signifikant mehr organischer oder mineralischer Stickstoffdünger ausgebracht wird, als die Kulturpflanzen aufnehmen können. Besonders hoch ist das Risiko der *Nitrat*-Auswaschung immer dann, wenn der Boden umgebrochen wird und anschliessend ohne Bewuchs brachliegt. So gelangt vor allem im niederschlagsreichen Winterhalbjahr der zuvor im Boden angereicherte Stickstoff als *Nitrat* in grösseren Mengen ins Grundwasser.

### Anstieg infolge Trockenheit

Längere Trockenperioden, während deren viele Kulturpflanzen ihr Wachstum weitgehend einstellen und somit kaum *Nitrat* aufnehmen können, lassen Stickstoff zusätzlich im Boden akkumulieren. Wird der Boden anschliessend durch ergiebige Niederschläge wieder bis in grössere Tiefen durchfeuchtet, so werden in kurzer Frist grössere Mengen *Nitrat* im Boden mobilisiert und ins Grundwasser verlagert. Der Anstieg der *Nitrat*-Konzentrationen im Grundwasser, der an vielen Messstellen 2003 begann und 2006 seinen Höhepunkt erreichte, war somit vermutlich eine Folge mehrerer sehr trockener Jahre (BAFU 2009a). Die Niederschlagsmengen hatten zwischen 2003 und 2005 deutlich unter dem langjährigen Mittel gelegen und in diesem Zeitraum an überdurchschnittlich vielen Messstellen zu tiefen Grundwasserständen und Quellabflüssen geführt (Kap. 6).

### Rückgang benötigt mehrere Jahre

Der Rückgang der *Nitrat*-Konzentrationen, der sich seit 2007 abzeichnet, dürfte ebenfalls primär durch die hydrologischen Verhältnisse bedingt sein. Diese lagen in den folgenden Jahren meist im langjährigen Durchschnitt und führten zu einer relativ gleichmässigen Auswaschung der *Nitrat*-Überschüsse aus dem Boden. Wie schnell die *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser an den einzelnen Messstellen reagiert, hängt davon ab, wie lange das Sickerwasser in der ungesättigten Bodenzone verbleibt bzw. wie schnell sich das Grundwasser erneuert. So erreichte die *Nitrat*-Konzentration an vielen Messstellen erst nach mehreren Jahren wieder ähnliche Werte wie 2002/2003.

### Keine weitere Abnahme zu erwarten

Ein weiterer landesweit signifikanter Rückgang der *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser ist momentan nicht zu erwarten. Der Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft hat sich seit Ende der 90er-Jahre kaum mehr verringert und liegt derzeit immer noch bei mehr als 70 % (BLW 2016a). Der Verbrauch an Mineraldünger stagniert, und der Import an stickstoffhaltigen Futtermitteln ist sogar deutlich gestiegen. In den letzten Jahren wurden keine weitergehenden Massnahmen ergriffen, um die Stickstoffüberschüsse der Landwirtschaft insgesamt wirksam zu verringern.

### Mögliche Verschärfung während Trockenperioden

Längere Trockenperioden sind aufgrund der Klimamodelle zukünftig in der Schweiz vor allem im Sommer zu erwarten (MeteoSchweiz 2014). Sie könnten insbesondere in bereits stärker belasteten Gebieten zusätzlich zu einem Anstieg der *Nitrat*-Konzentration im Grundwasser führen.

### Zentraler Bestandteil im Langzeitmonitoring

Aufgrund der grossflächigen Belastung des Grundwassers mit *Nitrat* ist dieser Parameter auch in Zukunft zentraler Bestandteil im Langzeitmonitoring von NAQUA.

# 11 Pflanzenschutzmittel

## 11.1 Grundlagen

### Wirkstoffe

Pflanzenschutzmittel (PSM) sind im engeren Sinne Wirkstoffe, die verwendet werden, um Pflanzen vor Schadorganismen zu schützen oder um unerwünschte Pflanzen zu vernichten. Wirkstoffe, die als sogenannte Wachstumsregulatoren die Entwicklung von Pflanzen beeinflussen, zählen ebenfalls zu den PSM.

### Pflanzenschutzmittel + Biozide = Pestizide

Zusammen mit den Bioziden werden PSM unter dem Begriff Pestizide zusammengefasst. Biozide sind Wirkstoffe, die ausserhalb des Pflanzen- und Gartenbaus gegen Schadorganismen eingesetzt werden und häufig dem Schutz von Werkstoffen oder Konsumgütern dienen. Zu den Bioziden zählen beispielsweise Holzschutzmittel, Antifouling-Mittel oder Desinfektionsmittel. Verschiedene Wirkstoffe werden sowohl als PSM wie auch als Biozid eingesetzt. Im Grundwassermonitoring liegt der Fokus auf PSM, da diese – im Gegensatz zu Bioziden – grossflächig angewendet werden.

### Wirkstoffgruppen

PSM werden je nach Anwendung bzw. Zielorganismus weiter in Wirkstoffgruppen unterteilt: Zu den wichtigsten Wirkstoffgruppen zählen Herbizide, die gegen unerwünschte Pflanzen (sog. Unkräuter) eingesetzt werden, Fungizide, die gegen Pilzbefall wirken, und Insektizide, die gegen Insekten zum Einsatz kommen. Auf dem Markt erhältlich sind viele verschiedene PSM-Produkte, die mehrere Wirkstoffe gleichzeitig sowie zusätzlich Beistoffe enthalten können.

### PSM-Absatz 2008 bis 2016 insgesamt unverändert

Nach Angaben des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) werden in der Schweiz pro Jahr mehr als 2000t PSM-Wirkstoffe verkauft (BLW 2016a). Fungizide und Herbizide machen derzeit mit rund 50 bzw. 30% den grössten Anteil des PSM-Absatzes aus. An dritter Stelle liegen Insektizide mit rund 15% der verkauften Wirkstoffmenge; Insektizide sind oft hochwirksam und werden daher meist in relativ geringer Dosierung eingesetzt. Der

Absatz von PSM-Wirkstoffen war von 2008 bis 2016 weitgehend konstant. Etwas zugenommen hat der Einsatz von Fungiziden, während der Absatz von Herbiziden leicht rückläufig war.

### Mehr als 300 verschiedene PSM-Wirkstoffe genehmigt

Aktuell sind rund 300 verschiedene organisch-synthetische Substanzen als PSM-Wirkstoffe in der Schweiz genehmigt. Für die Genehmigung der PSM-Wirkstoffe ist das BLW zuständig. Es prüft die Genehmigung neuer Wirkstoffe, entscheidet über die Aufhebung der Genehmigung alter Wirkstoffe und erlässt gegebenenfalls Anwendungsaufgaben zum Schutz der Umwelt. Alle in der Schweiz genehmigten PSM-Wirkstoffe sind in der Pflanzenschutzmittelverordnung (PSMV, Anh. 1) sowie im Pflanzenschutzmittelverzeichnis (z. B. BLW 2019a) aufgeführt. Nach Angaben des BLW wurden von 2006 bis 2015 insgesamt 55 neue chemische Wirkstoffe genehmigt; 71 «alte» Wirkstoffe haben die Genehmigung im gleichen Zeitraum verloren.

### Einsatz im Landwirtschafts- und Siedlungsgebiet

Grossflächig werden PSM ausschliesslich in der Landwirtschaft angewendet. In vielen Ackerkulturen überwiegt der Einsatz von Herbiziden, während Obst und Reben relativ häufig mit Fungiziden behandelt werden (Spycher & Daniel 2013). Am intensivsten mit Herbiziden behandelt werden Zuckerrüben (BLW 2016a); pro Hektar und Jahr kommen in diesen Kulturen durchschnittlich mehr als 5 kg Herbizide zum Einsatz. Insgesamt macht die Behandlung von Zuckerrüben fast ein Viertel des gesamten Herbizidverbrauchs in der Schweizer Landwirtschaft aus. Weiterhin werden PSM auch im Siedlungsgebiet appliziert, so z. B. in Privatgärten und Grünanlagen.

### Anwendungsverbot auf versiegelten Flächen

Auf Gemeindestrassen, -wegen und -plätzen sowie auf Kantons- und Nationalstrassen ist der Einsatz von PSM gegen «Unkräuter» (Herbizide) seit 1986 untersagt; 1999 wurde dieses Verbot auf private Wege und Plätze ausgedehnt. Auf Böschungen und Grünstreifen entlang von Strassen dürfen lediglich in Ausnahmefällen Einzelstöcke von Problempflanzen behandelt werden. Weitere

Anwendungsverbote für PSM gelten u. a. im Wald sowie in und entlang von Oberflächengewässern, insbesondere im Gewässerraum (Details siehe ChemRRV, Anhang 2.5, sowie GSchV, Art. 41c Abs. 3).

#### **Anwendung auf bzw. entlang Gleisanlagen**

Auf bzw. entlang von Bahnlinien in den Grundwasserschutzzonen S2 und S<sub>n</sub> dürfen ebenfalls keine PSM appliziert werden; unter sehr restriktiven Bedingungen können allenfalls Ausnahmen bewilligt werden. Ausserhalb der Schutzzonen S2 und S<sub>n</sub> ist auf Bahnanlagen gemäss einer entsprechenden Weisung des Bundesamtes für Verkehr (BAV) heute nur noch der Einsatz weniger PSM zur Einzelstockbehandlung zugelassen.

#### **Anwendung in Grundwasserschutzzonen S2 und S<sub>n</sub>**

PSM, die aufgrund ihrer Mobilität oder schlechten Abbaubarkeit eine Konzentration von 0,1 µg/l in Grundwasserfassungen überschreiten können, sind in den Grundwasserschutzzonen S2 und S<sub>n</sub> generell verboten. Eine Liste der Wirkstoffe, die dort nicht verwendet werden dürfen, wird vom BLW publiziert (z. B. BLW 2018). Die verschiedenen generellen Einschränkungen, Verbote und Anwendungsaufgaben für PSM sind in der Vollzugshilfe «Umweltschutz in der Landwirtschaft, Modul Pflanzenschutzmittel» (BAFU/BLW 2013) umfassend beschrieben. Zusätzliche spezifische Anwendungsaufgaben für einzelne PSM-Produkte sind im Pflanzenschutzmittelverzeichnis des BLW zu finden (z. B. BLW 2019a).

#### **Eintrag vom Boden ins Grundwasser**

PSM, die nach der Applikation nicht vollständig im Boden abgebaut oder zurückgehalten werden, werden mit dem Sickerwasser ins Grundwasser verlagert. Insbesondere langlebige und mobile PSM-Wirkstoffe können so die Grundwasser-Qualität grossflächig beeinträchtigen. Gleiches gilt für deren von der chemischen Struktur her ähnlichen Abbau-, Reaktions- und Transformationsprodukte, welche unter dem Begriff der Metaboliten zusammengefasst werden. Im Grundwasser können Rückstände von PSM daher sowohl in Form der ursprünglichen PSM-Wirkstoffe als auch in Form verschiedener PSM-Metaboliten auftreten.

#### **Eintrag über Siedlungsentwässerung**

Entlang von Fliessgewässern können Rückstände von PSM (und Bioziden) zudem mit der Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser gelangen. In die Fliessgewässer werden PSM zum einen durch Abschwemmung von behandelten Flächen sowie durch unmittelbare Abdrift beim Einsatz eingetragen; zum anderen gelangen PSM (und Biozide) mit der Einleitung von gereinigtem oder ungereinigtem Wasser aus der Siedlungsentwässerung in die Fliessgewässer. Im Siedlungsgebiet können auch defekte Kanalisationen oder die Versickerung von Dach- und Platzwasser zu Einträgen ins Grundwasser führen. Punktuell können PSM (und Biozide) ausserdem bei der industriellen Produktion oder über Altlasten und Depo-nien ins Grundwasser gelangen.

#### **GSchV: 0,1 µg/l für PSM-Wirkstoffe**

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) soll Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten. Für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, gilt nach Anhang 2 GSchV für organische Pestizide zusätzlich eine numerische Anforderung von 0,1 µg/l (je Einzelsubstanz). Das Grundwasser muss zudem – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Neben einem Höchstwert von 0,1 µg/l für organische Pestizide legt die Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) auch einen Höchstwert von 0,1 µg/l (je Einzelsubstanz) für die im Rahmen der Zulassung als relevant eingestuften PSM-Metaboliten fest; dieser gilt durch den Verweis der GSchV auf die TBDV auch für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser. Gemäss PSMV wird ein «Metabolit [...] als relevant eingestuft, wenn Grund zur Annahme besteht, dass er in Bezug auf seine gewünschte biologische Wirksamkeit mit dem Ausgangsstoff vergleichbare inhärente Eigenschaften aufweist oder für Organismen ein höheres oder vergleichbares Risiko wie der Ausgangsstoff darstellt oder über bestimmte Eigenschaften verfügt, die als nicht annehmbar erachtet werden». Für alle übrigen PSM-Metaboliten enthält weder die GSchV noch die TBDV eine numerische Anforderung bzw. einen Höchstwert.

### Aktionsplan PSM

Der «Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln» (AP PSM), den der Bundesrat im September 2017 verabschiedet hat, hat zum Ziel, die Emissionen von PSM mittelfristig um 25 % zu reduzieren und gleichzeitig die Risiken von PSM zu halbieren (Bundesrat 2017). Neben der Einhaltung der numerischen Anforderungen der GSchV fordert der AP PSM u. a. spezifisch, die Belastung des Grundwassers mit als nicht relevant eingestuftem PSM-Metaboliten von 2017 bis 2027 deutlich zu senken. Das Monitoring im Rahmen von NAQUA wird die Grundlage bilden, um die Wirksamkeit des AP PSM im Bereich Grundwasser zu überprüfen.

### PSM im Grundwasser als Indikator

«Pflanzenschutzmittel im Grundwasser» ist einer der Kernindikatoren des BAFU im Bereich Umweltzustand der Gewässer. Die langfristige und landesweite Erhebung der Konzentration verschiedener PSM-Rückstände im Rahmen von NAQUA ermöglicht es, Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Qualität auf Landesebene aufzuzeigen und problematische Einflüsse aus der Landwirtschaft und dem Siedlungsgebiet zu identifizieren. Die Konzentration von PSM-Rückständen im Grundwasser wird zudem auf nationaler Ebene vom BLW als Agrarumweltindikator (z. B. BLW 2016a, BLW 2014) genutzt, um die Auswirkung der landwirtschaftlichen Produktionsweise auf die Grundwasserressourcen zu erfassen. Auf internationaler Ebene fliessen die entsprechenden Analysen und Statistiken in das Reporting der Schweiz an die Weltgesundheitsorganisation WHO (z. B. BLV/BAFU 2016) und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OECD (z. B. OECD 2013) ein. Ausgewählte Daten werden zudem an die Europäische Umweltagentur EUA (z. B. EUA 2018) übermittelt.

## 11.2 Datenerhebung

### Landesweite Daten

Landesweite Daten zu PSM-Rückständen im Grundwasser werden seit 2002 im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA erhoben. Alle knapp 550 Messstellen der Module TREND und SPEZ (Kap. 3) werden ein- bis viermal pro Jahr beprobt und auf ausgewählte PSM-Rückstände

analysiert. Die Beprobungsfrequenz richtet sich einerseits nach der bekannten Belastung der Messstellen und andererseits nach ihrer potenziellen Exposition gegenüber PSM. So werden Messstellen, deren Einzugsgebiet durch Ackerland oder Siedlungen geprägt ist, mindestens zweimal pro Jahr auf PSM-Rückstände untersucht.

### Auswahl Substanzen

Die Auswahl der Substanzen für das Langzeitmonitoring basiert auf Prognosen zur Verlagerung der einzelnen PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten ins Grundwasser (Reinhardt et al. 2017). Berücksichtigt werden experimentell ermittelte Daten zu Mobilität (Sorption) und Abbaubarkeit (Halbwertszeit) der PSM-Wirkstoffe im Boden (PPDB 2009) sowie Ergebnisse von Modellrechnungen, die im Rahmen des Zulassungsverfahrens der einzelnen PSM-Wirkstoffe durchgeführt werden (BLW/BLV 2019). Eine weitere Priorisierung erfolgt anschliessend anhand der spezifisch auf dem Schweizer Markt verkauften Mengen der einzelnen PSM-Wirkstoffe, die jährlich vom Bundesamt für Landwirtschaft erhoben werden (BLW 2016b).

### Pilotstudien an ausgewählten Messstellen

Die Auswahl der Substanzen für das Langzeitmonitoring stützt sich zudem auf Monitoringdaten, die im Rahmen von Pilotstudien zur Früherkennung und Identifikation potenziell relevanter Substanzen («emerging pollutants») an ausgewählten Messstellen erhoben werden. Diese zeitlich befristeten Pilotstudien fokussieren jeweils auf einzelne «neue» Substanzen oder Substanzgruppen und berücksichtigen die aktuellsten Erkenntnisse und Methoden der Forschung. Daneben werden für die Substanzauswahl auch die allenfalls vorhandenen Daten aus der kantonalen Grundwasserüberwachung sowie aus der Grundwasserbeobachtung der Nachbarländer herangezogen.

### Pilotstudie «Screening» 2007/2008

Im Rahmen der Pilotstudie «Screening auf Mikroverunreinigungen» wurden 2007 und 2008 insgesamt rund 150 PSM, Biozide und Metaboliten analysiert (Kap. 15). Während die Bestimmungsgrenze im Langzeitmonitoring meist bei 0,01 bis 0,02 µg/l liegt, wurde im Screening für die meisten Parameter eine Bestimmungsgrenze deutlich unter 0,01 µg/l erreicht. Die Beprobung umfasste 22 ausgewählte Messstellen des Moduls TREND im Ackerbau- und Siedlungsgebiet.

### **Pilotstudie «Dynamik Pflanzenschutzmittel» 2010/2011**

Eine weitere Pilotstudie untersuchte 2010 und 2011 gezielt die Variabilität der PSM-Konzentrationen im Grundwasser. Zudem wurde gleichzeitig der PSM-Einsatz im Einzugsgebiet der Messstellen erfasst. Die Pilotstudie beschränkte sich auf 14 ausgewählte Messstellen der Module TREND und SPEZ, deren Einzugsgebiete eine besonders hohe Vulnerabilität aufweisen und überwiegend landwirtschaftlich genutzt sind. Die Beprobung der Messstellen fand ausschliesslich in den Sommermonaten statt; während dieser Zeit wurde alle 14 Tage jeweils eine Probe pro Messstelle entnommen. Neben den Substanzen des Langzeitmonitorings wurden im Rahmen der Pilotstudie auch *Glyphosat* und dessen Metabolit *AMPA* analysiert.

### **Pilotstudie «Glyphosat» 2016/2017**

Die jüngste Pilotstudie 2016/2017 galt spezifisch *Glyphosat* sowie dessen Metaboliten *AMPA*. *Glyphosat* ist das mit Abstand am häufigsten eingesetzte PSM; in der Schweiz werden pro Jahr rund 200 Tonnen dieses Wirkstoffs verkauft (BLW 2019b). *Glyphosat* steht im Fokus der Öffentlichkeit, nachdem die Internationale Krebsforschungsagentur IARC der Weltgesundheitsorganisation WHO den Wirkstoff im Frühjahr 2015 als gentoxisch und «wahrscheinlich kanzerogen» eingestuft hatte (IACR 2015); gemäss dem Bericht der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit EFSA (EFSA 2015) sowie der Einschätzung der Europäischen Chemikalienagentur ECHA reichen die derzeitigen Erkenntnisse für eine solche Einstufung jedoch nicht aus (ECHA 2017). Im Rahmen der Pilotstudie wurden *Glyphosat* und *AMPA* an allen Messstellen der Module TREND und SPEZ untersucht. Pro Messstelle wurden jeweils 1 bis 2 Proben analysiert.

### **Substanzen im Langzeitmonitoring seit 2002**

Das Langzeitmonitoring von NAQUA umfasste zu Beginn der landesweiten Erhebungen im Jahr 2002 lediglich die Triazine *Atrazin*, *Simazin* und *Terbutylazin* einschliesslich der Metaboliten *Desethyl-atrazin* und *Desisopropyl-atrazin* sowie die Phenylharnstoffe *Diuron* und *Isoproturon* (Tab. 11.1). Im Jahr 2005 wurde die Substanzaalette um 20 PSM-Wirkstoffe bzw. -Metaboliten erweitert, und es wurden u. a. auch Wirkstoffe aus der Gruppe der Chloracetanilide, wie z. B. *Metolachlor* und *Metazachlor*,

integriert. Im Jahr 2006 kamen auf Basis der Ergebnisse der damaligen Pilotstudie «Pestizide und Sulfonamid-Antibiotika» (BAFU 2009a, Hanke et al. 2007) insbesondere PSM-Rückstände wie *2,6-Dichlorbenzamid*, Metabolit der Wirkstoffe *Dichlobenil* und *Fluopicolid*, oder *Metolachlor-ESA*, Metabolit von *Metolachlor*, im Langzeitmonitoring hinzu. Verschiedene dieser «neuen» Substanzen wurden bis 2008 allerdings nur an wenigen ausgewählten Messstellen untersucht. Landesweite Daten liegen für viele dieser Substanzen erst seit 2009 vor.

### **Chloridazon-Metaboliten seit 2010**

Dank der Weiterentwicklung der chemischen Analytik konnte das Langzeitmonitoring im Jahr 2009 um *Propachlor-ESA*, einen Metabolit von *Propachlor*, erweitert werden, sowie im Jahr 2010 um *Chloridazon* und die beiden *Chloridazon*-Metaboliten *Desphenyl-chloridazon* und *Methyl-desphenyl-chloridazon*. Im Modul TREND werden seit 2010 ausserdem *Tritosulfuron* und *N,N-Dimethylsulfamid (DMS)*, ein Metabolit der Fungizide *Tolyfluanid* und *Dichlofluanid*, untersucht.

### **40 PSM-Rückstände im Langzeitmonitoring**

Insgesamt wurden im Rahmen des Langzeitmonitorings von 2007 bis 2014 pro Jahr bis zu 26 PSM-Wirkstoffe und 14 PSM-Metaboliten analysiert (Tab. 11.1). Es handelte sich bei fast allen Wirkstoffen um Herbizide. Einzelne Substanzen, die nicht nachgewiesen wurden und/oder deren Zulassung aufgehoben wurde, wurden aus dem Langzeitmonitoring gestrichen.

### **Daten zu rund 400 PSM-Wirkstoffen und -Metaboliten**

Neben den Substanzen des Langzeitmonitorings werden von verschiedenen kantonalen Fachstellen und den beiden Auftragslabors Daten zu weiteren PSM-Wirkstoffen und -Metaboliten an das BAFU übermittelt. Diese zusätzlichen Daten bilden zusammen mit jenen der Pilotstudien eine wichtige Grundlage, um das Langzeitmonitoring weiterzuentwickeln und bei Bedarf anzupassen. Die Datenbank des BAFU enthält derzeit Daten von über 400 verschiedenen PSM-Wirkstoffen und -Metaboliten.

Tabelle 11.1

**PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Langzeitmonitoring (2002 bis 2014)**

Aufgeführt sind alle Substanzen, die im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA landesweit analysiert wurden, einschliesslich Angaben zu Genehmigung (BLW 2019a) und Einsatzmengen (BLW 2016b) der einzelnen PSM-Wirkstoffe sowie zur Einstufung der PSM-Metaboliten im Zulassungsverfahren (BLW/BLV 2019). Nach Aufhebung der Genehmigung dürfen die entsprechenden Restbestände i. d. R. noch während mehrerer Jahre verkauft und aufgebraucht werden.

| PSM-Wirkstoff              | PSM-Metabolit                | Langzeit-<br>monitoring |      | Genehmigung als<br>PSM aufgehoben | Einsatzmenge<br>2014 | Einstufung im<br>Zulassungsverfahren |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------|------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
|                            |                              | Start                   | Ende |                                   |                      |                                      |
| 2,4-D                      |                              | 2005                    | 2009 |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| Alachlor                   |                              | 2005                    | 2008 | 2010                              | < 1 t (2010)         |                                      |
| (Alachlor)                 | Alachlor-ESA*                | 2010                    |      |                                   |                      | n. b.                                |
| (Alachlor)                 | Alachlor-OXA*                | 2010                    |      |                                   |                      | n. b.                                |
| Aldicarb                   |                              | 2005                    | 2008 | 2019                              | k. A.                |                                      |
| Atrazin                    |                              | 2002                    |      | 2007                              | 30 – 50 t (2007)     |                                      |
| (Atrazin)                  | Desethyl-atrazin             | 2002                    |      |                                   |                      | rel.                                 |
| (Atrazin, Simazin)         | Desisopropyl-atrazin         | 2002                    |      |                                   |                      | rel.                                 |
| Bentazon                   |                              | 2006                    |      |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| Bromacil                   |                              | 2005                    | 2007 | k. A.                             |                      |                                      |
| Chloridazon                |                              | 2010                    |      |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| (Chloridazon)              | Desphenyl-chloridazon        | 2010                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| (Chloridazon)              | Methyl-desphenyl-chloridazon | 2010                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| Chlortoluron               |                              | 2005                    |      |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| Cyanazin                   |                              | 2005                    |      | 2008                              | < 1 t (2008)         |                                      |
| Diazinon*                  |                              | 2009                    |      | 2011                              | 10 – 30 t (2011)     |                                      |
| Dichlobenil*               |                              | 2006                    | 2008 | 2013                              | 1 – 10 t (2013)      |                                      |
| (Dichlobenil, Fluopicolid) | 2,6-Dichlorbenzamid          | 2006                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| Dichlorprop                |                              | 2005                    | 2009 |                                   | k. A.                |                                      |
| (Dimethachlor)             | Dimethachlor-ESA*            | 2010                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| (Dimethachlor)             | Dimethachlor-OXA*            | 2010                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| (Dimethenamid)             | Dimethenamid-ESA             | 2006                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |
| (Dimethenamid)             | Dimethenamid-OXA             | 2006                    | 2008 |                                   |                      | n. rel.                              |
| Dinoseb                    |                              | 2005                    | 2007 | k. A.                             | 10 – 30 t (2002)     |                                      |
| Diuron                     |                              | 2002                    |      |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| Glyphosat                  |                              | 2005                    | 2008 |                                   | ca. 300 t            |                                      |
| (Glyphosat)                | AMPA                         | 2005                    | 2008 |                                   |                      | n. b.                                |
| Hexazinon                  |                              | 2005                    | 2007 | k. A.                             | .                    |                                      |
| Isoproturon                |                              | 2002                    |      | 2018                              | 10 – 30 t            |                                      |
| MCPA                       |                              | 2005                    |      |                                   | 10 – 30 t            |                                      |
| Mecoprop                   |                              | 2005                    |      |                                   | 10 – 30 t            |                                      |
| Mesotrion                  |                              | 2006                    | 2008 |                                   | 1 – 10 t             |                                      |
| Metamitron                 |                              | 2005                    | 2008 |                                   | 50 – 100 t           |                                      |
| (Metazachlor)              | Metazachlor-ESA*             | 2010                    |      |                                   |                      | n. rel.                              |

| PSM-Wirkstoff                 | PSM-Metabolit               | Langzeitmonitoring |      | Genehmigung als PSM aufgehoben | Einsatzmenge 2014 | Einstufung im Zulassungsverfahren |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|------|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
|                               |                             | Start              | Ende |                                |                   |                                   |
| (Metazachlor)                 | Metazachlor-OXA*            | 2010               |      |                                |                   | n. rel.                           |
| Metolachlor                   |                             | 2005               |      |                                | 30–50 t           |                                   |
| (Metolachlor)                 | Metolachlor-ESA             | 2006               |      |                                |                   | n. rel.                           |
| (Metolachlor)                 | Metolachlor-OXA             | 2006               |      |                                |                   | n. rel.                           |
| (Propachlor)                  | Propachlor-ESA              | 2009               | 2013 | 2011                           |                   | rel.                              |
| Propazin                      |                             | 2005               |      | –                              | –                 |                                   |
| Simazin                       |                             | 2002               |      | 2007                           | 1–10 t (2007)     |                                   |
| Sulcotrion                    |                             | 2006               | 2008 |                                | < 1 t             |                                   |
| Tebutam                       |                             | 2005               | 2008 | 2005                           | 1–10 t (2003)     |                                   |
| Terbutylazin                  |                             | 2002               |      |                                | 10–30 t           |                                   |
| Terbutryn                     |                             | 2005               |      | 2008                           | < 1 t (2005)      |                                   |
| (Tolylfluamid, Dichlofluamid) | N,N-Dimethylsulfamid (DMS)* | 2010               |      |                                |                   | n. rel.                           |

(...) Ausgangssubstanz des jeweiligen PSM-Metaboliten

\* Analyse im Langzeitmonitoring optional, häufig kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

k. A. keine Angaben vorhanden

– nie zugelassen

n. b. im Zulassungsverfahren nicht beurteilt

rel. im Zulassungsverfahren als relevant eingestuft

n. rel. im Zulassungsverfahren als nicht relevant eingestuft

## Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren auf dem Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro Messstelle und Jahr. Präsentiert und analysiert werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings bis und mit 2014 sowie die Ergebnisse der verschiedenen Pilotstudien.

## Zeitreihen

Das Spektrum der Substanzen, die im Langzeitmonitoring untersucht werden, wird regelmässig an die sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst und so kontinuierlich weiterentwickelt. Deshalb lässt sich nur eingeschränkt abschätzen, ob und wie sich die Grundwasser-Qualität hinsichtlich PSM-Rückständen im Grundwasser im Lauf der Jahre insgesamt verändert hat. Die Analyse der langfristigen zeitlichen Entwicklung beschränkt sich daher jeweils auf einzelne PSM-Wirkstoffe bzw. -Metaboliten. Bei der Evaluation deren Entwicklung wurden jeweils nur diejenigen Messstellen berücksichtigt, die im relevanten Zeitraum mindestens einmal pro Jahr beprobt wurden.

## 11.3 Zustand

### 11.3.1 Überblick

#### PSM-Wirkstoffe – GSchV an 2 % der Messstellen überschritten

PSM-Wirkstoffe überschritten die numerische Anforderung der GSchV von 0,1 µg/l im Jahr 2014 an insgesamt 9 Messstellen (Tab. 11.2). Dies entspricht einem Anteil von rund 2 % der Messstellen.

#### Bentazon am häufigsten über 0,1 µg/l

Insgesamt 5 verschiedene PSM-Wirkstoffe traten 2014 in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf (Abb. 11.1, Tab. 11.3). Der PSM-Wirkstoff, der die numerische Anforderung der GSchV am häufigsten überschritt, war *Bentazon*, gefolgt von *Atrazin* und *Metolachlor*. An jeweils einer Messstelle wurden *Mecoprop* und *Metazachlor* in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen. Zudem überschritt der PSM-Wirkstoff *Glyphosat*, der im Rahmen einer Pilotstudie 2016 und 2017 ein- bis zweimal an allen Messstellen analysiert wurde, in diesen beiden Jahren an 2 Messstellen die numerische Anforderung der GSchV.

Abbildung 11.1

**PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser (2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Dargestellt sind alle Substanzen, die im Langzeitmonitoring in diesem Jahr analysiert und nachgewiesen wurden. BG: Bestimmungsgrenze.

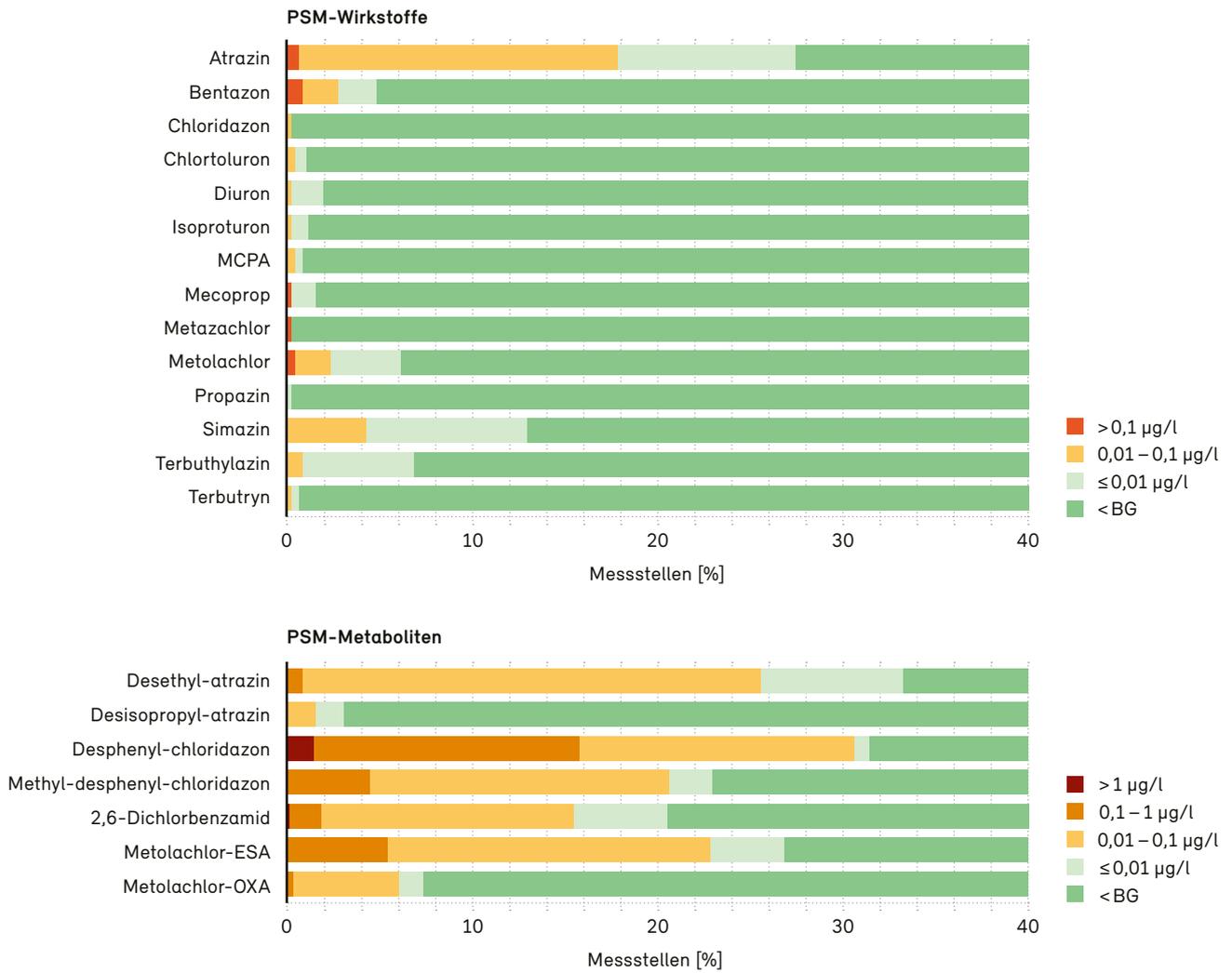


Tabelle 11.2

## PSM-Rückstände im Grundwasser (2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

|  | Messstellen [Anzahl] |               |            |             |            |          | Messstellen [%] |
|--|----------------------|---------------|------------|-------------|------------|----------|-----------------|
|  | beprobte             | Konzentration |            |             |            |          | Konzentration   |
|  |                      | < BG          | ≥ BG       | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l | > 1 µg/l | > 0,1 µg/l      |
| <b>PSM-Wirkstoffe</b>                                  | 530                  | 338           | 192        | 121         | 9          | –        | 1,7             |
| <b>PSM-Metaboliten</b>                                 | 530                  | 255           | 275        | 257         | 104        | 9        | 19,6            |
| – im Zulassungsverfahren als relevant eingestuft       | 530                  | 351           | 179        | 138         | 5          | –        | 0,9             |
| – im Zulassungsverfahren als nicht relevant eingestuft | 530                  | 282           | 248        | 231         | 104        | 9        | 19,6            |
| – im Zulassungsverfahren nicht beurteilt               | 430                  | 412           | 18         | 17          | –          | –        | –               |
| <b>Total</b>   | <b>530</b>           | <b>231</b>    | <b>299</b> | <b>264</b>  | <b>107</b> | <b>9</b> | <b>20,2</b>     |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

Tabelle 11.3

## PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser (2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Aufgeführt sind alle Substanzen, die 2014 nachgewiesen und/oder im Rahmen des Langzeitmonitorings untersucht wurden.

| PSM-Wirkstoff | PSM-Metabolit                | Messstellen [Anzahl] |               |      |             |            |            |               | Messstellen [%] |            |
|---------------|------------------------------|----------------------|---------------|------|-------------|------------|------------|---------------|-----------------|------------|
|               |                              | beprobte             | Konzentration |      |             |            |            | Konzentration |                 |            |
|               |                              |                      | < BG          | ≥ BG | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l | > 0,3 µg/l | > 0,5 µg/l    | > 1 µg/l        | > 0,1 µg/l |
| Atrazin       |                              | 530                  | 385           | 145  | 94          | 3          | –          | –             | –               | 0,6        |
| (Atrazin)     | 2-Hydroxy-atrazin*           | 166                  | 149           | 17   | 16          | –          | –          | –             | –               | *          |
| (Atrazin)     | Desethyl-atrazin             | 530                  | 353           | 177  | 136         | 5          | –          | –             | –               | 0,9        |
| (Atrazin)     | Desisopropyl-atrazin         | 530                  | 514           | 16   | 8           | –          | –          | –             | –               | –          |
| Bentazon      |                              | 530                  | 505           | 25   | 14          | 4          | –          | –             | –               | 0,8        |
| Chloridazon   |                              | 530                  | 529           | 1    | 1           | –          | –          | –             | –               | –          |
| (Chloridazon) | Desphenyl-chloridazon        | 530                  | 363           | 167  | 163         | 84         | 33         | 22            | 8               | 15,8       |
| (Chloridazon) | Methyl-desphenyl-chloridazon | 530                  | 408           | 122  | 110         | 24         | 4          | 3             | –               | 4,5        |
| Chlortoluron  |                              | 530                  | 525           | 5    | 2           | –          | –          | –             | –               | –          |
| Cyanazin      |                              | 530                  | 530           | –    | –           | –          | –          | –             | –               | –          |
| DEET*         |                              | 283                  | 267           | 16   | 8           | –          | –          | –             | –               | *          |
| Diazinon*     |                              | 491                  | 488           | 3    | –           | –          | –          | –             | –               | *          |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

| PSM-Wirkstoff                | PSM-Metabolit               | Messstellen [Anzahl] |               |      |             |            |            |            |               | Messstellen [%] |  |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------|-------------|------------|------------|------------|---------------|-----------------|--|
|                              |                             | beprobt              | Konzentration |      |             |            |            |            | Konzentration |                 |  |
|                              |                             |                      | < BG          | ≥ BG | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l | > 0,3 µg/l | > 0,5 µg/l | > 1 µg/l      | > 0,1 µg/l      |  |
| (Dichlobenil, Fluopicolid)   | 2,6-Dichlorbenzamid         | 529                  | 420           | 109  | 82          | 10         | 2          | 2          | 1             | 1,9             |  |
| (Dichlofluanid, Tolyfluanid) | N,N-Dimethylsulfamid (DMS)* | 206                  | 189           | 17   | 17          | 5          | 1          | –          | –             | *               |  |
| Dichlorprop                  |                             | 530                  | 529           | 1    | –           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| (Dimethachlor)               | Dimethachlor-ESA*           | 96                   | 95            | 1    | 1           | 1          | 1          | –          | –             | *               |  |
| (Dimethachlor)               | Dimethachlor-OXA*           | 96                   | 95            | 1    | 1           | 1          | –          | –          | –             | *               |  |
| Dimethenamid                 | Dimethenamid-ESA            | 530                  | 530           | –    | –           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| Diuron                       |                             | 530                  | 520           | 10   | 1           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| Isoproturon                  |                             | 530                  | 524           | 6    | 1           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| MCPA                         |                             | 530                  | 526           | 4    | 2           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| Mecoprop                     |                             | 530                  | 522           | 8    | 1           | 1          | –          | –          | –             | 0,2             |  |
| Metaldehyd*                  |                             | 5                    | 4             | 1    | 1           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Metamitron                   |                             | 530                  | 523           | 7    | –           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| Metazachlor                  |                             | 530                  | 529           | 1    | 1           | 1          | –          | –          | –             | 0,2             |  |
| (Metazachlor)                | Metazachlor-ESA             | 362                  | 349           | 13   | 13          | 1          | –          | –          | –             | *               |  |
| (Metazachlor)                | Metazachlor-OXA*            | 323                  | 314           | 9    | 9           | 1          | –          | –          | –             | *               |  |
| Metolachlor                  |                             | 530                  | 498           | 32   | 12          | 2          | 1          | 1          | –             | 0,4             |  |
| (Metolachlor)                | Metolachlor-ESA             | 530                  | 388           | 142  | 121         | 29         | 9          | 2          | –             | 5,5             |  |
| (Metolachlor)                | Metolachlor-OXA             | 530                  | 491           | 39   | 32          | 2          | 1          | 1          | –             | 0,4             |  |
| Metribuzin*                  |                             | 223                  | 222           | 1    | 1           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Metsulfuron-methyl*          |                             | 5                    | 4             | 1    | 1           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Oxadixyl*                    |                             | 272                  | 270           | 2    | 2           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Prometryn*                   |                             | 223                  | 222           | 1    | –           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Propazin                     |                             | 530                  | 529           | 1    | –           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| (Propazin)                   | 2-Hydroxypropazin*          | 91                   | 90            | 1    | 1           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Propiconazol*                |                             | 232                  | 231           | 1    | 1           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Simazin                      |                             | 530                  | 462           | 68   | 22          | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| Terbuthylazin                |                             | 530                  | 494           | 36   | 4           | –          | –          | –          | –             | –               |  |
| (Terbuthylazin)              | Desethyl-terbuthylazin*     | 174                  | 171           | 3    | 3           | –          | –          | –          | –             | *               |  |
| Terbutryn                    |                             | 530                  | 527           | 3    | 1           | –          | –          | –          | –             | –               |  |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

(...) Ausgangssubstanz des jeweiligen PSM-Metaboliten

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

### Relevante PSM-Metaboliten – Höchstwert TBDV an 1 % der Messstellen überschritten

PSM-Metaboliten, die im Zulassungsverfahren als relevant eingestuft worden waren, überschritten 2014 an insgesamt 5 Messstellen den Höchstwert der TBDV von 0,1 µg/l, d. h. an rund 1 % der Messstellen (Tab. 11.2). Für die Überschreitungen war einzig *Desethyl-atrazin* verantwortlich, ein Metabolit von *Atrazin*.

### Zulassungsrechtlich als nicht relevant eingestufte PSM-Metaboliten an 20 % der Messstellen über 0,1 µg/l

PSM-Metaboliten, die zulassungsrechtlich als nicht relevant eingestuft worden waren und für die in der GSchV bisher keine numerische Anforderung enthalten ist, waren im Grundwasser weit verbreitet und traten landesweit an über 100 Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf. Dies entspricht einem Anteil von rund 20 % der Messstellen. Die betroffenen Metaboliten stammen von insgesamt 6 verschiedenen PSM-Wirkstoffen.

### Desphenyl-chloridazon am häufigsten über 0,1 µg/l

Mit Abstand am häufigsten wurden die Chloridazon-Metaboliten *Desphenyl-chloridazon* und *Methyl-desphenyl-chloridazon* in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen (Abb. 11.1). *Desphenyl-chloridazon* trat 2014 an insgesamt 16 % der Messstellen in Konzentrationen über 0,1 µg/l auf; an 2 % der Messstellen lagen die Konzentrationen über 1 µg/l. *Methyl-desphenyl-chloridazon* wurde an 5 % der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen; Werte über 1 µg/l traten nicht auf.

### Metolachlor-ESA am zweithäufigsten

Am zweithäufigsten traten Metaboliten des Herbizids *Metolachlor* in erhöhten Konzentrationen im Grundwasser auf. An 6 % der Messstellen lagen die Konzentrationen von *Metolachlor-ESA* über 0,1 µg/l, an 0,4 % der Messstellen auch die Konzentrationen von *Metolachlor-OXA*.

### 2,6-Dichlorbenzamid am dritthäufigsten

An dritter Stelle rangiert mit *2,6-Dichlorbenzamid* ein Metabolit, der sowohl aus dem Wirkstoff *Dichlobenil* als auch aus dem Wirkstoff *Fluopicolid* entsteht. *2,6-Dichlorbenzamid* wurde an 2 % der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser nachgewiesen. An einer Messstelle trat einmalig auch

eine Konzentration von mehr als 1 µg/l im Grundwasser auf.

### Weitere PSM-Metaboliten über 0,1 µg/l

Die übrigen PSM-Metaboliten, die in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auftraten, für die jedoch kein landesweiter Datensatz vorliegt, stammen von den Wirkstoffen *Dimethachlor* und *Metazachlor* sowie von *Dichlofluanid* und/oder *Tolyfluanid*. Es handelt sich um die Metaboliten *Dimethachlor-ESA*, *Dimethachlor-OXA*, *Metazachlor-ESA*, *Metazachlor-OXA* und *N,N-Dimethylsulfamid* (Tab. 11.3).

### Insgesamt knapp 40 Substanzen nachgewiesen

Im Jahr 2014 wurden somit 5 verschiedene PSM-Wirkstoffe und 11 PSM-Metaboliten (von 7 verschiedenen Wirkstoffen) in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser nachgewiesen (Tab. 11.3). Weitere 19 PSM-Wirkstoffe und 4 PSM-Metaboliten traten in Konzentrationen von weniger als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. Insgesamt wurden so fast 40 verschiedene PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser detektiert.

### PSM-Rückstände – landesweit an rund 20 % der Messstellen über 0,1 µg/l

PSM-Rückstände, d. h. PSM-Wirkstoffe und/oder PSM-Metaboliten, traten 2014 landesweit an insgesamt 107 NAQUA-Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf (Tab. 11.2). Dies entspricht einem Anteil von gut 20 % der Messstellen. Während die eigentlichen PSM-Wirkstoffe an rund 2 % der Messstellen die numerische Anforderung der GSchV überschritten, wurden die zugehörigen Metaboliten an 20 % der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l detektiert. An über der Hälfte aller Messstellen wurden PSM-Rückstände im Grundwasser nachgewiesen.

### 11.3.2 Regionale Verbreitung

#### Erhöhte Konzentrationen v. a. im Mittelland

Vor allem im dicht besiedelten und intensiv landwirtschaftlich genutzten Mittelland traten PSM-Rückstände, d. h. PSM-Wirkstoffe sowie PSM-Metaboliten, in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf (Abb. 11.2, 11.3, 11.4). Erhöhte Werte wurden zudem an einzelnen Messstellen im Nordwestschweizer Tafel-

Jura, in der Region Basel sowie im Rhonetal und in der Magadinoebene nachgewiesen. Je nach Anwendung und Einsatzgebiet ergaben sich für die verschiedenen PSM-Rückstände leicht unterschiedliche Belastungsschwerpunkte.

**Metaboliten von Chloridazon – Zucker- und Futterrüben**  
Rückstände von *Chloridazon* im Grundwasser waren auf die Regionen beschränkt, in denen Futter- oder Zuckerrüben angebaut werden (Abb. 11.5). Insbesondere das Seeland sowie die Nordostschweiz zwischen Glatt, Töss und Thur waren von Konzentrationen über 0,1 µg/l betroffen. Futter- und Zuckerrüben werden in der Schweiz auf einer Fläche von insgesamt rund 20 000 ha angebaut (BLW 2017).

**Rückstände von Metolachlor im Mittelland verbreitet**  
Rückstände von *Metolachlor* waren im Grundwasser des Mittellands weit verbreitet (Abb. 11.6). Auch im Tessin wurden Rückstände von *Metolachlor* in Konzentrationen über 0,1 µg/l nachgewiesen. *Metolachlor* wird insbesondere beim Anbau von Mais eingesetzt. Silo- und Grünmais wird in der Schweiz auf einer Gesamtfläche von

46 000 ha angebaut (BLW 2017). Das grossräumige Auftreten der Rückstände von *Metolachlor* spiegelt die weite Verbreitung der Kulturen wider, in denen dieser Wirkstoff eingesetzt wird.

#### Rückstände von Atrazin am weitesten verbreitet

Räumlich am weitesten verbreitet waren Rückstände von *Atrazin* (Abb. 11.7). Auch in der Region Basel, im Jura und im Tessin sowie im Rhone- und im Rheintal wurden *Atrazin* und/oder *Desethyl-atrazin* nachgewiesen. Rückstände von *Atrazin* traten zudem auch in kleineren Tälern in den Voralpen und Alpen auf.

#### 2,6-Dichlorbenzamid – bei Grasland und Siedlungen

*2,6-Dichlorbenzamid*, Metabolit der PSM-Wirkstoffe *Dichlobenil* und *Fluopicolid*, wurde im Vergleich zu den Metaboliten von *Chloridazon* und *Metolachlor* in Regionen mit hohem Ackeranteil deutlich seltener nachgewiesen. Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l traten stattdessen hauptsächlich bei Grasland und in Weinbaugebieten sowie in Siedlungsnähe auf (Abb. 11.8). *2,6-Dichlorbenzamid* wurde v. a. in der Nordostschweiz, aber auch in den Voralpen, am Genfersee und im Rhonetal nachgewiesen.

Abbildung 11.2

#### PSM-Wirkstoffe im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil offenes Ackerland pro Gemeindefläche. BG: Bestimmungsgrenze.

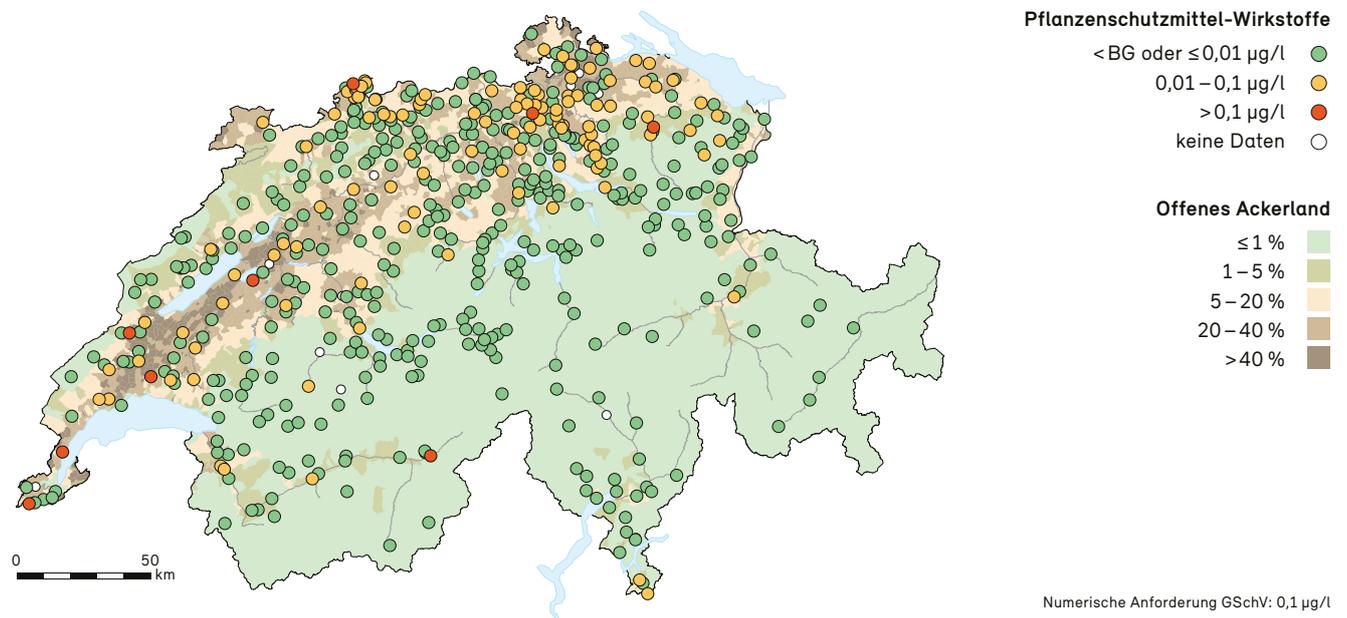


Abbildung 11.3

Im Zulassungsverfahren als relevant eingestufte PSM-Metaboliten im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil offenes Ackerland pro Gemeindefläche. BG: Bestimmungsgrenze.

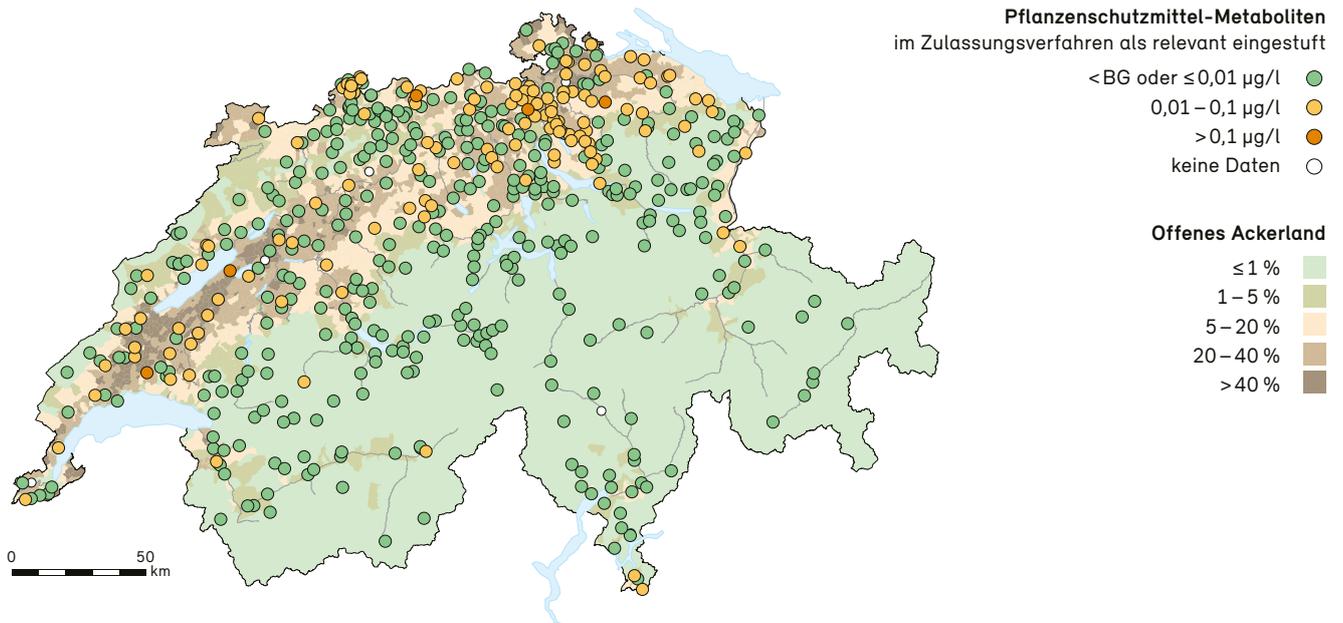


Abbildung 11.4

Im Zulassungsverfahren als nicht relevant eingestufte PSM-Metaboliten im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil offenes Ackerland pro Gemeindefläche. BG: Bestimmungsgrenze.

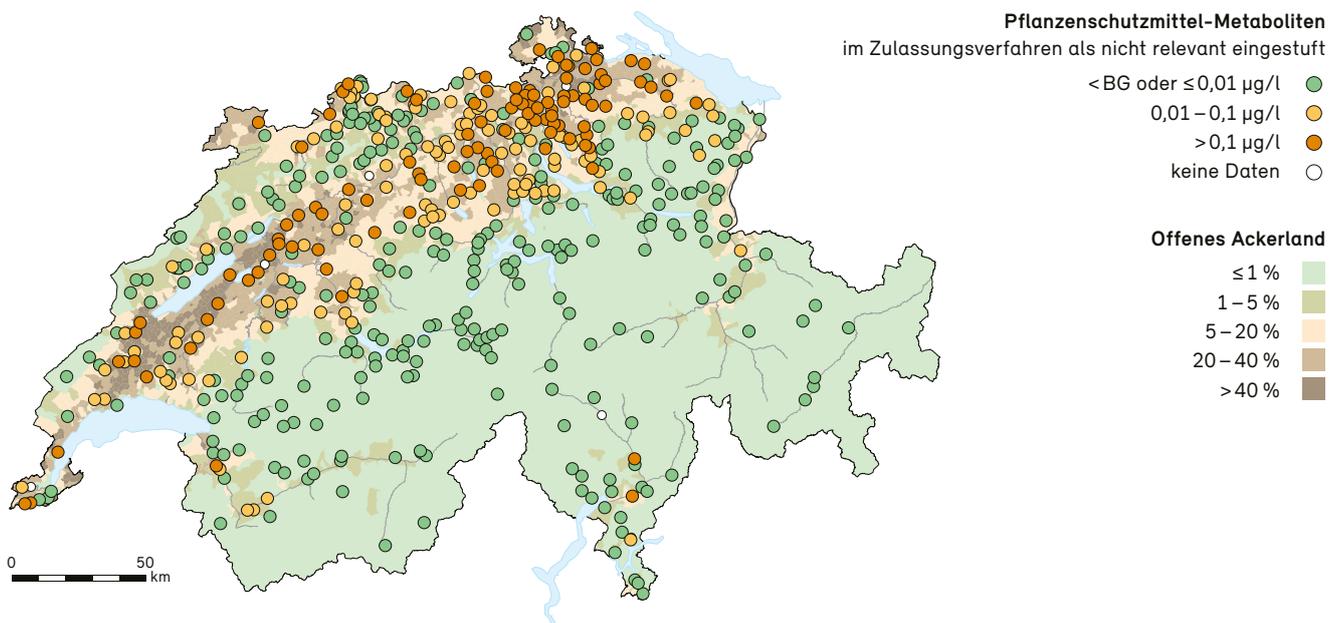


Abbildung 11.5

Rückstände von Chloridazon im Grundwasser (2014) sowie Anbau von Zucker- und Futterrüben

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil Futter- und Zuckerrüben pro Gemeindefläche.

BG: Bestimmungsgrenze.

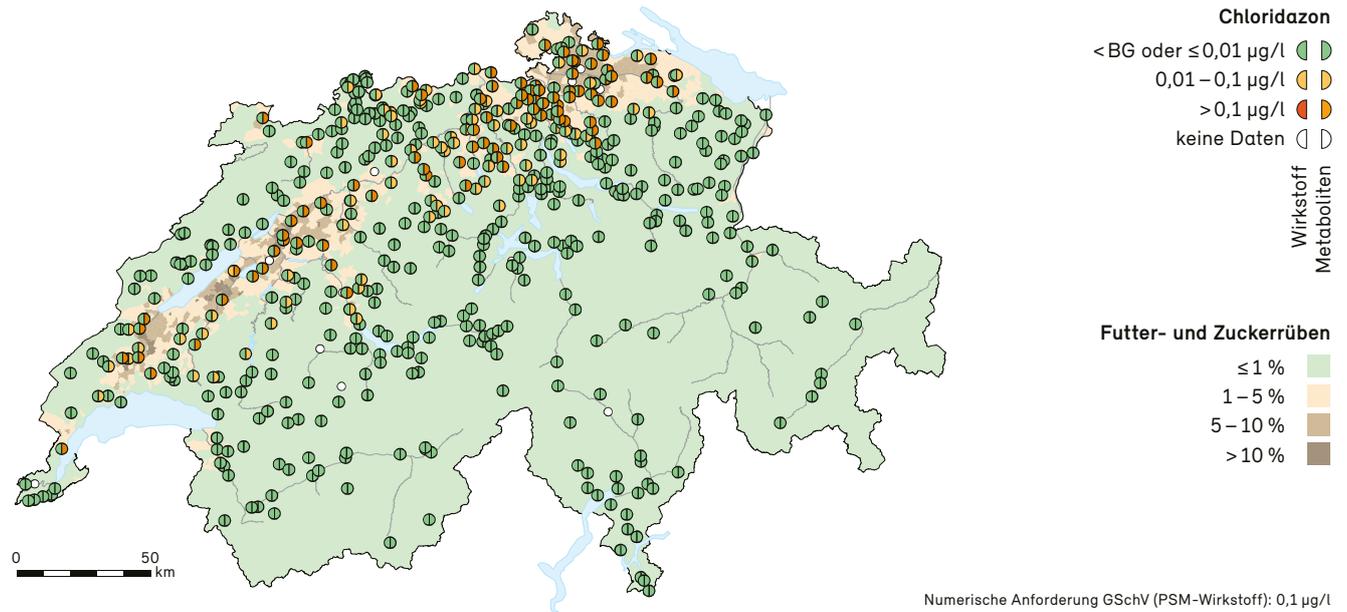


Abbildung 11.6

Rückstände von Metolachlor im Grundwasser (2014) sowie Anbau von Körner- und Silomais

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil Körner- und Silomais pro Gemeindefläche.

BG: Bestimmungsgrenze.

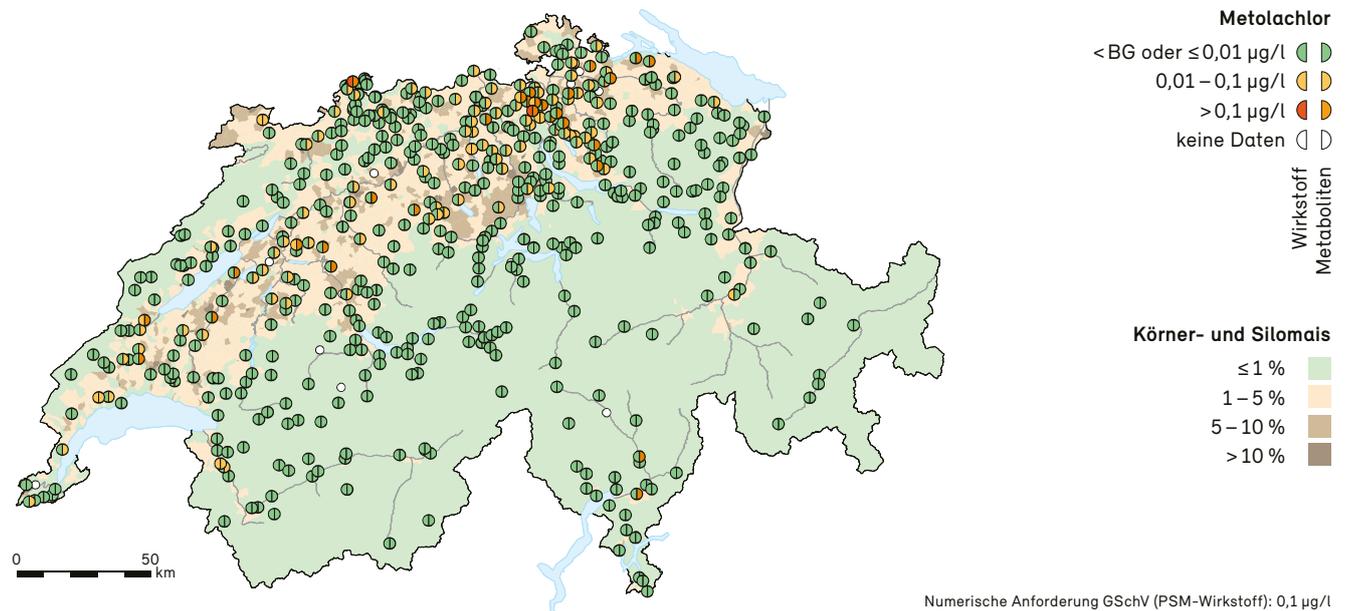


Abbildung 11.7

Rückstände von Atrazin im Grundwasser (2014) sowie Anbau von Körner- und Silomais

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil Körner- und Silomais pro Gemeindefläche.

BG: Bestimmungsgrenze.

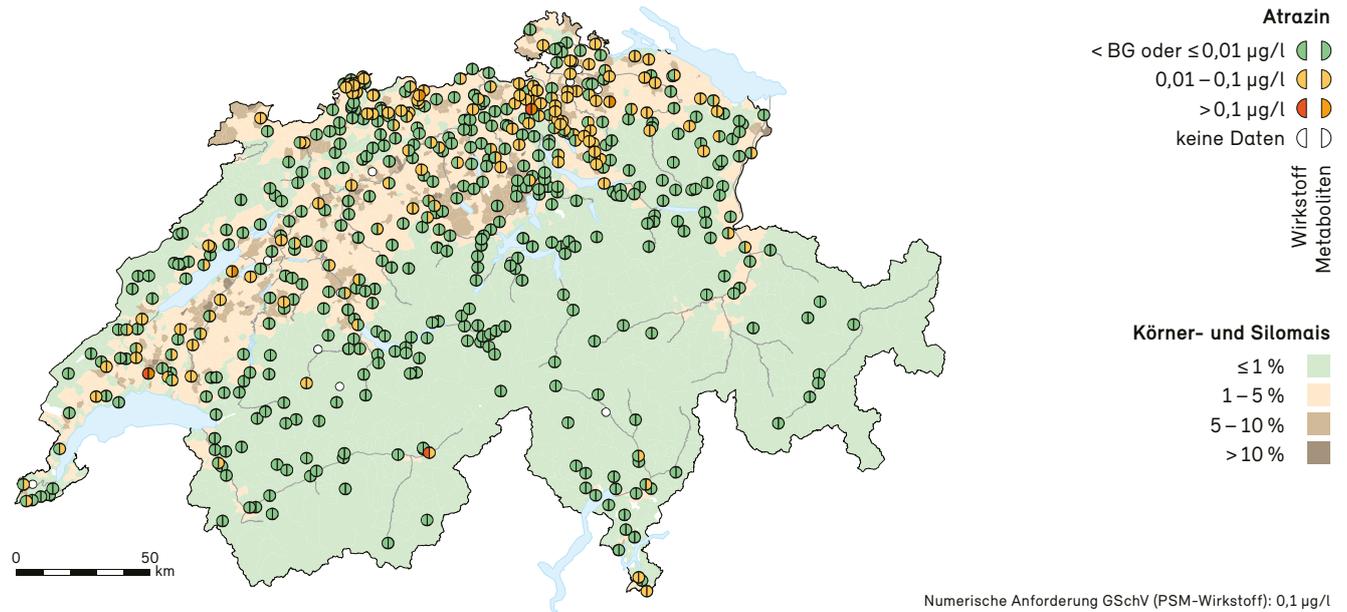
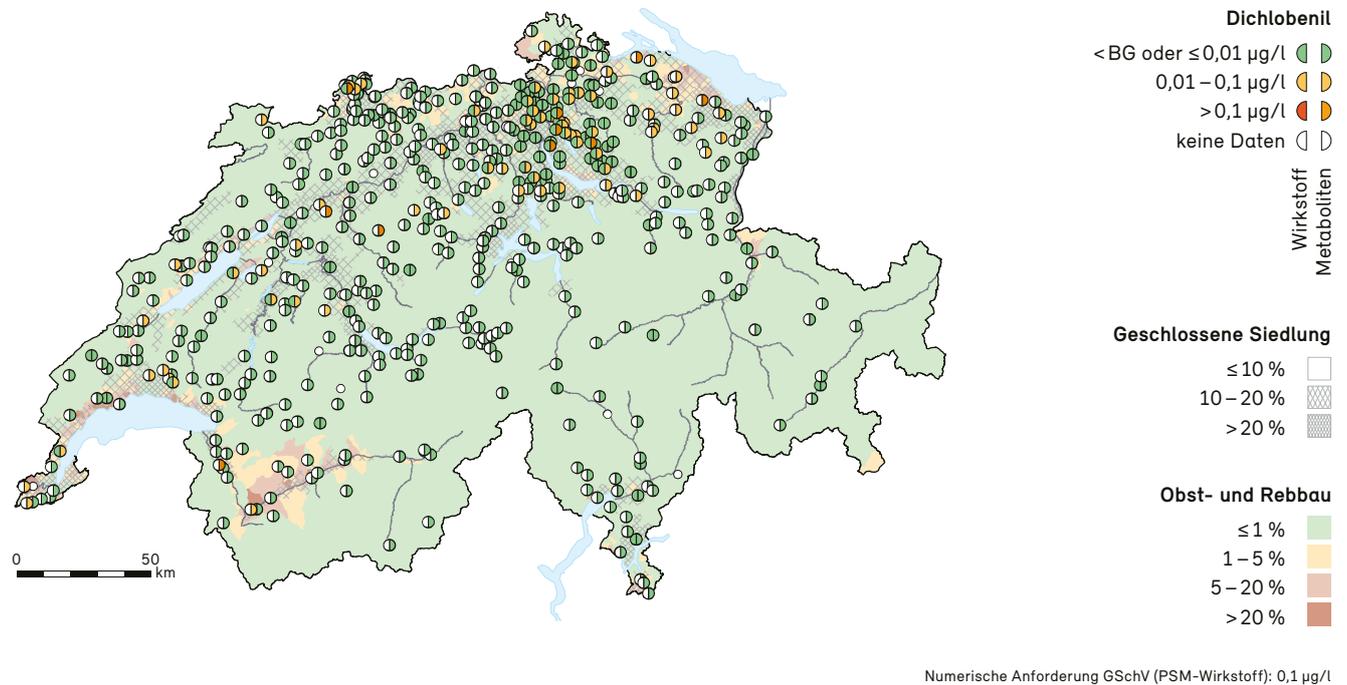


Abbildung 11.8

Rückstände von Dichlobenil im Grundwasser (2014) sowie Siedlungsfläche, Obst- und Rebbau

Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Anteil Siedlungsgebiet bzw. Obst- und Rebbau pro Gemeindefläche. BG: Bestimmungsgrenze.

BG: Bestimmungsgrenze.



### 11.3.3 Bodennutzung

#### PSM-Rückstände bei Ackerbau weit verbreitet

An fast allen Messstellen, deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Ackerbau» geprägt ist, traten PSM-Rückstände auf. PSM-Wirkstoffe überschritten dort die numerische Anforderung der GSchV im Jahr 2014 an 4 % der Messstellen (Abb. 11.9). PSM-Metaboliten wurden an 65 % dieser Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser nachgewiesen.

#### PSM-Rückstände auch im Siedlungsgebiet

Auch an Messstellen, die mit der Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» klassiert sind, wurden überdurchschnittlich häufig Rückstände von PSM nachgewiesen (Abb. 11.9). PSM-Wirkstoffe überschritten an 4 % dieser Messstellen die numerische Anforderung der GSchV. PSM-Metaboliten traten an 19 % der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. Für Werte über 0,1 µg/l waren Rückstände von *Atrazin*, *Metolachlor*, *Bentazon*, *Chloridazon* und *Tolyfluanid* bzw. *Dichlofluanid* verantwortlich. Insbesondere die Metaboliten von *Chloridazon* und *Metolachlor* dürften allerdings

nicht aus dem Siedlungsgebiet, sondern von den umliegenden Agrarflächen stammen. Die enge Verzahnung unterschiedlicher Bodennutzungen im Einzugsgebiet der Messstellen bedingt, dass auch kleinere, landwirtschaftlich genutzte Flächen die Grundwasser-Qualität an diesen Messstellen signifikant beeinträchtigen können.

#### Kaum erhöhte Werte in abgelegenen Gebieten

An Messstellen mit den Hauptbodennutzungen «Sömmerungsweiden» und «Unproduktive Gebiete» wurden fast keine PSM-Rückstände im Grundwasser nachgewiesen (Abb. 11.9). Alle diese Messstellen liegen auf 800 bis 2000 m in den Alpen oder Voralpen und werden, wenn überhaupt, extensiv bewirtschaftet. Auch an Messstellen, die mit der Hauptbodennutzung «Wald» klassiert sind, wurden selten PSM-Rückstände im Grundwasser nachgewiesen. 2014 überschritten PSM-Wirkstoffe bei Wald an keiner Messstelle die numerische Anforderung der GSchV. Die PSM-Metaboliten *Metolachlor-ESA*, *Desphenyl-chloridazon* und *Methyl-desphenyl-chloridazon*, die dort vereinzelt in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auftraten, dürften von einzelnen Landwirtschaftsflächen im Einzugsgebiet der betroffenen Messstellen stammen.

Abbildung 11.9

#### PSM-Wirkstoffe und PSM-Metaboliten im Grundwasser (2014) in Relation zur Hauptbodennutzung

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 90 Mst.; Ackerbau: 92 Mst.; Gras- & Viehwirtschaft: 142 Mst.; Wald: 159 Mst.; Sömmerungsweiden, Unproduktive Gebiete: 35 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle. BG: Bestimmungsgrenze.

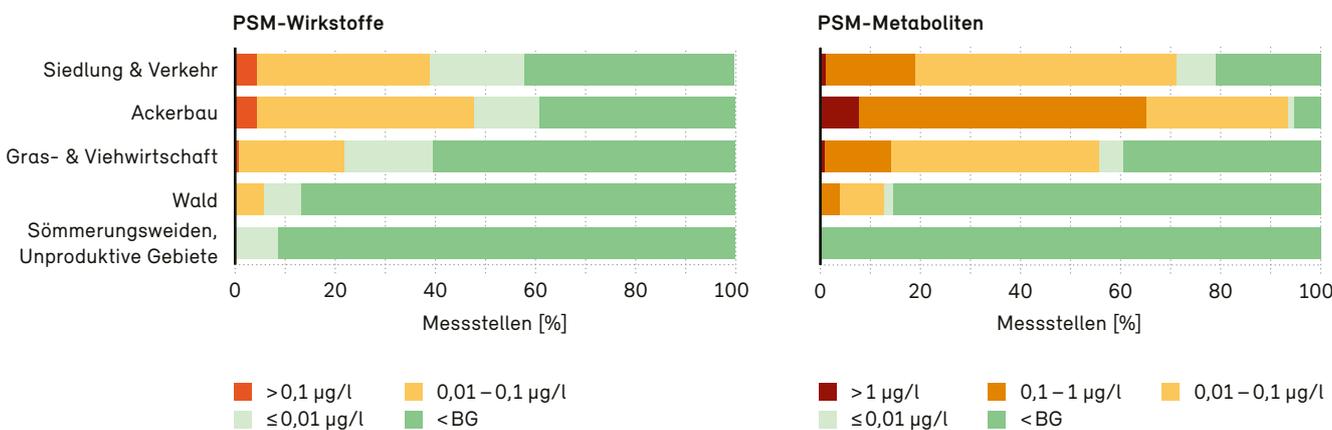


Tabelle 11.4

**PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser (2007 bis 2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Jahr | Messstellen [Anzahl] |               |      |             |            |            |            |          | Messstellen [%] |  |
|------|----------------------|---------------|------|-------------|------------|------------|------------|----------|-----------------|--|
|      | beprobt              | Konzentration |      |             |            |            |            | > 1 µg/l | > 0,1 µg/l      |  |
|      |                      | < BG          | ≥ BG | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l | > 0,3 µg/l | > 0,5 µg/l |          |                 |  |
| 2007 | 476                  | 208           | 268  | 258         | 54         | 8          | 2          | 1        | 11,3            |  |
| 2008 | 525                  | 270           | 255  | 244         | 44         | 5          | 3          | 1        | 8,4             |  |
| 2009 | 530                  | 255           | 275  | 253         | 47         | 11         | 6          | 4        | 8,9             |  |
| 2010 | 532                  | 246           | 286  | 274         | 115        | 42         | 21         | 5        | 21,6            |  |
| 2011 | 530                  | 237           | 293  | 273         | 109        | 46         | 25         | 9        | 20,6            |  |
| 2012 | 532                  | 253           | 279  | 256         | 108        | 40         | 20         | 7        | 20,3            |  |
| 2013 | 531                  | 228           | 303  | 276         | 118        | 40         | 25         | 8        | 22,2            |  |
| 2014 | 530                  | 231           | 299  | 264         | 107        | 44         | 28         | 9        | 20,2            |  |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

## 11.4 Entwicklung

### Gesamtsituation seit 2010 unverändert

Die Zahl der Messstellen, an denen PSM-Rückstände in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen wurden, ist seit 2010 weitgehend stabil und liegt bei jährlich rund 110 Messstellen (Tab. 11.4). Zuvor waren erhöhte Konzentrationen von PSM-Rückständen deutlich seltener aufgetreten. Hauptgrund für die deutliche Zunahme von 2009 auf 2010 ist die Erweiterung des analytischen Spektrums. Rückstände von *Chloridazon*, welche die statistischen Kenngrössen massgeblich beeinflussen, werden erst seit 2010 landesweit im Rahmen von NAQUA analysiert.

### PSM-Wirkstoffe sporadisch und punktuell

PSM-Wirkstoffe traten in den Jahren 2007 bis 2014 insgesamt eher selten, unregelmässig und meist an jeweils unterschiedlichen Messstellen im Grundwasser auf. Pro Jahr überschritten 2 bis 7 PSM-Wirkstoffe die numerische Anforderung der GSchV von 0,1 µg/l (Tab. 11.5). Die beiden PSM-Wirkstoffe, die jedes Jahr mehrfach zur Überschreitung der numerischen Anforderung der GSchV führten, waren *Atrazin* und *Metolachlor*. Auch *Bentazon* wurde von 2007 bis 2014 wiederholt in diesen Konzentrationen nachgewiesen. *Atrazin* überschreitet im gesam-

ten Zeitraum die numerische Anforderung der GSchV an 15 verschiedenen Messstellen, *Metolachlor* und *Bentazon* an 8 bzw. 7 Messstellen. An je 2 Messstellen traten vereinzelt *Isoproturon*, *Mecoprop* und *Metamitron* in Konzentrationen über 0,1 µg/l auf. Die PSM-Wirkstoffe *Chlortoluron*, *MCPA*, *Metazachlor* und *Propazin* wurden von 2007 bis 2014 jeweils lediglich einmal in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen, ebenso die nicht landesweit analysierten PSM-Wirkstoffe *Ethofumesat*, *Glyphosat* und *Metaldehyd*. Insgesamt 13 verschiedene PSM-Wirkstoffe wurden von 2007 bis 2014 in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen. Die Wirkstoffe *Chlortoluron*, *Ethofumesat*, *Glyphosat*, *Isoproturon*, *Metaldehyd* und *Metamitron* überschritten in diesem Zeitraum ausschliesslich in Karst-Grundwasserleitern die numerische Anforderung der GSchV.

### PSM-Metaboliten mit geringen Schwankungen

PSM-Metaboliten wurden dagegen deutlich häufiger als PSM-Wirkstoffe nachgewiesen und traten meist an den gleichen Messstellen in jeweils relativ konstanten Konzentrationen im Grundwasser auf. So wurden *Desethyl-atrazin*, *Desphenyl-chloridazon*, *Methyl-desphenyl-chloridazon*, *Metolachlor-ESA* und *Metolachlor-OXA* von 2007 bis 2014 wiederholt bzw. regelmässig in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewie-

sen (Tab. 11.5). Einzelwerte über 0,1 µg/l waren auf die Metaboliten *Desisopropyl-atrazin* und *Propachlor-ESA* beschränkt. Die bisher nicht landesweit untersuchten PSM-Metaboliten *N,N-Dimethylsulfamid*, *Dimethachlor-ESA*, *Dimethachlor-OXA*, *AMPA*, *Metazachlor-ESA* und

*Metazachlor-OXA* traten an 1 bis 8 Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. Insgesamt wurden von 2007 bis 2014 13 verschiedene PSM-Metaboliten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen.

Tabelle 11.5

PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser (2007 bis 2014) in Relation zur numerischen Anforderung GSchV bzw. einer Konzentration von 0,1 µg/l

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. Aufgeführt sind alle Substanzen, die in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen wurden.

| PSM-Wirkstoff                | PSM-Metabolit                | Messstellen [Anzahl]     |      |      |      |      |      |      |      |           |  |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|--|
|                              |                              | Konzentration > 0,1 µg/l |      |      |      |      |      |      |      |           |  |
|                              |                              | 2007                     | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2007–2014 |  |
| 2,4-D                        |                              | –                        | –    | –    | –    | 1    | –    | –    | –    | 1         |  |
| Atrazin                      |                              | 14                       | 6    | 7    | 7    | 6    | 6    | 4    | 3    | 15        |  |
| (Atrazin)                    | Desethyl-atrazin             | 18                       | 13   | 13   | 12   | 13   | 13   | 9    | 4    | 22        |  |
| (Atrazin)                    | Desisopropyl-atrazin         | –                        | –    | 2    | –    | –    | –    | –    | –    | 2         |  |
| Bentazon                     |                              | –                        | –    | 2    | 3    | –    | –    | 1    | 4    | 7         |  |
| (Chloridazon)                | Desphenyl-chloridazon        | 2                        | 2    | –    | 89   | 80   | 83   | 83   | 84   | 96        |  |
| (Chloridazon)                | Methyl-desphenyl-chloridazon | –                        | –    | –    | 24   | 27   | 24   | 27   | 24   | 33        |  |
| Chlortoluron                 |                              | –                        | –    | –    | –    | –    | –    | 1    | –    | 1         |  |
| (Dichlobenil, Fluopicolid)   | 2,6-Dichlorbenzamid          | 13                       | 13   | 15   | 8    | 13   | 8    | 7    | 10   | 25        |  |
| (Dichlofluanid, Tolyfluanid) | N,N-Dimethylsulfamid (DMS)*  | –                        | –    | /    | 8    | 6    | 2    | 7    | 5    | 8         |  |
| (Dimethachlor)               | Dimethachlor-ESA*            | –                        | –    | /    | –    | –    | –    | 1    | 1    | 2         |  |
| (Dimethachlor)               | Dimethachlor-OXA*            | –                        | –    | /    | 1    | –    | –    | –    | 1    | 2         |  |
| Ethofumesat*                 |                              | –                        | –    | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |  |
| Glyphosat*                   |                              | 1                        | –    | /    | –    | –    | /    | /    | /    | 1         |  |
| (Glyphosat)                  | AMPA*                        | 1                        | –    | /    | –    | 1    | /    | /    | /    | 2         |  |
| Isoproturon                  |                              | –                        | –    | 1    | 1    | –    | –    | –    | –    | 2         |  |
| MCPA                         |                              | –                        | –    | –    | –    | –    | –    | 1    | –    | 1         |  |
| Mecoprop                     |                              | –                        | –    | –    | –    | –    | –    | 2    | 1    | 2         |  |
| Metaldehyd*                  |                              | /                        | /    | –    | –    | –    | 1    | –    | –    | 1         |  |
| Metamitron                   |                              | –                        | –    | 1    | –    | –    | 1    | –    | –    | 2         |  |
| Metazachlor                  |                              | –                        | –    | –    | –    | –    | 1    | 1    | 1    | 1         |  |
| (Metazachlor)                | Metazachlor-ESA*             | –                        | –    | 1    | 1    | 1    | 2    | 3    | 1    | 4         |  |
| (Metazachlor)                | Metazachlor-OXA*             | –                        | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 1    | 1         |  |
| Metolachlor                  |                              | 4                        | 3    | 4    | 2    | 3    | 2    | 2    | 2    | 8         |  |
| (Metolachlor)                | Metolachlor-ESA              | 15                       | 15   | 14   | 18   | 21   | 28   | 36   | 29   | 50        |  |
| (Metolachlor)                | Metolachlor-OXA              | 2                        | 3    | 2    | 3    | 4    | 4    | 4    | 2    | 6         |  |
| (Propachlor)                 | Propachlor-ESA               | –                        | –    | –    | –    | –    | 1    | –    | –    | 1         |  |
| Propazin                     |                              | –                        | –    | –    | 1    | –    | –    | –    | –    | 1         |  |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

(...) Ausgangssubstanz des jeweiligen PSM-Metaboliten

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

/ keine Daten

### Triazine mit rückläufiger Tendenz

Die Belastung des Grundwassers mit Rückständen von *Atrazin*, *Simazin* und *Terbutylazin* hat in den letzten 10 Jahren signifikant abgenommen (Abb. 11.10). Die Zahl der Überschreitungen der numerischen Anforderung der GSchV durch *Atrazin* ist von rund 5 % im Jahr 2004 (BAFU 2009a) auf knapp 1 % im Jahr 2014 zurückgegangen, und auch bei seinem Metaboliten *Desethyl-atrazin* war ein ähnlicher Rückgang von 6 % auf etwa 1 % der Messstellen zu verzeichnen. *Simazin* und *Terbutylazin*, die insgesamt selten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auftraten, wurden seit 2006 bzw. 2005 nicht mehr in Konzentrationen über 0,1 µg/l nachgewiesen.

### Zunahme Rückstände Metolachlor

Dagegen hat sich die Zahl der Messstellen, an denen die Metaboliten *Metolachlor-ESA* und *Metolachlor-OXA* in Konzentrationen über 0,1 µg/l auftraten, seit 2009 etwa verdoppelt (Abb. 11.10). Im Jahr 2009 wurde *Metolachlor-ESA* an rund 3 % aller Messstellen in Konzentrationen über 0,1 µg/l nachgewiesen, im Jahr 2014 an insgesamt mehr als 5 % der Messstellen.

### Keine signifikanten Veränderungen der übrigen PSM

Bei allen übrigen Substanzen, wie z. B. *Desphenyl-chloridazon*, *Methyl-desphenyl-chloridazon* oder *2,6-Dichlorbenzamid*, war keine signifikante Veränderung erkennbar (Abb. 11.10).

## 11.5 Analyse

### 11.5.1 Gesamtsituation Grundwasser-Qualität

#### Grundwasser-Qualität nachhaltig beeinträchtigt

PSM-Wirkstoffe überschreiten die numerische Anforderung der GSchV von 0,1 µg/l an rund 2 % der Messstellen. An rund 20 % der Messstellen treten zudem PSM-Metaboliten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. Insgesamt wurden Rückstände von PSM, d.h. von PSM-Wirkstoffen und -Metaboliten, an über der Hälfte aller Messstellen im Grundwasser nachgewiesen. Somit beeinträchtigen diese die Grundwasser-Qualität in der Schweiz verbreitet und nachhaltig.

#### PSM-Metaboliten im Grundwasser unerwünscht

PSM-Metaboliten treten im Vergleich zu PSM-Wirkstoffen landesweit häufiger, regelmässiger und auch in höheren Konzentrationen im Grundwasser auf. Viele PSM-Metaboliten sind im Vergleich zu den PSM-Wirkstoffen mobiler und gleichzeitig langlebiger. Allerdings enthält die GSchV für die meisten PSM-Metaboliten keine spezifische numerische Anforderung. Unabhängig von ihrer Human- und Ökotoxizität zählen diese PSM-Metaboliten aber zu den künstlichen, langlebigen Substanzen, die gemäss GSchV nicht im Grundwasser vorkommen sollen. Ihr Eintrag ins Grundwasser muss auch im Sinn eines vorsorgenden Schutzes des Grundwassers als wichtigste Trinkwasserressource verhindert bzw. minimiert werden. PSM-Metaboliten sind – ebenso wie PSM-Wirkstoffe – im Grundwasser generell unerwünscht.

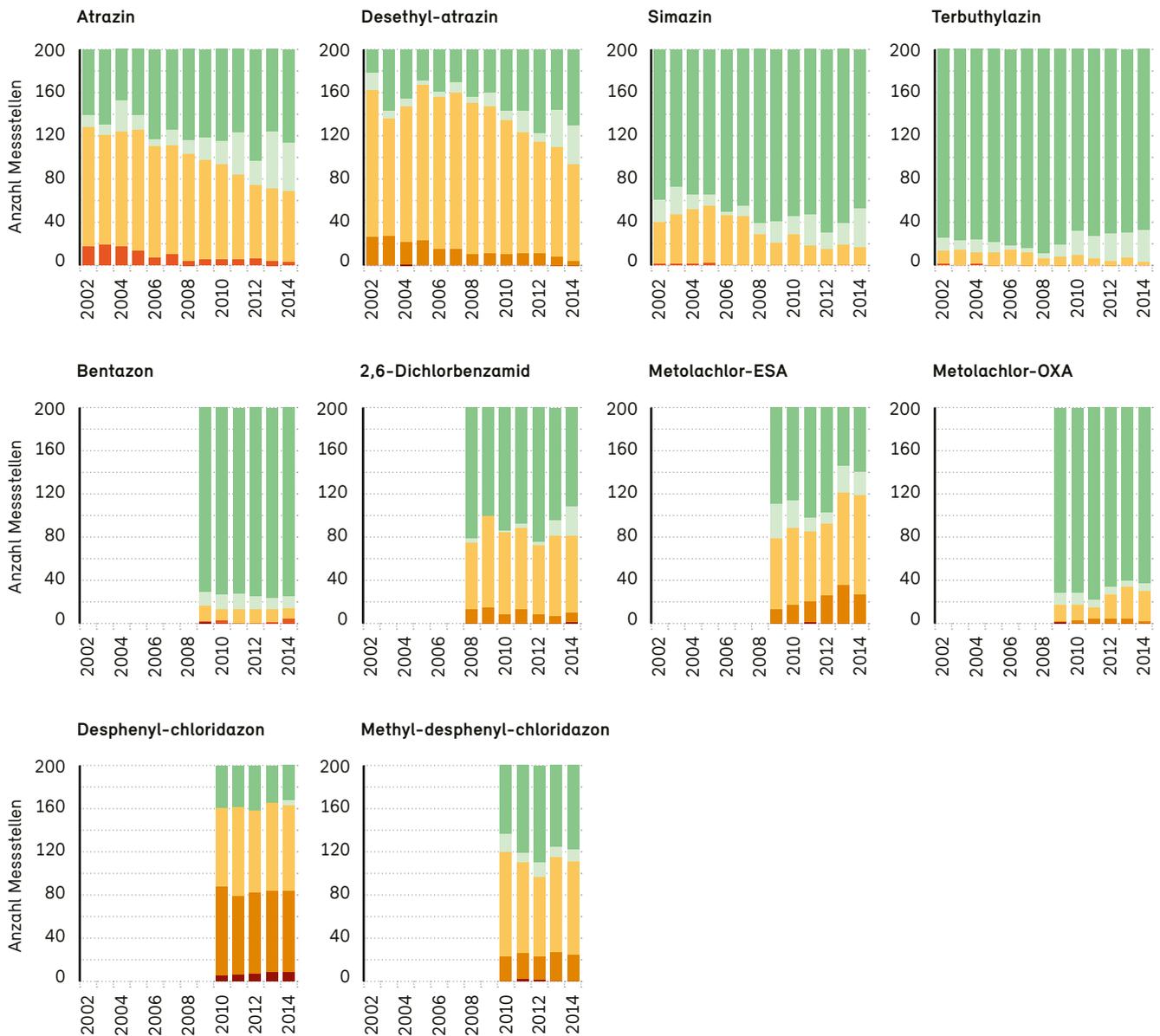
#### Langlebige, mobile PSM-Rückstände potenziell kritisch

Die meisten PSM-Rückstände, die im Grundwasser verbreitet in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auftreten, sind schlecht abbaubar und/oder im Boden mobil. Sie stammen darüber hinaus meist von PSM-Wirkstoffen ab, die in grösseren Mengen eingesetzt werden bzw. wurden. Gelangen diese Substanzen vom Boden ins Grundwasser, so werden sie dort nur noch sehr langsam abgebaut. Besonders kritisch sind präferenzielle Fließwege im Boden, wie z. B. Wurzelkanäle, Regenwurmgänge oder Trockenrisse, welche die Filterwirkung des Bodens erheblich reduzieren und den Transport auch weniger mobiler Wirkstoffe ins Grundwasser beschleunigen. Ein grosser Teil des Grundwassers erneuert sich nur sehr langsam, weshalb PSM-Rückstände ausgesprochen lange im Untergrund verbleiben können. Deshalb ist es besonders wichtig, frühzeitig und vorausschauend zu agieren.

Abbildung 11.10

**Ausgewählte PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser (2002 bis 2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Berücksichtigt wurden ausschliesslich Messstellen, die in diesem Zeitraum jeweils mindestens einmal pro Jahr beprobt wurden. Messstellen je Parameter: Atrazin: 344 Mst. (2002 bis 2014); Desethyl-atrazin: 343 Mst. (2002 bis 2014); Simazin: 342 Mst. (2002 bis 2014); Terbutylazin: 338 Mst. (2002 bis 2014); Bentazon: 447 Mst. (2009 bis 2014); 2,6-Dichlorbenzamid: 515 Mst. (2008 bis 2014); Metolachlor-ESA: 403 Mst. (2009 bis 2014); Metolachlor-OXA: 403 Mst. (2009 bis 2014); Desphenyl-chloridazon: 413 Mst. (2010 bis 2014); Methyl-desphenyl-chloridazon: 416 Mst. (2010 bis 2014). BG: Bestimmungsgrenze.



**PSM-Wirkstoffe**

- >0,1 µg/l
- 0,01–0,1 µg/l
- ≤0,01 µg/l
- <BG

**PSM-Metaboliten**

- >1 µg/l
- 0,1–1 µg/l
- 0,01–0,1 µg/l
- ≤0,01 µg/l
- <BG

### Rückstände von Chloridazon und Metolachlor weit verbreitet

Im Grundwasser besonders weit verbreitet sind die Metaboliten von *Chloridazon* und *Metolachlor*. An über der Hälfte der Messstellen, an denen PSM-Metaboliten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auftreten, stammen diese von diesen beiden PSM-Wirkstoffen ab. Insbesondere der Metabolit *Desphenyl-chloridazon* tritt grossflächig in deutlich erhöhten Konzentrationen im Grundwasser auf.

### Insgesamt keine Verschlechterung erkennbar

Anhaltspunkte, dass sich die Grundwasser-Qualität insgesamt verschlechtert hat, liefern die vorliegenden Daten nicht. Die Zunahme der Nachweise von PSM-Rückständen im Grundwasser lässt sich weitgehend darauf zurückführen, dass das Langzeitmonitoring wiederholt um grundwassergängige PSM-Metaboliten erweitert wurde und dass die Bestimmungsgrenzen für verschiedene Substanzen gesenkt wurden. Einzig der PSM-Metabolit *Metolachlor-ESA* trat zuletzt häufiger und auch vermehrt in signifikant erhöhten Konzentrationen im Grundwasser auf.

### 11.5.2 Schwerpunkt der Belastung

#### Grundwasser-Qualität v. a. bei Ackerbau beeinträchtigt

Von PSM-Rückständen grossflächig betroffen ist vor allem das landwirtschaftlich intensiv genutzte und dicht besiedelte Mittelland. Punktuell treten PSM-Rückstände aber auch im Jura und in den Alpentälern auf. Am stärksten ist die Grundwasser-Qualität bei Ackerbau beeinträchtigt. Dort wurden 2014 an rund 66 % der Messstellen PSM-Rückstände in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser nachgewiesen. 97 % der Messstellen, die durch die Hauptbodennutzung «Ackerbau» geprägt sind, enthielten PSM-Rückstände. Die Landwirtschaft ist somit eindeutig die Hauptquelle für PSM-Rückstände im Grundwasser.

#### PSM auch aus dem Siedlungsgebiet

Im Siedlungsgebiet, wo ebenfalls PSM-Rückstände in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen wurden, können einzelne dieser Substanzen auch aus Anwendungen in Privatgärten, Grünanlagen, Baumaterialien oder aus ihrem früheren Einsatz entlang von Strassen und Gleisanlagen stammen. Fehlt eine unge-

störte, sorptive Bodenschicht, die das Grundwasser vor dem Eintrag von Schad- und Fremdstoffen schützt, können PSM-Rückstände direkt ins Grundwasser gelangen. Auf Wegen und Plätzen ist daher der Einsatz von PSM gegen «Unkräuter» (Herbizide) bereits seit mehreren Jahren verboten (Wittwer & Gubser 2010). An einzelnen Standorten im Siedlungsgebiet stammen die PSM im Grundwasser höchstwahrscheinlich aus der industriellen Produktion oder aus Deponien. Durch die kleinräumige Verzahnung verschiedener Nutzungen im Einzugsgebiet der Messstellen sind PSM-Rückstände im Grundwasser allerdings auch an Messstellen, die mit der Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» klassiert sind, häufig auf den PSM-Einsatz im angrenzenden Landwirtschaftsgebiet zurückzuführen.

#### Lockergestein – langlebige, mobile PSM-Rückstände

Lockergesteins-Grundwasserleiter, die in den Talsohlen weit verbreitet sind, sind in der Regel durch ungestörte und gut ausgebildete Böden relativ gut gegen den Eintrag von Fremdstoffen geschützt. Insbesondere die organische Substanz sowie die feinen Tonpartikel im Boden binden PSM meist gut und fördern deren Abbau. Der grösste Teil der applizierten PSM gelangt daher nicht bis in den darunterliegenden Grundwasserleiter. Im Untergrund kann zudem feinsandiges, langsam durchströmtes Lockergesteinsmaterial ebenfalls als Filter wirken. Dennoch können unter diesen Bedingungen langlebige und sehr mobile PSM-Rückstände, wie z. B. Metaboliten von *Chloridazon* oder *Metolachlor*, in grösseren Mengen ins Grundwasser gelangen. Trotz der eher geringen Vulnerabilität, d. h. geringen Empfindlichkeit, der Lockergesteins-Grundwasserleiter gegenüber Fremdstoffeinträgen, führt die intensive landwirtschaftliche Nutzung somit dazu, dass diese grossflächig mit PSM-Rückständen belastet sind.

#### Karst – PSM-Wirkstoffe über 0,1 µg/l

Karst-Grundwasserleiter, die im Jura und in den Kalkalpen verbreitet sind, sind meist von flachgründigen Böden bedeckt. Daher sind sie nur schlecht gegen den Eintrag von Fremdstoffen geschützt. In den Hohlräumen im Karst, in denen das Grundwasser fliesst, werden Fremdstoffe zudem relativ schnell und ohne signifikanten Rückhalt über grössere Distanzen transportiert. Karstregionen werden jedoch mehrheitlich nicht bzw. deutlich weniger intensiv landwirtschaftlich genutzt. PSM-Rückstände

werden deshalb dort insgesamt eher selten nachgewiesen. An den Messstellen in Karst-Grundwasserleitern, an denen PSM-Rückstände auftreten, können diese allerdings kurzfristig Konzentrationen von mehr als  $0,1 \mu\text{g/l}$  erreichen. Zudem überschreiten auffällig viele PSM-Wirkstoffe punktuell im Karst die numerische Anforderung der GSchV. Auch PSM, die als gut abbaubar gelten, können in Karst-Grundwasserleitern auftreten, wie z. B. *Chlortoluron*, *Ethofumesat*, *Glyphosat*, *Isoproturon*, *Metaldehyd* oder *Metamitron*.

### 11.5.3 PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Detail

#### Atrazin-«Altlasten»

Trotz Aufhebung der Genehmigung von *Atrazin* Anfang 2007 zählen dieser Wirkstoff und sein Metabolit *Desethyl-atrazin* weiterhin zu den PSM-Rückständen, die mit über 30% der Messstellen am häufigsten im Grundwasser auftreten (Abb. 11.1) und landesweit am weitesten verbreitet sind (Abb. 11.7). Das liegt einerseits an der schlechten Abbaubarkeit dieser beiden Substanzen und andererseits an den in der Vergangenheit grossen Einsatzmengen des Wirkstoffs. *Atrazin* wurde seit Ende der 50er-Jahre industriell produziert und zählte bis 2008 zu den Top-20-Wirkstoffen in der Schweiz. Pro Jahr wurden mehrere 10er Tonnen *Atrazin* als Vor- und Nachlauf-Herbizid u. a. beim Anbau von Mais, im Obst- und Weinbau sowie als Totalherbizid entlang von Strassen und Bahnlinien eingesetzt.

Die 3 Messstellen, an denen die numerische Anforderung der GSchV im Jahr 2014 durch *Atrazin* überschritten wurde, liegen im Siedlungsgebiet in unmittelbarer Nähe zu Strassen und Bahnlinien. Der Metabolit *Desethyl-atrazin* überschritt sowohl im Siedlungsgebiet als auch bei Ackerland die numerische Anforderung von  $0,1 \mu\text{g/l}$ . 3 der 5 Messstellen, an denen *Desethyl-atrazin* den Wert von  $0,1 \mu\text{g/l}$  überschritt, liegen in ergiebigen Lockergesteins-Grundwasserleitern, und jeweils 1 der Messstellen in einem Karst- bzw. Kluft-Grundwasserleiter.

Der langsame Rückgang der Konzentrationen von *Atrazin* und seinem Metaboliten *Desethyl-atrazin* sowie der von der chemischen Struktur her ähnlichen Triazin-Wirkstoffe *Simazin* und *Terbutylazin* im Grundwasser (Abb. 11.10) ist auf die schrittweise Einschränkung ihrer Zulassung

zurückzuführen. Auf und an Bahnanlagen darf *Atrazin* seit 1990 nicht mehr eingesetzt werden. In der Landwirtschaft wurde 1993 in einem ersten Schritt die Dosierung von *Atrazin*, *Simazin* und *Terbutylazin* auf  $1 \text{ kg Wirkstoff/ha}$  begrenzt. 1998 wurde der Einsatz von *Atrazin*, *Simazin* und *Terbutylazin* im Karst verboten, und 2003 wurde das Verbot für *Atrazin* und *Simazin* auf die Grundwasserschutzzone S2 ausgedehnt. Mittlerweile ist auch der Einsatz von *Terbutylazin* in den Schutzzonen S2 und S<sub>n</sub> verboten. Rückstände insbesondere von *Atrazin* werden allerdings aufgrund deren Persistenz noch viele Jahre im Grundwasser nachweisbar sein. In Deutschland, wo der Wirkstoff bereits seit 1991 verboten ist, findet man auch nach 25 Jahren noch *Atrazin*-Rückstände im Grundwasser (LUBW 2018).

#### Bentazon – GSchV überschritten

*Bentazon*, das von 2007 bis 2014 an insgesamt 7 verschiedenen Messstellen die numerische Anforderung der GSchV von  $0,1 \mu\text{g/l}$  überschritt (Tab. 11.10), wird seit seiner Erstzulassung 1978 beim Anbau von Getreide, Kartoffeln, Mais und verschiedenen Hülsenfrüchten (Bohnen, Erbsen, Klee, Soja) verwendet. Obwohl dieser sehr mobile PSM-Wirkstoff nicht mehr in den Schutzzonen S2 und S<sub>n</sub> eingesetzt werden darf (BLW 2018), wurde er auch 2014 an verschiedenen Messstellen in Konzentrationen von mehr als  $0,1 \mu\text{g/l}$  im Grundwasser nachgewiesen (Abb. 11.10). In der Schweiz wird *Bentazon* in einstelligen Tonnagen pro Jahr verkauft (BLW 2016b).

#### Chloridazon – Metaboliten aus dem Zuckerrübenanbau

*Chloridazon* ist seit seiner Erstzulassung 1964 ausschliesslich im Rübenanbau zugelassen und wird in einstelligen Tonnagen pro Jahr verkauft (BLW 2016b). Die Messstellen, an denen *Chloridazon* und/oder seine Metaboliten *Desphenyl-chloridazon* und *Methyl-desphenyl-chloridazon* nachgewiesen wurden, liegen daher primär in einem vergleichsweise schmalen Gürtel der Zuckerrüben-Anbauggebiete im Mittelland (Abb. 11.10). *Chloridazon* selbst ist mässig langlebig und tritt eher selten im Grundwasser auf. Die sehr mobilen und langlebigen Metaboliten, insbesondere *Desphenyl-chloridazon* (Halbwertszeit  $> 100$  Tage; PPDB 2009), wurden dagegen häufig und von allen PSM-Rückständen mit Abstand am häufigsten in Konzentrationen von mehr als  $0,1 \mu\text{g/l}$  nachgewiesen (Abb. 11.1). Konzentrationen von

mehr als 1 µg/l traten auffällig häufig in kleineren Grundwasservorkommen auf, wie z.B. in Grundwasserleitern der Molasse.

### **2,6-Dichlorbenzamid – Metabolit (Dichlobenil, Fluopicolid) bei Grasland und in Siedlungsnähe**

*2,6-Dichlorbenzamid* entsteht als Metabolit sowohl aus dem Herbizid *Dichlobenil* als auch aus dem Fungizid *Fluopicolid*. *Dichlobenil* war in der Schweiz von 1983 bis 2013 zugelassen und wurde bis zu diesem Zeitpunkt mit rund 10 t pro Jahr (BLW 2016b) im Rebbau, zur Unkrautbekämpfung bei Ziergehölzen (auch in Privatgärten) und zur Bekämpfung von Blacken auf Wiesen und Weiden eingesetzt. *Fluopicolid* ist aktuell zugelassen, wird allerdings in deutlich geringeren Mengen und ausschliesslich im Rebbau sowie beim Anbau von Kartoffeln eingesetzt. *Dichlobenil* gilt als mässig langlebig und mässig mobil, *Fluopicolid* als langlebig und mässig mobil. Der Metabolit *2,6-Dichlorbenzamid* ist dagegen sehr mobil und mit einer Halbwertszeit von mehr als 100 Tagen (PPDB 2009) sehr langlebig. Er wurde landesweit an 2 % der Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen und tritt primär im Siedlungsgebiet sowie bei Grünland auf (Abb. 11.10). Ein signifikanter Rückgang der Konzentrationen von *2,6-Dichlorbenzamid* ist bisher nicht erkennbar (Abb. 11.10).

### **Dimethachlor – Metaboliten im Karst**

Das Raps-Herbizid *Dimethachlor*, von dem in der Schweiz mehrere Tonnen pro Jahr verkauft werden (BLW 2016b), gilt als relativ gut abbaubar, aber mobil. Zwei seiner an einzelnen Messstellen untersuchten Metaboliten, *Dimethachlor-ESA* und *Dimethachlor-OXA*, sind ebenfalls relativ gut abbaubar, sorbieren jedoch schlecht und sind daher extrem mobil. Die beiden Messstellen, an denen die Metaboliten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen wurden (Tab. 11.10), liegen in Karst-Grundwasserleitern. Diese sind besonders vulnabel gegenüber dem Eintrag von Fremdstoffen.

### **Glyphosat – GSchV vereinzelt überschritten**

*Glyphosat* ist das mit Abstand am meisten eingesetzte PSM. In der Schweiz werden pro Jahr rund 200 t dieses Wirkstoffs verkauft (BLW 2019b). Als Totalherbizid kommt es sowohl in der Landwirtschaft wie auch entlang von Bahnlinien und Strassen sowie in Privatgärten zum

Einsatz. Es sorbiert v. a. gut an mineralische Bodenpartikel und gilt mit einer durchschnittlichen Halbwertszeit von 15 Tagen (PPDB 2009) als kurzlebig. Sein Metabolit *AMPA* ist ebenfalls wenig mobil, aber mit einer Halbwertszeit von über 150 Tagen (PPDB 2009) sehr langlebig. *Glyphosat* und *AMPA* wurden im Rahmen einer Pilotstudie 2016 bis 2017 an je 2 Messstellen in Konzentrationen über 0,1 µg/l nachgewiesen. Eine der beiden Messstellen liegt in einem Karst-Grundwasserleiter und war mehrfach von erhöhten *AMPA*-Werten betroffen.

### **Isoproturon – GSchV vereinzelt im Karst überschritten**

*Isoproturon* ist ein weit verbreitetes Getreide-Herbizid und zählte mit mehreren 10er Tonnen pro Jahr seit Beginn der Erhebungen zu den 20 meistverkauften PSM-Wirkstoffen in der Schweiz (BLW 2016b). Es ist relativ gut abbaubar und tritt dementsprechend insgesamt eher selten auf (Tab. 11.2). Die beiden Messstellen, an denen *Isoproturon* 2007 bis 2014 in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l nachgewiesen wurde (Tab. 11.5), liegen in Karst-Grundwasserleitern, die empfindlich gegenüber dem Eintrag von PSM bzw. Fremdstoffen sind. Seit 2018 ist dieser Wirkstoff nicht mehr zugelassen.

### **Mecoprop – GSchV im Siedlungsgebiet überschritten**

*Mecoprop*, das 2013 und 2014 an 2 Messstellen die numerische Anforderung der GSchV überschritt (Tab. 11.5), ist als *Mecoprop-P* in der Landwirtschaft u. a. für den Einsatz im Getreideanbau sowie für Kern- und Steinobst zugelassen. Zudem wird es auf Wiesen und Weiden gegen Blacken angewendet. Auch auf Zier- und Sportrasen sowie auf Böschungen und Grünstreifen entlang von Verkehrswegen kommt *Mecoprop* zum Einsatz. Daneben dient es auch als Durchwurzelungsschutz in Bitumendachbahnen. Pro Jahr werden in der Schweiz mehr als 10 t dieses sehr mobilen, aber relativ gut abbaubaren PSM-Wirkstoffs verkauft (BLW 2016b), der im Boden eine Halbwertszeit von rund 8 Tagen besitzt (PPDB 2009). Eine der beiden Messstellen, an denen die numerische Anforderung der GSchV überschritten wurde, liegt mitten im Siedlungsgebiet. Bei Ackerbau wurde *Mecoprop* eher selten nachgewiesen.

### **Metamitron – GSchV vereinzelt im Karst überschritten**

*Metamitron* zählt mit mehr als 50 t pro Jahr zu den 10 meistverkauften PSM-Wirkstoffen in der Schweiz (BLW

2016b). Es ist u. a. für den Einsatz im Futter- und Zuckerrübenanbau zugelassen und gilt daher als einer der Alternativwirkstoffe zu *Chloridazon*. Auch bei Gemüse und Kräutern kommt *Metamitron* zum Einsatz. Die beiden Messstellen, an denen *Metamitron* die numerische Anforderung der GSchV je einmal überschritt (Tab. 11.5), liegen in Karst-Grundwasserleitern. Der Metabolit *Desamino-metamitron* wird gemäss Angaben des BLW/BLV (2019) nicht in erhöhten Konzentrationen im Grundwasser erwartet. Die bisher für einzelne Messstellen vorliegenden Daten bestätigen diese Prognose.

#### **Metazachlor – GSchV überschritten, Metaboliten über 0,1 µg/l**

*Metazachlor* wird seit seiner Erstzulassung 1982 u. a. beim Anbau von Raps, aber auch von Gemüse und Beeren verwendet. Der Wirkstoff selbst, von dem in der Schweiz wenige Tonnen pro Jahr eingesetzt werden (BLW 2016b), ist mit einer Halbwertszeit von 9 Tagen (PPDB 2009) relativ rasch abbaubar. Von 2007 bis 2014 überschritt *Metazachlor* an einer einzigen Messstelle die numerische Anforderung der GSchV, dort jedoch seit 2013 bei jeder Beprobung (Tab. 11.5). Die betroffene Messstelle liegt in einem mässig ergiebigen Lockergesteins-Grundwasserleiter ausserhalb der Talsohlen. Der Metabolit *Metazachlor-ESA* ist mit einer Halbwertszeit von mehr als 100 Tagen (PPDB 2009) dagegen schlecht abbaubar und gleichzeitig sehr mobil. Er trat an 3 weiteren Messstellen in Konzentrationen über 0,1 µg/l auf, wurde aber nicht an allen Messstellen analysiert. Nach Angaben des BLW/BLV (2019) lässt sich nicht ausschliessen, dass weitere Metaboliten von *Metazachlor* im Grundwasser auftreten. In den Grundwasserschutz zonen S<sub>2</sub> und S<sub>n</sub> darf *Metazachlor* nicht mehr eingesetzt werden.

#### **Metolachlor – GSchV mehrfach überschritten, Metaboliten verbreitet über 0,1 µg/l**

*Metolachlor* bzw. das Isomer *S-Metolachlor* ist seit 1997 für den Anbau von Mais, Rüben und verschiedenen Sonderkulturen (Sonnenblumen, Soja, Gemüse) zugelassen. Der Wirkstoff darf allerdings mittlerweile nicht mehr in den Grundwasserschutz zonen S<sub>2</sub> und S<sub>n</sub> angewendet werden. Seit 1999 gehört der Wirkstoff mit mehreren 10er Tonnen pro Jahr zu den meistverkauften PSM in der Schweiz (BLW 2016b). *Metolachlor* überschritt an jeweils 2 bis 4 Messstellen pro Jahr die numerische Anforderung

der GSchV von 0,1 µg/l (Tab. 11.5). Der Metabolit *Metolachlor-ESA* trat von 2007 bis 2014 an insgesamt 50 Messstellen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l im Grundwasser auf. Während der Wirkstoff *S-Metolachlor* als relativ gut abbaubar gilt, ist der Metabolit *Metolachlor-ESA* mit einer Halbwertszeit von mehr als 100 Tagen (PPDB 2009) sehr langlebig und gleichzeitig aufgrund seiner geringen Sorption an Bodenpartikel sehr mobil. Die Zahl der Messstellen, an denen *Metolachlor-ESA* und ein weiterer Metabolit, *Metolachlor-OXA*, nachgewiesen wurden, hat sich von 2009 bis 2013 mehr als verdoppelt. Grund hierfür dürfte der steigende Einsatz von *Metolachlor* beim Anbau von Mais sein, insbesondere nach Aufhebung der Zulassung von *Atrazin*.

#### **Tolyfluanid, Dichlofluanid – problematischer Metabolit N,N-Dimethylsulfamid**

*N,N-Dimethylsulfamid (DMS)* entsteht als Metabolit der beiden Wirkstoffe *Tolyfluanid* und *Dichlofluanid*. *Dichlofluanid* ist zurzeit nur noch als Biozid in Holzschutzmitteln zugelassen, wurde bis Ende 2005 jedoch auch als PSM eingesetzt. *Tolyfluanid* wurde bis 2007 mit 5 bis 10 Tonnen pro Jahr als Fungizid im Obst-, Wein- und Gemüsebau angewendet, darf jedoch seither nicht mehr eingesetzt werden. Beide Wirkstoffe bauen sich relativ schnell zu *N,N-Dimethylsulfamid* ab. Im Einzugsgebiet der Messstellen, an denen *N,N-Dimethylsulfamid* eine Konzentration von 0,1 µg/l überschritt, werden immer auch Obst- oder Reben angebaut. In niedrigeren Konzentrationen trat *N,N-Dimethylsulfamid* zudem mehrfach direkt im Siedlungsgebiet sowie zusätzlich an einer Messstelle auf, deren Einzugsgebiet mitten im Wald liegt. Obwohl *N,N-Dimethylsulfamid* als nicht toxisch gilt, ist sein Auftreten im Grundwasser problematisch. Denn aus *N,N-Dimethylsulfamid* kann bei der Trinkwasseraufbereitung mit Ozon *N-Nitrosodimethylamin (NDMA)* entstehen, das als gentoxisch und humankanzerogen gilt (Schmidt & Brauch 2008).

#### 11.5.4 Monitoring

##### Zentraler Bestandteil im Langzeitmonitoring

PSM kommt im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA eine besondere Bedeutung zu. Sie werden bewusst in die Umwelt ausgebracht und grossflächig angewendet. Ihre Auswirkungen auf die Umwelt und das Grundwasser müssen daher gezielt beobachtet werden. Eine Erhebung von PSM-Rückständen im Boden ist im Rahmen des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel (Bundesrat 2017) vorgesehen. Sie wird ebenfalls dazu beitragen, die Gesamtbelastung der Umwelt durch den Einsatz von PSM repräsentativ zu erfassen. Die entsprechenden Aktivitäten werden mit dem NAQUA-Monitoring koordiniert.

##### Informationen aus PSM-Zulassung hilfreich

Eine besondere Herausforderung für das PSM-Monitoring ist der sich ändernde PSM-Markt. Um jeweils die neuen, potenziell grundwassergängigen Substanzen zu identifizieren, sind systematische Informationen aus dem Zulassungsverfahren notwendig. PSM-Metaboliten, die im Rahmen der Neu- bzw. Wiederzulassung («Reevaluation») der einzelnen Wirkstoffe in Konzentrationen von mehr als 0,1 bzw. 1 µg/l im Grundwasser prognostiziert werden, werden seit 2017 von BLW und BLV systematisch erfasst. Die entsprechende Übersicht wird regelmässig aktualisiert und publiziert (BLW/BLV 2019).

##### Screening auf breites Spektrum an PSM-Rückständen

Der Einsatz eines breit angelegten Screenings auf PSM-Rückstände bzw. auf Mikroverunreinigungen generell hat sich als essenziell erwiesen, um Substanzen zu identifizieren, die für das Grundwasser tatsächlich relevant sind. Nach einer ersten Pilotstudie «Screening» in den Jahren 2007 und 2008 (Kap. 15) findet seit 2017 in Zusammenarbeit mit der Eawag erneut ein Target-Screening statt, bei dem ausgewählte Messstellen auf rund 200 verschiedene PSM-Wirkstoffe untersucht werden. Zudem werden die entsprechenden Proben im Rahmen eines Suspect-Screenings auf etwa 1000 PSM-Metaboliten untersucht, welche aus den öffentlich zugänglichen Zulassungsdossiers zusammengetragen wurden (Latino et al. 2017). Die von BLW und BLV als potenziell grundwassergängig eingestufteten PSM-Meta-

boliten (BLW/BLV 2019) werden nach Möglichkeit in dieses Screening integriert.

##### Erhebung PSM-Einsatz sehr aufwendig

Die Zusammenhänge zwischen der Anwendung von PSM im Einzugsgebiet und dem Auftreten von PSM-Rückständen im Grundwasser sind komplex. Um sie besser zu verstehen, wäre es hilfreich zu wissen, welche PSM-Wirkstoffe im Einzelfall im Einzugsgebiet der einzelnen Messstellen zum Einsatz kommen und wann und in welchen Mengen sie appliziert werden. Die Erhebung dieser Daten spezifisch für NAQUA hat sich in der Pilotstudie «Dynamik Pflanzenschutzmittel» (2010/2011) jedoch als sehr aufwendig erwiesen und ist daher im Langzeitmonitoring zurzeit sistiert.

##### Beprobungsfrequenz im Karst erhöhen

Vermutlich unterschätzt wird die – zumindest kurzfristige – Belastung von Karst-Messstellen durch PSM-Rückstände und insbesondere durch PSM-Wirkstoffe. Mit 1 bis 2 Proben pro Jahr lässt sich die Variabilität an diesen Messstellen nicht genau genug erfassen. Eine gezielte Beprobung einzelner Karst-Messstellen mit hoher zeitlicher Auflösung ist daher im Rahmen der Umsetzung des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel (Bundesrat 2017) vorgesehen.

# 12 Flüchtige organische Verbindungen

## 12.1 Grundlagen

### Flüchtige organische Verbindungen VOC

Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) sind organische Kohlenstoff-Verbindungen, die aufgrund ihres hohen Dampfdruckes bzw. niedrigen Siedepunktes leicht verdampfen. Unter dem Begriff VOC wird eine Vielzahl von Substanzen aus unterschiedlichen Stoffgruppen zusammengefasst, wie z. B. flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW), monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) sowie weitere Einzelsubstanzen wie Naphthalin, *MTBE* (*Methyl-tert-butylether*) oder *ETBE* (*Ethyl-tert-butylether*).

### Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe FHKW

FHKW sind flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, bei denen ein oder mehrere Wasserstoff-Atome durch Halogen-Atome (hauptsächlich Fluor, Chlor und Brom) ersetzt sind. FHKW, die ausschliesslich Chlor als Halogen-Atom enthalten, bezeichnet man auch als chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW). In Industrie und Gewerbe werden FHKW vor allem als Reinigungs- und Lösungsmittel und zur Herstellung von Kunststoffen verwendet.

### Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe MAKW

MAKW sind monozyklische aromatische Kohlenwasserstoff-Verbindungen, d. h. sie enthalten einen Benzolring, wie z. B. *Benzol*, *Toluol*, *Ethylbenzol* und *Xylol* («BTEX-Aromate»). Verschiedene MAKW und speziell die BTEX sind Bestandteile von Benzin sowie in geringerem Ausmass auch von anderen Erdölprodukten wie Heizöl, Diesel oder Kerosin. MAKW werden zudem als Lösungsmittel verwendet und dienen in der chemischen Industrie als Ausgangsstoffe für die Synthese diverser organischer Verbindungen.

### Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bestehen aus mindestens zwei miteinander verbundenen Benzolringen. Der einfachste PAK ist *Naphthalin*, das aus zwei Benzolringen besteht. Es kommt u. a. in Diesel und Heizöl vor und wird als Ausgangsprodukt bei der Synthese von Lösungsmitteln oder Kunststoffen eingesetzt.

### MTBE und ETBE

*MTBE* und *ETBE* werden als Benzinzusatz zur Erhöhung der Klopfestigkeit verwendet. Sie haben im Treibstoff bleiorganische Verbindungen sowie teilweise Benzol und andere aromatische Kohlenwasserstoffe ersetzt. *MTBE* kommt ausserdem in der Industrie als Lösungs- und Extraktionsmittel zum Einsatz.

### 1,4-Dioxan

*1,4-Dioxan* ist eine heterozyklische organische Verbindung. Die Substanz wurde früher in grossen Mengen als Stabilisator bei der Lagerung und beim Transport von *1,1,1-Trichlorethan* verwendet. Heute wird *1,4-Dioxan* vor allem als Lösungs- und Entfettungsmittel eingesetzt.

### Eintrag ins Grundwasser

VOC werden hauptsächlich beim Umgang mit Treibstoffen und Lösungsmitteln sowie infolge von Unfällen in die Umwelt freigesetzt und können so ins Grundwasser eingetragen werden. Ausserdem gelangen diese Substanzen in Form von Verbrennungsrückständen oder durch die Verflüchtigung von Treibstoffen oder Lösungsmitteln in die Atmosphäre. Durch Versickerung von Niederschlags- und Oberflächenwasser können die Stoffe dann ins Grundwasser gelangen. Bei CKW-Verunreinigungen des Grundwassers sind häufig auch Altlasten die Ursache.

### FHKW und MAKW – GSchV: 1 µg/l

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) soll Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten. Für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, gilt nach Anhang 2 GSchV zusätzlich eine numerische Anforderung von 1 µg/l FHKW bzw. MAKW (je Einzelsubstanz).

### PAK – GSchV: 0,1 µg/l

Für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) beträgt die entsprechende zusätzliche numerische Anforderung nach Anhang 2 GSchV 0,1 µg/l (je Einzelsubstanz) für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist.

### MTBE – Indikatorwert 2 µg/l

Für *MTBE*, *ETBE* und *1,4-Dioxan* im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, enthält die GSchV keine spezifischen numerischen Anforderungen. Das Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Die Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004) legt für *MTBE* einen Indikatorwert von 2 µg/l fest, der potenziell auf eine problematische anthropogene Belastung des Grundwassers hinweist. Für Trinkwasser gilt gemäss der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) ein Höchstwert von 5 µg/l für die Summe von *MTBE* und *ETBE* sowie von 6 µg/l für *1,4-Dioxan*; die Höchstwerte der TBDV gelten durch den Verweis der GSchV auf die TBDV auch als numerische Anforderungen der GSchV für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser.

### VOC im Grundwasser als Indikator

FHKW, MAKW und die übrigen flüchtigen organischen Verbindungen sind zurzeit im BAFU-Indikator «Flüchtige organische Verbindungen VOC» zusammengefasst. Die langfristige und landesweite Erhebung der Konzentration verschiedener flüchtiger organischer Verbindungen im Rahmen von NAQUA ermöglicht es, Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Qualität auf Landesebene aufzuzeigen und problematische Einflüsse aus Gewerbe, Industrie und Siedlungsgebiet zu identifizieren. Ausgewählte Daten werden zudem an die Europäische Umweltagentur EUA (z. B. EUA 2018) übermittelt.

## 12.2 Datenerhebung

### Landesweite Daten

Landesweite Daten zu MAKW im Grundwasser werden seit 2002 im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA erhoben. FHKW, der PAK Naphthalin und MTBE sind erst seit 2006 Teil des Langzeitmonitorings, ETBE seit 2007. Alle knapp 550 Messstellen der Module TREND und SPEZ (Kap. 3) werden jeweils ein- bis viermal pro Jahr beprobt und auf FHKW, MAKW und weitere VOC analysiert. Die Beprobungsfrequenz richtet sich einerseits nach der bekannten Belastung der Messstellen und andererseits nach ihrer potenziellen Exposition gegen-

über FHKW, MAKW sowie weiteren VOC. So werden Messstellen im Siedlungsgebiet mindestens zweimal pro Jahr auf ausgewählte VOC untersucht.

### 35 Substanzen im Langzeitmonitoring

Im Rahmen des Langzeitmonitorings werden insgesamt 24 FHKW, 8 MAKW, 1 PAK sowie MTBE und ETBE analysiert (Tab. 12.1 – Tab. 12.4). Zusätzlich zu diesen Parametern übermitteln verschiedene kantonale Fachstellen die Analyseergebnisse weiterer VOC (z. B. *1,4-Dioxan*) ans BAFU.

### Pilotstudie «1,4-Dioxan» 2011/2012

2011 und 2012 fand eine Pilotstudie zu *1,4-Dioxan* im Modul TREND statt, um einen ersten Eindruck über die Relevanz dieser Substanz für das Grundwasser zu gewinnen. Alle 50 Messstellen dieses Moduls wurden in diesem Zeitraum zweimal auf *1,4-Dioxan* analysiert.

### Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren jeweils auf dem Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro Messstelle und Jahr. Präsentiert und analysiert werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings bis und mit 2014 sowie die Ergebnisse der Pilotstudie «1,4-Dioxan» 2011/2012.

### Zeitreihen

Das Spektrum der Substanzen, die im Langzeitmonitoring untersucht werden, wird regelmässig an die sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst und entwickelt sich so kontinuierlich weiter. Deshalb lässt sich nur eingeschränkt abschätzen, ob und wie sich die Grundwasser-Qualität hinsichtlich VOC im Lauf der Jahre insgesamt verändert hat. Die Analyse der langfristigen zeitlichen Entwicklung beschränkt sich daher jeweils auf einzelne Substanzen. Bei der Evaluation deren Entwicklung wurden jeweils nur diejenigen Messstellen berücksichtigt, die im relevanten Zeitraum mindestens einmal pro Jahr beprobt wurden.

Tabelle 12.1

## Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser (2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Substanz                 | Langzeitmonitoring<br>Start | Messstellen [Anzahl] |               |            |            |               | Messstellen [%] |  |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------|------------|---------------|-----------------|--|
|                          |                             | beprobte             | Konzentration |            |            | Konzentration |                 |  |
|                          |                             |                      | < BG          | ≥ BG       | > 0,1 µg/l | > 1 µg/l      | > 1 µg/l        |  |
| <b>FHKW, aliphatisch</b> |                             |                      |               |            |            |               |                 |  |
| 1,1-Dichlorethan         | 2006                        | 527                  | 522           | 5          | 1          | –             | –               |  |
| 1,1-Dichlorethen         | 2006                        | 527                  | 524           | 3          | –          | –             | –               |  |
| 1,2-Dichlorethan         | 2006                        | 527                  | 525           | 2          | 1          | –             | –               |  |
| 1,2-Dichlorpropan        | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| 1,1,1-Trichlorethan      | 2006                        | 527                  | 494           | 33         | 13         | 3             | 0,6             |  |
| 1,1,2,2-Tetrachlorethan  | 2006                        | 527                  | 526           | 1          | –          | –             | –               |  |
| Bromchlormethan*         | –                           | 355                  | 354           | 1          | –          | –             | *               |  |
| Bromdichlormethan        | 2006                        | 527                  | 525           | 2          | 1          | –             | –               |  |
| Brommethan*              | –                           | 488                  | 484           | 4          | 1          | –             | *               |  |
| Dibromchlormethan        | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| Dibrommethan             | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| Dichlordifluormethan     | 2006                        | 527                  | 520           | 7          | 6          | 1             | 0,2             |  |
| Chlorethen               | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| cis-1,2-Dichlorethen     | 2006                        | 527                  | 519           | 8          | 5          | –             | –               |  |
| Dichlormethan            | 2006                        | 524                  | 523           | 1          | –          | –             | –               |  |
| Hexachlorbutadien        | 2006                        | 527                  | 526           | 1          | 1          | –             | –               |  |
| Tetrachlorethen          | 2006                        | 527                  | 449           | 78         | 60         | 17            | 3,2             |  |
| Tetrachlormethan         | 2006                        | 527                  | 515           | 12         | 2          | –             | –               |  |
| Tribrommethan            | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| Trichlorethen            | 2006                        | 527                  | 479           | 48         | 38         | –             | –               |  |
| Trichlorfluormethan      | 2006                        | 527                  | 519           | 8          | 4          | 1             | 0,2             |  |
| Trichlormethan           | 2006                        | 527                  | 482           | 45         | 17         | –             | –               |  |
| <b>FHKW, aromatisch</b>  |                             |                      |               |            |            |               |                 |  |
| 1,2-Dichlorbenzol        | 2006                        | 527                  | 526           | 1          | 1          | 1             | 0,2             |  |
| 1,2,3-Trichlorbenzol     | 2006                        | 527                  | 526           | 1          | 1          | –             | –               |  |
| 1,2,4-Trichlorbenzol*    | –                           | 466                  | 465           | 1          | 1          | 1             | 0,2             |  |
| 1,3-Dichlorbenzol*       | –                           | 376                  | 375           | 1          | –          | –             | *               |  |
| 1,3,5-Trichlorbenzol*    | –                           | 12                   | 11            | 1          | 1          | –             | *               |  |
| 1,4-Dichlorbenzol*       | –                           | 376                  | 375           | 1          | –          | –             | *               |  |
| Brombenzol               | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| Chlorbenzol              | 2006                        | 527                  | 527           | –          | –          | –             | –               |  |
| <b>FHKW, total</b>       |                             | <b>527</b>           | <b>394</b>    | <b>133</b> | <b>98</b>  | <b>20</b>     | <b>3,8</b>      |  |

Numerische Anforderung GSchV: 1 µg/l

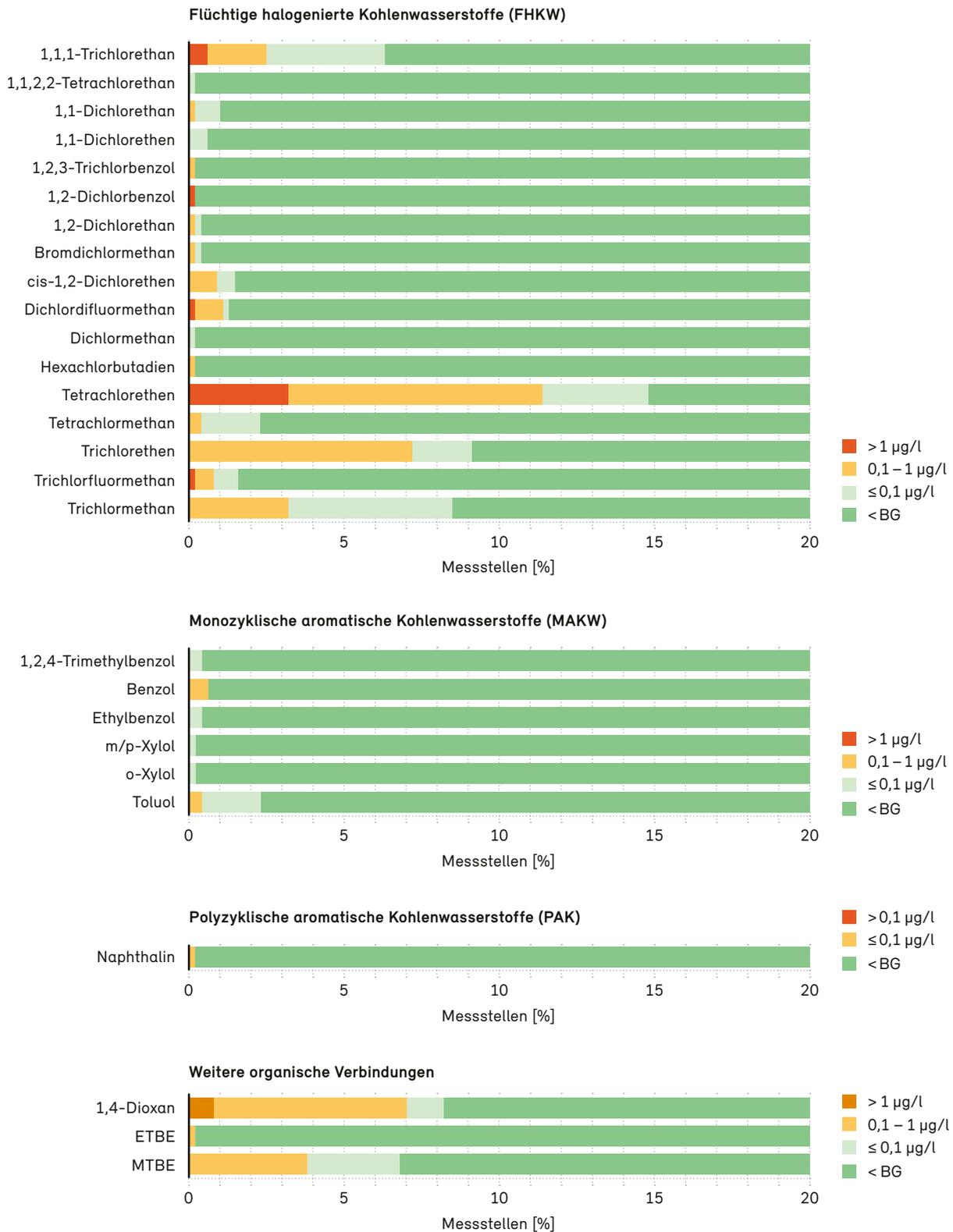
BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

Abbildung 12.1

**Flüchtige organische Verbindungen (VOC) im Grundwasser (2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Dargestellt sind alle Substanzen, die im Langzeitmonitoring in diesem Jahr analysiert und nachgewiesen wurden. BG: Bestimmungsgrenze.



## 12.3 Zustand

### 12.3.1 Überblick

#### FHKW – GSchV mehrfach überschritten

FHKW überschritten die numerische Anforderung der GSchV von 1 µg/l im Jahr 2014 landesweit an 20 Messstellen (Tab. 12.1). Dies entspricht einem Anteil von knapp 4 % der Messstellen. FHKW wurden an insgesamt 25 % der Messstellen nachgewiesen.

#### FHKW – Tetrachlorethen am häufigsten über 1 µg/l

Insgesamt 6 verschiedene FHKW traten 2014 in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l im Grundwasser auf (Tab. 12.1). Mit Abstand am häufigsten wurde der Anforderungswert der GSchV durch *Tetrachlorethen* überschritten (Abb. 12.1). An 17 Messstellen lagen die Konzentrationen von *Tetrachlorethen* über 1 µg/l; dies entspricht einem Anteil von mehr als 3 % der Messstellen. *1,1,1-Trichlorethan* überschritt die numerische Anforderung der GSchV an insgesamt 3 Messstellen. An jeweils 1 Messstelle lagen die Konzentrationen von *Dichlordifluormethan*, *Trichlorfluormethan*, *1,2-Dichlorbenzol* und *1,2,4-Trichlorbenzol* über 1 µg/l.

#### FHKW – 23 verschiedene Substanzen nachgewiesen

In Konzentrationen von weniger als 1 µg/l traten 2014 zudem weitere 17 FHKW auf. Insgesamt wurden so 23 verschiedene FHKW im Grundwasser nachgewiesen.

#### MAKW – GSchV nicht überschritten

MAKW überschritten 2014 die numerische Anforderung der GSchV von 1 µg/l an keiner der beprobten Messstellen (Tab. 12.2). MAKW traten insgesamt an knapp 3 % der Messstellen auf. 6 verschiedene MAKW wurden im Grundwasser nachgewiesen.

#### PAK – GSchV nicht überschritten

PAK überschritten 2014 die numerische Anforderung der GSchV von 0,1 µg/l ebenfalls nicht (Tab. 12.3). Rückstände von PAK traten lediglich an 1 Messstelle auf; an dieser wurden Naphthalin sowie 2 weitere mit Naphthalin verwandte PAK nachgewiesen.

Tabelle 12.2

#### Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) im Grundwasser (2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Substanz              | Langzeitmonitoring<br>Start | Messstellen [Anzahl] |               |           |            |               | Messstellen [%] |  |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|-----------|------------|---------------|-----------------|--|
|                       |                             | beprobt              | Konzentration |           |            | Konzentration |                 |  |
|                       |                             |                      | < BG          | ≥ BG      | > 0,1 µg/l | > 1 µg/l      | > 1 µg/l        |  |
| 1,2,4-Trimethylbenzol | 2006                        | 527                  | 525           | 2         | –          | –             | –               |  |
| 1,3,5-Trimethylbenzol | 2006                        | 527                  | 527           | –         | –          | –             | –               |  |
| Benzol                | 2002                        | 527                  | 524           | 3         | 3          | –             | –               |  |
| Ethylbenzol           | 2002                        | 527                  | 525           | 2         | –          | –             | –               |  |
| m/p-Xylol             | 2002                        | 527                  | 526           | 1         | –          | –             | –               |  |
| o-Xylol               | 2002                        | 527                  | 526           | 1         | –          | –             | –               |  |
| Styrol                | 2006                        | 527                  | 527           | –         | –          | –             | –               |  |
| Toluol                | 2002                        | 527                  | 515           | 12        | 2          | –             | –               |  |
| <b>MAKW, total</b>    |                             | <b>527</b>           | <b>514</b>    | <b>13</b> | <b>5</b>   | –             | –               |  |

Numerische Anforderung GSchV: 1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

Tabelle 12.3

**Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im Grundwasser (2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Substanz            | Langzeitmonitoring<br>Start | Messstellen [Anzahl] |            |          |            | Messstellen [%] |            |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|------------|----------|------------|-----------------|------------|
|                     |                             | Konzentration        |            |          |            | Konzentration   |            |
|                     |                             | beprobt              | < BG       | ≥ BG     | > 0,1 µg/l | > 0,1 µg/l      | > 0,1 µg/l |
| 1-Methyl-Naphtalin* | –                           | 12                   | 11         | 1        | –          | *               |            |
| 2-Methyl-Naphtalin* | –                           | 12                   | 11         | 1        | –          | *               |            |
| Naphthalin          | 2006                        | 527                  | 526        | 1        | –          | –               |            |
| <b>PAK, total</b>   |                             | <b>527</b>           | <b>526</b> | <b>1</b> | <b>–</b>   | <b>–</b>        |            |

Numerische Anforderung GSchV: 0,1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

Tabelle 12.4

**1,4-Dioxan, ETBE, MTBE und TBA im Grundwasser (2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle.

| Substanz                      | Langzeitmonitoring<br>Start | Messstellen [Anzahl] |      |      |            | Messstellen [%] |          |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|------|------|------------|-----------------|----------|
|                               |                             | Konzentration        |      |      |            | Konzentration   |          |
|                               |                             | beprobt              | < BG | ≥ BG | > 0,1 µg/l | > 1 µg/l        | > 1 µg/l |
| 1,4-Dioxan*                   | –                           | 259                  | 238  | 21   | 18         | 2               | *        |
| ETBE (Ethyl-tert-butylether)  | 2007                        | 527                  | 526  | 1    | 1          | –               | –        |
| MTBE (Methyl-tert-butylether) | 2002                        | 527                  | 491  | 36   | 20         | –               | –        |
| TBA (tert-Butylalkohol)*      | –                           | 105                  | 97   | 8    | 2          | –               | *        |

BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

**MTBE – Indikatorwert nicht überschritten**

Der Indikatorwert der Begleitung Grundwasserschutz für *MTBE* von 2 µg/l wurde 2014 an keiner Messstelle überschritten. Allerdings wurde *MTBE* an 36 Messstellen, d. h. an knapp 7 % der Messstellen, nachgewiesen. *ETBE* wurde 2014 an 1 Messstelle und *TBA* an 8 der beprobten Messstellen detektiert. Der Höchstwert der *TBDV* von 5 µg/l für die Summe von *MTBE* und *ETBE* wurde nicht überschritten.

**1,4-Dioxan – Höchstwert TBDV nicht überschritten**

*1,4-Dioxan* wurde 2014 an 21 der 259 beprobten NAQUA-Messstellen nachgewiesen (Tab. 12.4). An 2 dieser Messstellen lag die Konzentration über 1 µg/l. Der Höchstwert der *TBDV* von 6 µg/l wurde an keiner Messstelle überschritten.

**12.3.2 Regionale Verbreitung****FHKW – vor allem im Mittelland über 1 µg/l**

FHKW wurden primär im Mittelland, aber auch im Jura nachgewiesen (Abb. 12.2), wo gemäss Kataster ein Grossteil der belasteten Betriebsstandorte liegt (Jordi 2015; BAFU 2018b). Vereinzelt wurden FHKW auch im Kanton Wallis und im Tessin detektiert. Konzentrationen von über 1 µg/l traten vor allem im Mittelland sowie an einzelnen Messstellen im Jura auf.

**MAKW – vor allem im Grossraum Basel**

MAKW traten fast ausschliesslich im Grossraum Basel auf (Abb. 12.3). Die beiden übrigen Messstellen liegen im Mittelland und in den Alpen, eine davon in Strassennähe.

Abbildung 12.2

**Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser (2014) sowie CKW-belastete Betriebsstandorte**

Maximalwerte der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Belastete Betriebsstandorte, an denen eine Verunreinigung durch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) vermutet wird, gemäss Kataster der belasteten Standorte (BAFU 2018b). BG: Bestimmungsgrenze.

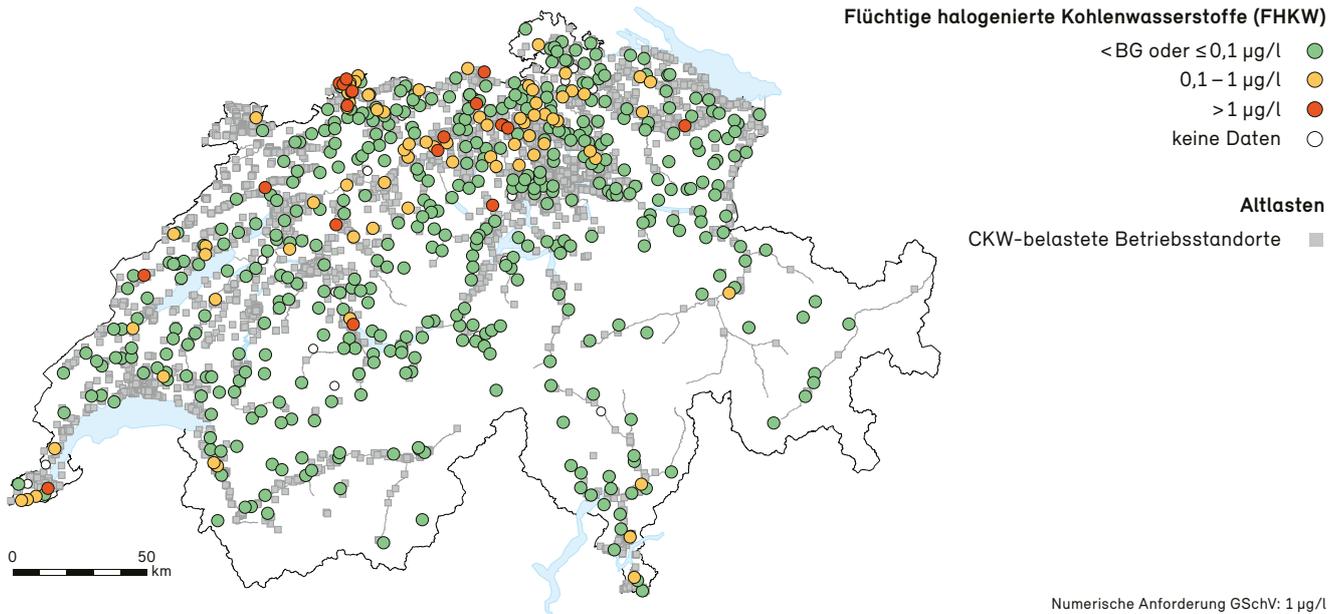


Abbildung 12.3

**Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) im Grundwasser (2014) sowie Siedlungsfläche**

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. BG: Bestimmungsgrenze.

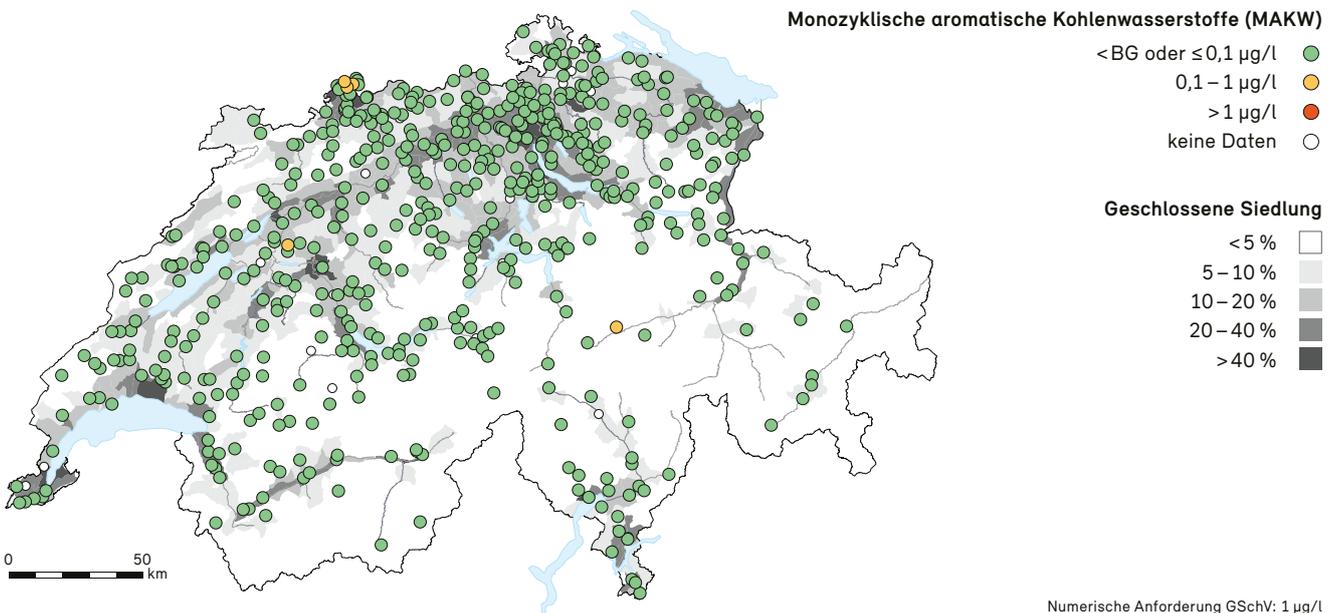


Abbildung 12.4

**MTBE, ETBE und TBA im Grundwasser (2014) sowie Siedlungsfläche**

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. BG: Bestimmungsgrenze.

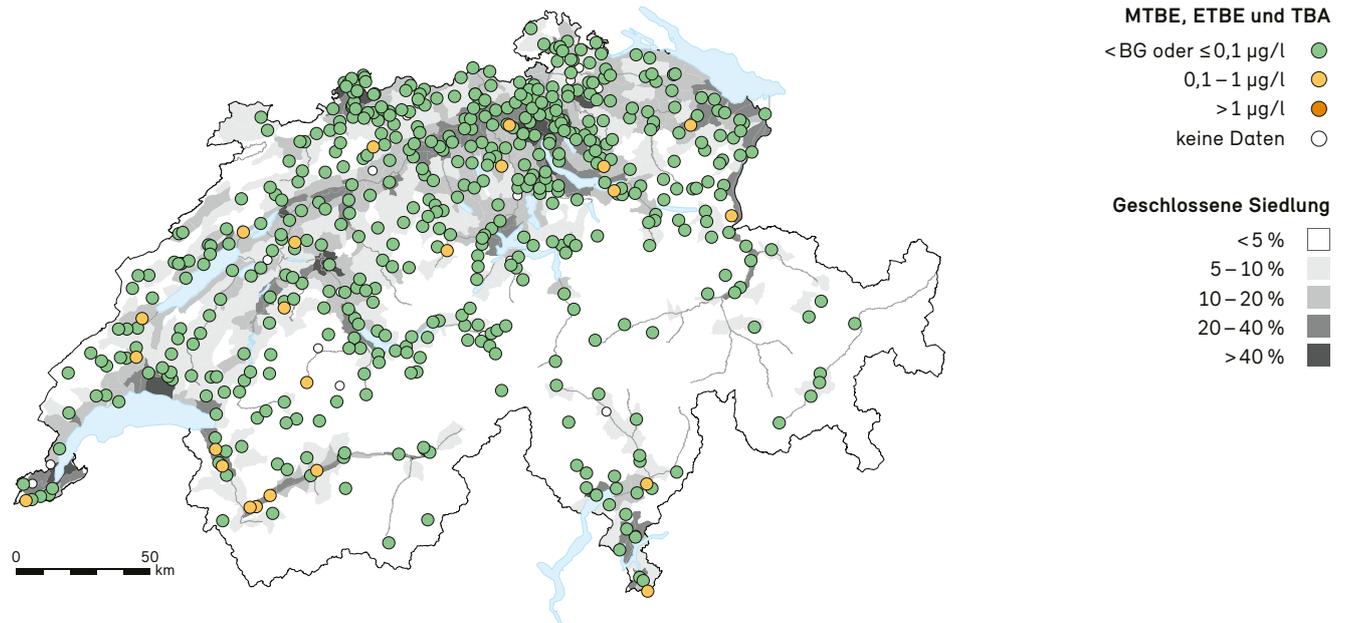
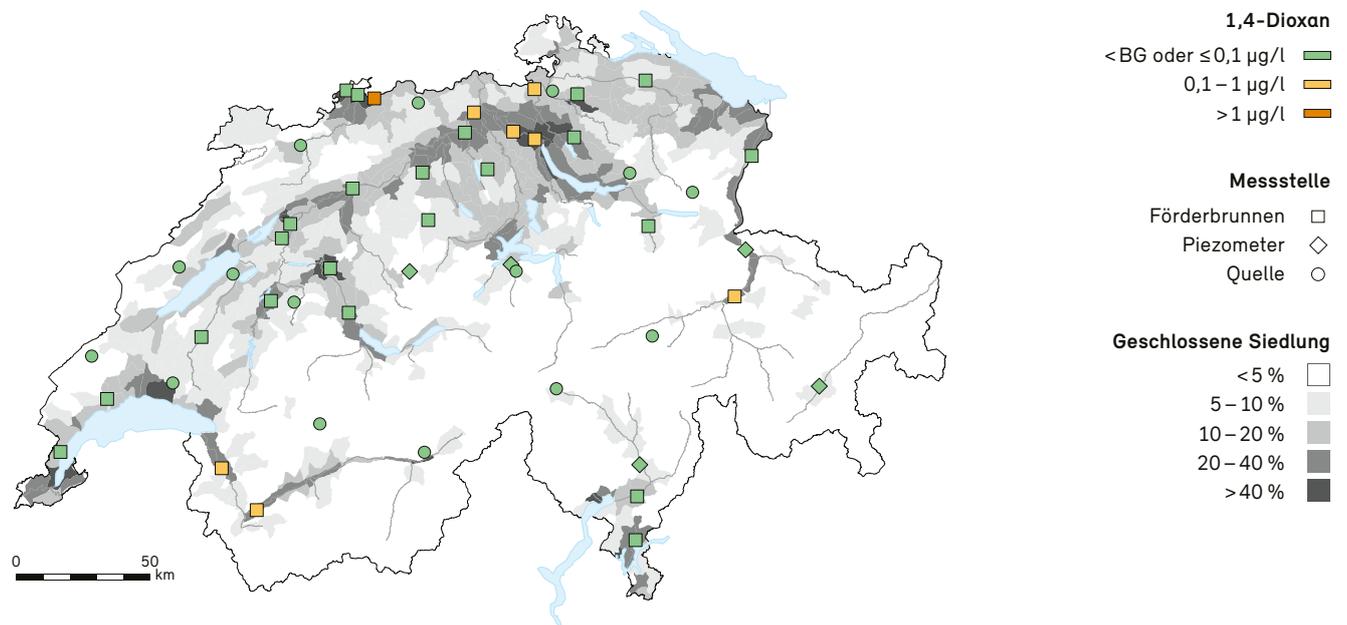


Abbildung 12.5

**1,4-Dioxan im Grundwasser (2011/2012) sowie Siedlungsfläche**

Maximalwert der Konzentration von 1,4-Dioxan pro NAQUA-Messstelle. Messstellen des Moduls TREND. Pilotstudie 2011/2012.

BG: Bestimmungsgrenze.



**MTBE, ETBE – punktuelle Nachweise**

Nachweise von *MTBE*, *ETBE* und/oder *TBA* traten punktuell in der ganzen Schweiz auf (Abb. 12.4).

**1,4-Dioxan – entlang von Fließgewässern**

*1,4-Dioxan* wurde im Grundwasser vor allem entlang der Flüsse Limmat, Rhein und Rhone bzw. deren Zuflüssen detektiert (Abb. 12.5).

**12.3.3 Bodennutzung**

**FHKW – 16 % der Messstellen bei Siedlungen über 1 µg/l**

FHKW wurden im Siedlungsgebiet mit Abstand am häufigsten und in den höchsten Konzentrationen nachgewiesen. An 16 % der Messstellen, deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» charakterisiert ist, überschritten FHKW die numerische Anforderung der GSchV von 1 µg/l (Abb. 12.6); an insgesamt 70 % dieser Messstellen wurden FHKW nachgewiesen. An Messstellen, die mit Hauptbodennutzung «Ackerbau», «Gras- & Viehwirtschaft» oder «Wald» klassiert sind, wurde die numerische Anforderung der GSchV dagegen selten überschritten. Die enge Verzahnung unterschiedlicher Bodennutzungen im Einzugsgebiet der Messstellen bedingt, dass auch kleinere belastete Flächen die Grundwasser-Qualität an diesen Messstellen signifikant beeinträchtigen können. In abgelegenen, ungenutzten Gebieten wurden keine FHKW detektiert.

**MAKW – im Siedlungsgebiet häufiger nachgewiesen**

Die insgesamt selten nachgewiesenen MAKW traten im Siedlungsgebiet etwas häufiger auf als ausserhalb (Abb. 12.6). An Messstellen, deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» charakterisiert ist, wurden sie an gut 5 % der Messstellen nachgewiesen.

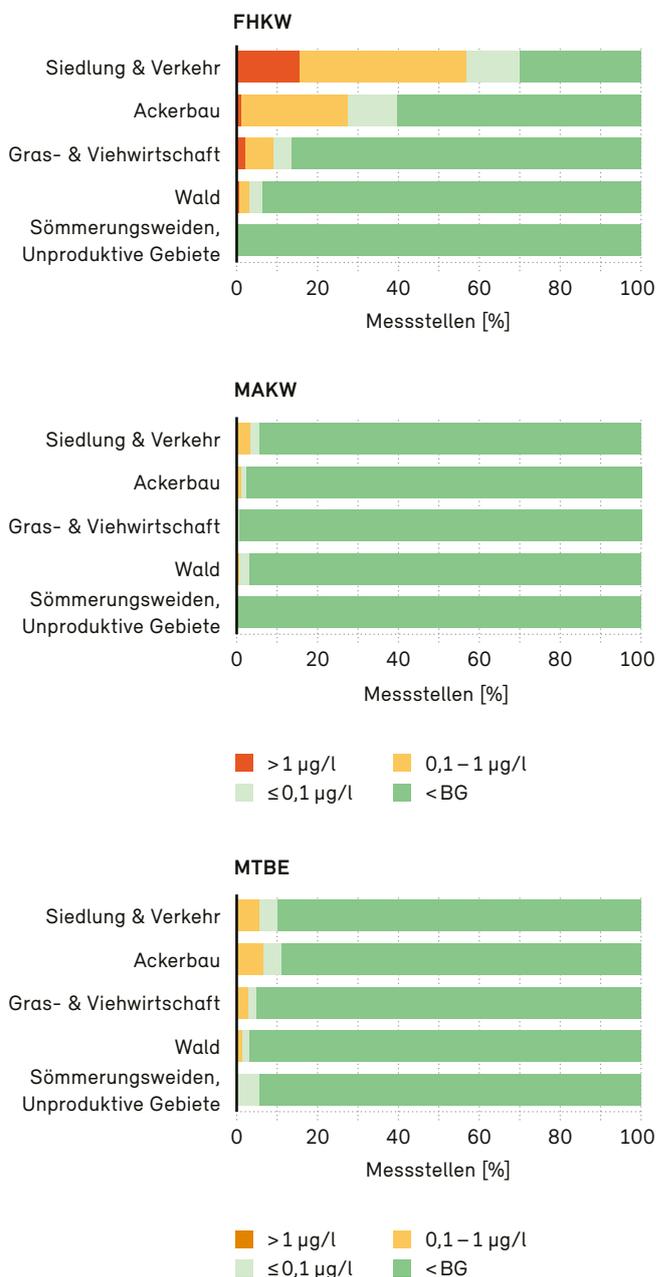
**MTBE und ETBE – kein eindeutiger Schwerpunkt**

*MTBE* wurde mit jeweils mehr als 10 % der Messstellen im Siedlungsgebiet und im Ackerbauggebiet etwa gleich häufig nachgewiesen (Abb. 12.6). Auch an 3 bis 6 % der Messstellen, die mit anderen Hauptbodennutzungen klassiert sind, trat *MTBE* im Grundwasser auf.

Abbildung 12.6

**Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW), Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) und MTBE im Grundwasser (2014) in Relation zur Hauptbodennutzung**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Messstellen je Hauptbodennutzung: Siedlung & Verkehr: 90 Mst.; Ackerbau: 91 Mst.; Gras- & Viehwirtschaft: 141 Mst.; Wald: 158 Mst.; Sömmerungsweiden, Unproduktive Gebiete: 35 Mst. Die Hauptbodennutzung ist die Bodennutzung mit dem grössten Flächenanteil im Einzugsgebiet einer Messstelle. BG: Bestimmungsgrenze.



## 12.4 Entwicklung

### FHKW – leicht rückläufig

Die Zahl der Messstellen, an denen FHKW in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l nachgewiesen wurden, war in den Jahren von 2007 bis 2014 leicht rückläufig (Tab. 12.5). FHKW waren in diesem Zeitraum an rund 120 bis 145 Messstellen pro Jahr nachweisbar. Dies entspricht rund 22 bis 32 % der Messstellen.

### FHKW – wiederholt an denselben Messstellen

Pro Jahr überschritten 3 bis 8 verschiedene FHKW die numerische Anforderung der GSchV von 1 µg/l (Tab. 12.6). Die meisten FHKW traten in diesem Zeitraum tendenziell wiederholt an denselben Messstellen auf. Die beiden FHKW, die jedes Jahr regelmässig an mehreren Messstellen zur Überschreitung der numerischen Anforderung der GSchV führten, waren *1,1,1-Trichlorethan* und *Tetrachlorethen*. *Tetrachlorethen* überschritt zwischen 2007 und 2014 an insgesamt 32 Messstellen die numerische Anforderung der GSchV, *1,1,1-Trichlorethan* an 6 Messstellen. In diesem Zeitraum wurden ausserdem an jeweils 3 bis 5 Messstellen *Dichlordifluormethan*, *Trichlorethen* und *Trichlormethan* in Konzentrationen über 1 µg/l nachgewiesen. An jeweils einer einzigen Messstelle überschritten *Trichlorfluormethan*, *1,2-Dichlorbenzol* und *1,2,4-Trichlorbenzol* regelmässig die numerische Anforderung der GSchV. Lediglich ein einziges Mal wurde die numerische Anforderung durch *1,3-Dichlorpropan*, *cis-1,2-Dichlorethen*, *Dichlormethan*, und *1,2,3-Trichlorbenzol* überschritten.

### FHKW – Trichlorethen und 1,1,1-Trichlorethan leicht rückläufig

Die Zahl der Messstellen, an denen die numerische Anforderung der GSchV durch *Trichlorethen* bzw. *1,1,1-Trichlorethan* überschritten wurde, hat von 2003 bis 2014 deutlich bzw. leicht abgenommen (Abb. 12.7). Auch die Nachweise dieser beiden Substanzen gingen insgesamt zurück. Für *Tetrachlorethen* war keine eindeutige Tendenz erkennbar.

### MAKW – vereinzelt und an wechselnden Messstellen

MAKW wurden von 2007 bis 2014 an maximal 2 Messstellen pro Jahr in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l im Grundwasser detektiert (Tab. 12.7). MAKW wurden in

diesem Zeitraum an rund 10 bis 25 Messstellen pro Jahr nachgewiesen. Insgesamt 4 verschiedene MAKW überschritten dabei die numerische Anforderung der GSchV (Tab. 12.6); betroffen waren jeweils unterschiedliche Messstellen. An insgesamt 3 Messstellen trat *Toluol* in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l auf, an 2 Messstellen *Styrol* und an je 1 Messstelle *Ethylbenzol* und *m/p-Xylol*. Auch hier waren jeweils unterschiedliche Messstellen betroffen.

### Naphthalin – GSchV einmalig überschritten

Die numerische Anforderung der GSchV von 0,1 µg/l für *Naphthalin* (PAK) wurde lediglich im Jahr 2008 an einer Messstelle überschritten.

Tabelle 12.5

Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser (2007 bis 2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Jahr | Messstellen [Anzahl] |                      |      |       |               | Messstellen [%] |
|------|----------------------|----------------------|------|-------|---------------|-----------------|
|      | beprobt              | Konzentration [µg/l] |      |       | Konzentration |                 |
|      |                      | < BG                 | ≥ BG | > 0,1 | > 1           | > 1 µg/l        |
| 2007 | 447                  | 302                  | 145  | 108   | 24            | *               |
| 2008 | 503                  | 367                  | 136  | 109   | 23            | *               |
| 2009 | 529                  | 394                  | 135  | 111   | 25            | 4,7             |
| 2010 | 531                  | 395                  | 136  | 107   | 25            | 4,7             |
| 2011 | 531                  | 396                  | 135  | 108   | 25            | 4,7             |
| 2012 | 531                  | 403                  | 128  | 98    | 19            | 3,6             |
| 2013 | 531                  | 412                  | 119  | 95    | 18            | 3,4             |
| 2014 | 527                  | 394                  | 133  | 98    | 20            | 3,8             |

Numerische Anforderung GSchV: 1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

Tabelle 12.6

Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW), monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) und weitere flüchtige organische Verbindungen im Grundwasser (2007 bis 2014) in Relation zur numerischen Anforderung GSchV bzw. einer Konzentration von 1 µg/l

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle und Jahr. Aufgeführt sind alle Substanzen, die in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l nachgewiesen wurden.

| Substanz   | Messstellen [Anzahl]   |      |      |      |      |      |      |      |           |
|--|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|  | Konzentration > 1 µg/l |      |      |      |      |      |      |      |           |
|  | 2007                   | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2007–2014 |
| <b>FHKW, aliphatisch</b>                         |                        |      |      |      |      |      |      |      |           |
| 1,1,1-Trichlorethan                              | 5                      | 4    | 4    | 6    | 4    | 3    | 4    | 3    | 6         |
| 1,3-Dichlorpropan*                               | –                      | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| cis-1,2-Dichlorethen                             | –                      | –    | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| Dichlordifluormethan                             | 2                      | 2    | 2    | 3    | 1    | 1    | –    | 1    | 4         |
| Dichlormethan                                    | –                      | –    | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| Tetrachlorethen                                  | 20                     | 17   | 19   | 19   | 20   | 16   | 14   | 17   | 32        |
| Trichlorethen                                    | 3                      | 3    | 3    | 2    | 2    | –    | –    | –    | 5         |
| Trichlorfluormethan                              | 1                      | 1    | 1    | 1    | 1    | –    | 1    | 1    | 1         |
| Trichlormethan                                   | –                      | 1    | 2    | 1    | 1    | –    | 1    | –    | 3         |
| <b>FHKW, aromatisch</b>                          |                        |      |      |      |      |      |      |      |           |
| 1,2-Dichlorbenzol                                | 1                      | –    | –    | 1    | 1    | –    | 1    | 1    | 1         |
| 1,2,3-Trichlorbenzol                             | 1                      | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| 1,2,4-Trichlorbenzol*                            | 1                      | –    | –    | 1    | –    | –    | 1    | 1    | 1         |
| <b>MAKW</b>                                      |                        |      |      |      |      |      |      |      |           |
| Ethylbenzol                                      | 1                      | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| m/p-Xylol  | –                      | –    | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | 1         |
| Styrol   | 1                      | 1    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | 2         |
| Toluol   | –                      | 1    | 1    | –    | –    | –    | 1    | –    | 3         |
| <b>Weitere flüchtige organische Verbindungen</b> |                        |      |      |      |      |      |      |      |           |
| 1,1,2,2-Tetramethoxyethan*                       | /                      | /    | /    | /    | /    | /    | 1    | /    | 1         |
| 1,4-Dioxan*                                      | /                      | /    | /    | /    | 2    | 1    | –    | 2    | 4         |
| ETBE   | –                      | –    | 1    | –    | 1    | –    | –    | –    | 2         |
| MTBE   | 1                      | 2    | 3    | 1    | –    | 1    | –    | –    | 7         |
| TBA*   | –                      | –    | –    | –    | –    | 1    | 1    | –    | 2         |

Numerische Anforderung GSchV (FHKW, MAKW): 1 µg/l

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden  
/ keine Daten vorhanden

Tabelle 12.7

### Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) im Grundwasser (2007 bis 2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Jahr | Messstellen [Anzahl] |                                   |           |       |     | Messstellen [%]                      |
|------|----------------------|-----------------------------------|-----------|-------|-----|--------------------------------------|
|      | beprobt              | Konzentration [ $\mu\text{g/l}$ ] |           |       |     | Konzentration<br>> 1 $\mu\text{g/l}$ |
|      |                      | < BG                              | $\geq$ BG | > 0,1 | > 1 |                                      |
| 2007 | 447                  | 434                               | 13        | 6     | 1   | *                                    |
| 2008 | 503                  | 480                               | 23        | 14    | 2   | *                                    |
| 2009 | 529                  | 514                               | 15        | 10    | 1   | 0,2                                  |
| 2010 | 531                  | 521                               | 10        | 6     | –   | –                                    |
| 2011 | 531                  | 521                               | 10        | 3     | –   | –                                    |
| 2012 | 531                  | 522                               | 9         | 2     | –   | –                                    |
| 2013 | 531                  | 521                               | 10        | 6     | 2   | 0,4                                  |
| 2014 | 527                  | 514                               | 13        | 5     | –   | –                                    |

Numerische Anforderung GSchV: 1  $\mu\text{g/l}$

BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

### MTBE – sehr variabel und insgesamt rückläufig

MTBE überschritt 2007 bis 2014 den Indikatorwert der Wegleitung Grundwasserschutz von 2  $\mu\text{g/l}$  an insgesamt 3 von Jahr zu Jahr unterschiedlichen Messstellen. Die Zahl der Messstellen, an denen MTBE nachgewiesen wurde, ist insgesamt rückläufig (Abb. 12.7, Tab. 12.6). ETBE und TBA (nicht im Langzeitmonitoring) wurden von 2007 bis 2014 nur in jeweils 2 Jahren an maximal je 1 Messstelle in Konzentrationen von über 1  $\mu\text{g/l}$  nachgewiesen (Tab. 12.6). Der Höchstwert der TBDV von 5  $\mu\text{g/l}$  für die Summe von MTBE und ETBE wurde nie überschritten.

### 1,4-Dioxan

1,4-Dioxan, das nicht landesweit analysiert wurde, trat an insgesamt 4 Messstellen in Konzentrationen über 1  $\mu\text{g/l}$  im Grundwasser auf (Tab. 12.6). Der Höchstwert der TBDV von 6  $\mu\text{g/l}$  wurde im Zeitraum, in dem 1,4-Dioxan analysiert wurde (2011 bis 2014), an keiner der untersuchten Messstellen überschritten.

## 12.5 Analyse

### 12.5.1 Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe

#### FHKW – Grundwasser-Qualität beeinträchtigt

Während MAKW, PAK und MTBE/ETBE kein landesweites Problem für die Grundwasser-Qualität darstellen, gehören FHKW nach wie vor zu den Substanzen, die mit einer Überschreitung der numerischen Anforderung der GSchV an 4 % der Messstellen die Grundwasser-Qualität signifikant beeinträchtigen.

#### Betriebsstandorte und Deponien

FHKW im Grundwasser stammen direkt oder indirekt aus der industriellen Herstellung und ihrer ehemals sehr breiten Verwendung in Industrie und Gewerbe. Vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelangten diese Stoffe zumeist durch sorglosen Umgang als Lösungs- und Reinigungsmittel in grossen Mengen in die Umwelt. So sind an zahlreichen ehemaligen Betriebsstandorten und alten Deponien Grundwasserverunreinigungen durch FHKW entstanden.

#### FHKW an Basis des Grundwasserleiters

FHKW sind mikrobiell nur schwer abbaubar und daher in der Umwelt langlebig; zudem ist die Löslichkeit von FHKW in Wasser gering. Gelangen FHKW in grösseren Mengen in den Untergrund, so können sie sich als eigenständige flüssige Phase im Grundwasser bewegen und sich aufgrund ihrer hohen Dichte an der Basis des Grundwasserleiters ansammeln. Eine repräsentative Beprobung des Grundwassers ist daher schwierig.

#### Tetrachlorethen

Tetrachlorethen, das die numerische Anforderung der GSchV mit Abstand am häufigsten überschreitet (Tab. 12.1, Abb. 12.1), ist weniger flüchtig und besitzt eine geringere Wasserlöslichkeit als die anderen FHKW. Es verbleibt deshalb länger im Grundwasser. Dies erklärt, dass die Nachweise von Tetrachlorethen im Grundwasser im Gegensatz zu Trichlorethen in den letzten Jahren nicht zurückgegangen sind (Abb. 12.7).

#### Anwendungseinschränkung bzw. -verbot

Mittlerweile ist der Einsatz von FHKW streng geregelt. Seit Mitte der 80er-Jahre dürfen FHKW nur noch in

geschlossenen Anlagen verwendet werden, in denen diese Substanzen zurückgewonnen und recycelt werden. Zudem wurde die Anwendung mehrerer Substanzen verboten bzw. stark eingeschränkt, oder diese wurden durch weniger problematische Lösungsmittel ersetzt. So ist z. B. seit 2005 die Verwendung von *Tetra-* und *Trichlorethen* in Textilwasch- und Reinigungsmitteln bei Ableitung mit dem Abwasser untersagt. *Trichlormethan* darf nur noch in geschlossenen Systemen angewendet werden. Ausserdem ist der Einsatz von *1,1,1-Trichlorethan*, *Dichlordifluormethan* und *Trichlorfluormethan* seit 1996 mit wenigen Ausnahmen verboten. Aufgrund dieser Massnahmen sind Produktion und Einsatz von FHKW seit rund zwei Jahrzehnten rückläufig (BAFU 2009b). Trotzdem ist ein Rückgang der Nachweise im Grundwasser bislang lediglich bei *Trichlorethen* und *1,1,1-Trichlorethan* zu erkennen.

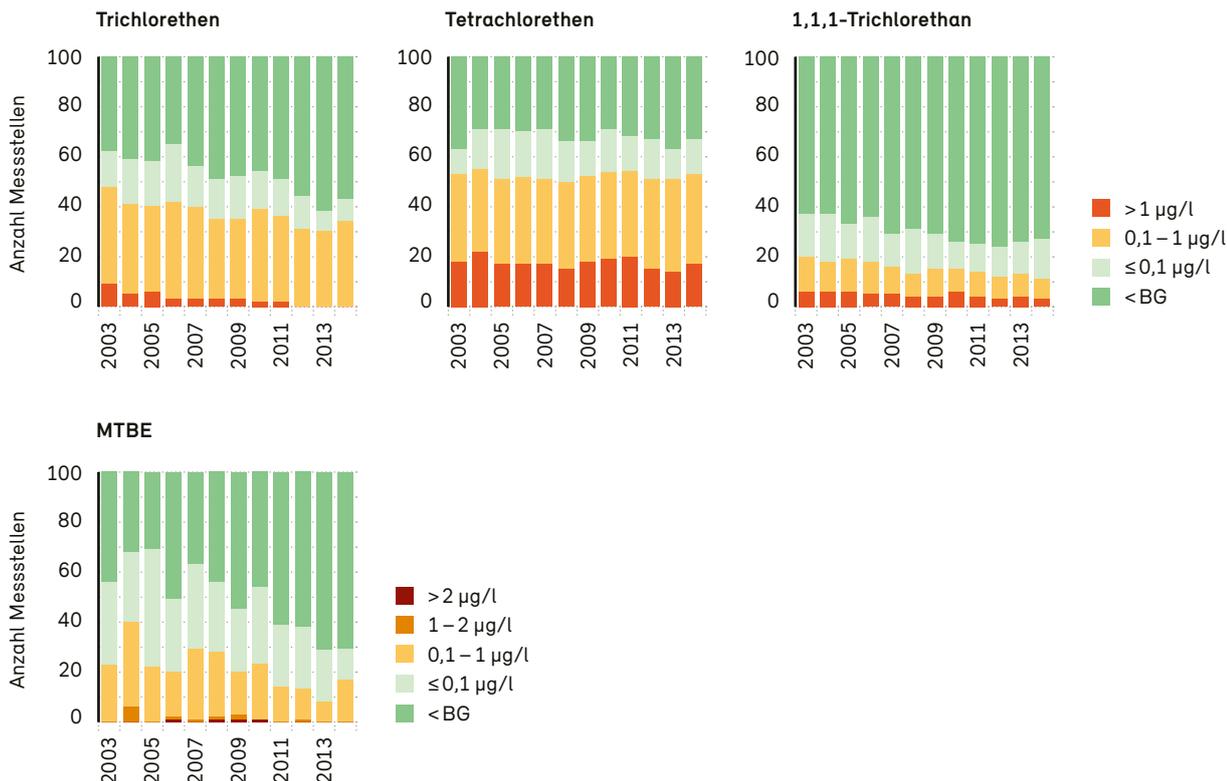
**Altlasten**

An ehemaligen Betriebsstandorten, wie z. B. chemischen Reinigungen, metall- und textilverarbeitenden Betrieben sowie Druckereien, gelangen über den belasteten Untergrund auch heute noch FHKW ins Grundwasser. Zudem lagern FHKW-haltige Produktionsabfälle in Deponien. Landesweit gibt es heute etwa 38000 belastete Standorte (BAFU 2018b). Darunter befinden sich schätzungsweise rund 1100 CKW-verdächtige Altlasten, die eine Gefahr für die Umwelt darstellen können (BAFU, unveröffentlicht). Diese und alle anderen Altlasten sollen bis 2040 schrittweise saniert werden (BAFU 2018c). Eine signifikante Abnahme der Gesamtbelastung an FHKW im Grundwasser ist frühestens nach Abschluss solcher Sanierungsarbeiten zu erwarten.

Abbildung 12.7

**Trichlorethen, Tetrachlorethen, 1,1,1-Trichlorethan und MTBE im Grundwasser (2003 bis 2014)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Berücksichtigt wurden ausschliesslich Messstellen, die in diesem Zeitraum jeweils mindestens einmal pro Jahr beprobt wurden. Messstellen je Substanz: Trichlorethen: 308 Mst.; Tetrachlorethen: 307 Mst.; 1,1,1-Trichlorethan: 308 Mst.; MTBE: 346 Mst. BG: Bestimmungsgrenze.



### 12.5.2 Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

#### MAKW – lokale Belastungen

MAKW werden generell selten im Grundwasser nachgewiesen und stellen heute keine bedeutende Beeinträchtigung der Grundwasser-Qualität dar. Sie treten in den meisten Fällen punktuell und kurzzeitig im Grundwasser auf (Tab. 12.6), was auf lokale Einträge kleinerer Lösungsmittel- oder Treibstoffmengen schliessen lässt. *Toluol*, der am häufigsten im Grundwasser nachgewiesene monozyklische aromatische Kohlenwasserstoff, wird verbreitet als Lösungsmittel und Treibstoffbestandteil eingesetzt. Da insbesondere *Benzol*, *Toluol*, *Ethylbenzol* und *Xylol* mikrobiell gut abbaubar sind, ist auch in den nächsten Jahren bei gleichbleibender Verbrauchsmenge keine Zunahme von MAKW-Rückständen im Grundwasser zu erwarten.

### 12.5.3 Weitere flüchtige organische Verbindungen

#### MTBE – Grundwasser-Qualität kaum beeinträchtigt

*MTBE* tritt relativ häufig, aber in eher geringen Konzentrationen im Grundwasser auf; der Indikatorwert von 2 µg/l der Wegleitung Grundwasserschutz wurde in den Jahren 2007 bis 2014 nur an 3 Messstellen überschritten. *ETBE* wurde 2014 an 1 der beprobten Messstellen nachgewiesen. Von einer wesentlichen Beeinträchtigung der Grundwasser-Qualität durch *MTBE* und/oder *ETBE* ist heute daher nicht auszugehen. *MTBE* und *ETBE* können punktuell durch Leckagen, Unfälle und unsachgemässe Handhabung bei der Lagerung, beim Transport und beim Umfüllen von Treibstoffen in den Untergrund gelangen. Auch ein diffuser Eintrag aus dem Strassenverkehr (Verflüchtigung aus Fahrzeugtanks) über die Atmosphäre ist wahrscheinlich. *MTBE* ist relativ gut wasserlöslich und sorbiert nur schwach an Bodenpartikel und wird daher schnell ins Grundwasser verlagert. Zudem ist es äusserst langlebig und wird, wenn überhaupt, nur schwer von Mikroorganismen abgebaut. *ETBE* verhält sich im Grundwasser ähnlich wie *MTBE*. Es ist ebenfalls sehr mobil und schwer abbaubar, besitzt aber eine geringere Löslichkeit in Wasser als *MTBE*. Ausserdem ist der Dampfdruck von *ETBE* wesentlich geringer als der von *MTBE*. Dies führt dazu, dass sich im Vergleich zu *MTBE* weniger *ETBE* aus Fahrzeugtanks verflüchtigt und somit auch weniger *ETBE* diffus über die Atmosphäre eingetragen wird.

#### ETBE – Ersatz für MTBE

Während *MTBE* bereits seit Mitte der 80er-Jahre als Treibstoffzusatz verwendet wird, kommt inzwischen vermehrt *ETBE* zum Einsatz. Der Bioethanol-Anteil wird bei der Herstellung von *ETBE* in einigen europäischen Ländern seit 2003 steuerlich begünstigt (LUBW 2013), und die Treibstoffversorgung in der Schweiz ist zu einem grossen Teil von Importen aus der EU abhängig. Deshalb ist auch dem Treibstoff in der Schweiz vermehrt *ETBE* beigemischt, obwohl es hierzulande keine entsprechende steuerliche Vergünstigung gibt. Die Zahl der Messstellen, an denen *MTBE* im Grundwasser nachgewiesen wird, hat über die Jahre abgenommen, während sich bei *ETBE* aufgrund der bis anhin sehr geringen Anzahl von Nachweisen keine Tendenz erkennen lässt. Da der Verbrauch von *ETBE* gestiegen ist, kann eine Zunahme von *ETBE*-Nachweisen im Grundwasser in Zukunft nicht ausgeschlossen werden.

#### 1,4-Dioxan – industrielles Abwasser als Hauptquelle

*1,4-Dioxan* trat im Rahmen der Pilotstudie 2011/2012 vor allem an Messstellen auf, die wesentlich durch die Infiltration von Oberflächenwasser beeinflusst werden. Eine eindeutige Korrelation mit Indikatoren für kommunales Abwasser (wie z. B. das Korrosionsschutzmittel *Benzotriazol* und verschiedene Arzneimittelrückstände) besteht jedoch nicht. *1,4-Dioxan* gelangt demnach vermutlich eher über industrielle Abwässer in die Fließgewässer und von dort durch Infiltration ins Grundwasser. Es könnte ausserdem auch aus belasteten Betriebsstandorten und Deponien stammen.

### 12.5.4 Monitoring

#### Fester Bestandteil im Langzeitmonitoring

Die Entwicklung der Belastung des Grundwassers mit flüchtigen organischen Verbindungen und insbesondere mit FHKW wird im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA weiter aufmerksam verfolgt.

#### Pilotstudie «1,4-Dioxan» 2015

Um die statistisch wenig belastbare Datengrundlage für *1,4-Dioxan* zu verbessern, wurde inzwischen eine zweimalige landesweite Beprobung aller Messstellen der Module TREND und SPEZ durchgeführt.

# 13 Abwasserindikatoren

## 13.1 Grundlagen

### Abwasser aus Haushalten, Industrie und Gewerbe

Abwasser aus Privathaushalten sowie aus industriellen und gewerblichen Betrieben enthält neben Fäkalien auch eine Vielzahl organisch-synthetischer Chemikalien. Das Spektrum der Substanzen im Abwasser ist dementsprechend gross und umfasst beispielsweise Tenside, Rückstände von Arzneimitteln, künstliche Süsstoffe, Korrosionsschutzmittel, Komplexbildner sowie, je nach industriellen Einleitern, z. T. weitere spezifische Industriechemikalien. Einige dieser Chemikalien wirken bereits in tiefen Konzentrationen negativ auf Wasserorganismen oder beeinträchtigen aufgrund ihrer Langlebigkeit Gewässer als Ressource für die Trinkwassergewinnung.

### Kläranlagen eliminieren viele Chemikalien bisher kaum

In den Kläranlagen werden bisher vor allem leicht abbaubare Substanzen aus dem Abwasser entfernt. Weniger gut abbaubare Chemikalien können mit den klassischen Verfahren dagegen nur unzureichend eliminiert werden und gelangen über den Ablauf der Kläranlagen nahezu unverändert in die Vorfluter. Durch den 2016 gestarteten Ausbau von Kläranlagen mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe wird sich deren Reinigungsleistung für viele Chemikalien und somit die Wasserqualität der betroffenen Fließgewässer deutlich verbessern.

### Eintrag ins Grundwasser

Ins Grundwasser können Substanzen aus dem Abwasser zum einen direkt durch undichte Abwasserinstallationen, wie z. B. Abwasserkanäle, Sammelgruben oder beschädigte Kanalanschlüsse, gelangen. Zum anderen versickert Flusswasser je nach hydraulischen Verhältnissen ins Grundwasser und damit auch das darin enthaltene Abwasser. Weiterhin können mit Gülle, die z. T. häusliches Abwasser von Landwirtschaftsbetrieben enthält, die entsprechenden Substanzen ebenfalls ins Grundwasser gelangen.

### GSchV: keine numerischen Anforderungen

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV)

soll Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Substanzen enthalten. Spezifische numerische Anforderungen für Rückstände von Arzneimitteln, Korrosionsschutzmitteln, Komplexbildnern oder sonstigen Abwasserindikatoren im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, enthält die GSchV nicht. Das Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Die Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004) legt einen Indikatorwert von 1 µg/l für *Benzotriazol*-Korrosionsschutzmittel und von 5 µg/l für *EDTA* und strukturanaloge Komplexbildner fest, der potenziell auf eine problematische anthropogene Belastung des Grundwassers hinweist. Für Trinkwasser gilt gemäss der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) ein Höchstwert von 200 µg/l für *EDTA*; der Höchstwert der TBDV gilt durch den Verweis der GSchV auf die TBDV auch als numerische Anforderung der GSchV für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser.

## 13.2 Datenerhebung

### Landesweite Daten

Landesweite Daten zu ausgewählten Abwasserindikatoren werden seit 2013 im Rahmen des Langzeitmonitorings von NAQUA erhoben. Die Messstellen des Moduls TREND werden zwei- bis viermal, die Messstellen des Moduls SPEZ ein- bis zweimal pro Jahr auf diese Abwasserindikatoren analysiert (Kap. 3). Die Beprobungsfrequenz richtet sich einerseits nach der bekannten Belastung der Messstellen und andererseits nach ihrer potenziellen Exposition gegenüber Einträgen von Substanzen aus dem Abwasser. So werden Messstellen, deren Einzugsgebiet überwiegend im Siedlungsgebiet liegt, mindestens zweimal pro Jahr auf Abwasserindikatoren untersucht.

### 3 Substanzen im Langzeitmonitoring

Im Langzeitmonitoring werden derzeit 3 Abwasserindikatoren analysiert: die beiden Arzneimittel *Carbamazepin* und *Sulfamethoxazol* sowie das Korrosionsschutzmit-

tel *Benzotriazol*. Ausgewählt wurden diese Substanzen aufgrund der Ergebnisse der Pilotstudie «Screening auf Mikroverunreinigungen», die in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführt wurde (Kap. 15). Im Modul TREND wird seit 1997 ausserdem der Komplexbildner *EDTA* analysiert. Zusätzlich zu diesen Parametern übermitteln einzelne kantonale Fachstellen und die beiden Auftragslabors die Analyseergebnisse weiterer Abwasserindikatoren ans BAFU, wie z.B. zu *Diclofenac* oder *Amidotrizesäure*. Weitere Stoffe, die ebenfalls im Abwasser auftreten können (z. B. Nitrat, Pestizide, VOC, PFC, Mikroorganismen), werden in den jeweiligen Fachkapiteln dieses Berichts behandelt.

#### Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren jeweils auf dem Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro Messstelle und Jahr. Präsentiert und analysiert werden die verfügbaren validierten Daten des Langzeitmonitorings 2014.

### 13.3 Zustand

#### 13.3.1 Überblick

##### Abwasserindikatoren an mehr als einem Drittel der Messstellen

Abwasserindikatoren wurden 2014 an knapp 200 der 530 Messstellen im Grundwasser nachgewiesen (Tab. 13.1); dies entspricht rund 37 % aller Messstellen. An 15 % der Messstellen lagen die Konzentrationen bei mehr als 0,1 µg/l, an 4 % der Messstellen bei über 1 µg/l. Insgesamt 10 verschiedene Abwasserindikatoren wurden im Grundwasser nachgewiesen; 7 dieser Substanzen traten in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf.

##### Arzneimittel – an jeder 10. Messstelle

Rückstände von Arzneimitteln traten 2014 an insgesamt rund 13 % der Messstellen auf. 4 verschiedene Substanzen wurden im Grundwasser nachgewiesen: *Carbamazepin* und *Sulfamethoxazol* sowie die nicht landesweit analysierten *Amidotrizesäure* und *Diclofenac*. *Carbamazepin* trat an knapp 9 % der Messstellen auf, *Sulfamethoxazol* an rund 7 % der Messstellen.

##### Arzneimittel – eher selten über 0,1 µg/l

Mit Ausnahme von 3 Messstellen lagen die Konzentrationen der analysierten Arzneimittel immer unter 0,1 µg/l. In Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l traten vereinzelt *Carbamazepin* sowie *Amidotrizesäure* auf, für die jedoch kein landesweiter Datensatz vorliegt. *Sulfamethoxazol* wurde nicht in Konzentrationen über 0,1 µg/l nachgewiesen.

##### Korrosionsschutzmittel – an jeder vierten Messstelle

Korrosionsschutzmittel traten 2014 an insgesamt knapp 24 % der Messstellen auf. Nachgewiesen wurden *Benzotriazol* sowie das nicht landesweit analysierte *4-Methylbenzotriazol* bzw. *5-Methylbenzotriazol*.

##### Korrosionsschutzmittel – mehrmals über 0,1 µg/l

An gut 1 % der Messstellen lagen die Konzentrationen von *Benzotriazol* bei über 0,1 µg/l. Die beiden Korrosionsschutzmittel *4-Methylbenzotriazol* und *5-Methylbenzotriazol*, die nicht landesweit analysiert wurden, traten ebenfalls in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf.

##### Süsstoffe und Komplexbildner – deutlich über 0,1 µg/l

Von den übrigen, bisher nicht landesweit analysierten Abwasserindikatoren traten die künstlichen Süsstoffe *Acesulfam* und *Sucralose* sowie der Komplexbildner *EDTA* in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf. *Acesulfam* und *EDTA* wurden zudem wiederholt in Konzentrationen von mehr als 1 µg/l im Grundwasser nachgewiesen. *EDTA* überschritt an 1 Messstelle mit einem Höchstwert von 7,4 µg/l auch den Indikatorwert der Begleitung Grundwasserschutz von 5 µg/l.

#### 13.3.2 Regionale Verbreitung

##### Arzneimittel entlang mittelgrosser Fließgewässer

Rückstände von Arzneimitteln wurden im Grundwasser primär entlang mittelgrosser Fließgewässer nachgewiesen (Abb. 13.1). Konzentrationen von mehr als 0,02 µg/l traten fast ausschliesslich an Messstellen auf, die weniger als 1 km vom nächsten Fließgewässer entfernt waren. Betroffen waren vor allem Messstellen in der Nähe von Birs, Ergolz, Glatt, Limmat und Thur. Aber auch in der Nähe der Rhone im Unterwallis, der Aare unterhalb des Bielersees sowie am Hochrhein flussabwärts von Koblenz wurden Arzneimittel im Grundwasser nachgewiesen.

Mit Ausnahme der Rhone liegt der Anteil an gereinigtem Abwasser in den jeweiligen Fliessgewässerabschnitten bei mehr als 5%.

### Korrosionsschutzmittel entlang vieler Bäche und Flüsse sowie im Siedlungsgebiet

Korrosionsschutzmittel traten v. a. an Messstellen entlang kleiner und mittelgrosser Fliessgewässer im Grundwasser auf (Abb. 13.2). Neben Messstellen an verschiedenen mittelgrossen Fliessgewässern mit einem Abwasseranteil von mehr als 5% waren zusätzlich auch einzelne Messstellen an Streckenabschnitten betroffen, an denen der durchschnittliche Abwasseranteil im Fliessgewässer unter 5% liegt, wie z. B. Emme, Hochrhein flussaufwärts von Koblenz, Aare unterhalb des Thunersees sowie Brenno, Ticino und Maggia. Darüber hinaus wurden Kor-

rosionsschutzmittel auch an Messstellen nachgewiesen, die nicht in unmittelbarer Nähe eines Fliessgewässers liegen und deren Einzugsgebiet durch die Hauptbodennutzung «Siedlung & Verkehr» geprägt ist.

**Komplexbildner in Flussnähe, aber auch bei Ackerbau**  
Komplexbildner, die ausschliesslich an den 50 Messstellen des Moduls TREND systematisch untersucht wurden, traten in Flussnähe tendenziell häufiger und dort gleichzeitig zusammen mit weiteren Abwasserindikatoren auf (Abb. 13.3). Sie wurden allerdings auch an mehreren flussfernen Messstellen nachgewiesen, an denen keine weiteren Abwasserindikatoren im Grundwasser auftraten; die Einzugsgebiete der betroffenen Messstellen sind stärker landwirtschaftlich geprägt.

Tabelle 13.1

#### Abwasserindikatoren im Grundwasser (2014)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Aufgeführt sind alle Substanzen, die 2014 nachgewiesen und/oder im Rahmen des Langzeitmonitorings untersucht wurden. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Substanz                      | Langzeit-<br>monitoring | Messstellen [Anzahl] |            |               |            |             |               | Messstellen [%] |            |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------|------------|---------------|------------|-------------|---------------|-----------------|------------|
|                               |                         | Start                | beprobt    | Konzentration |            |             | Konzentration |                 |            |
|                               |                         |                      |            | < BG          | ≥ BG       | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l    | > 1 µg/l        | > 0,1 µg/l |
| <b>Arzneimittel</b>           |                         |                      |            |               |            |             |               |                 |            |
| Amidotrizoensäure*            | –                       | 240                  | 216        | 24            | 23         | 2           | –             | *               |            |
| Carbamazepin                  | 2013                    | 530                  | 484        | 46            | 23         | 1           | –             | 0,2             |            |
| Diclofenac*                   | –                       | 473                  | 471        | 2             | 2          | –           | –             | *               |            |
| Sulfamethoxazol               | 2013                    | 530                  | 492        | 38            | 17         | –           | –             | –               |            |
| <b>Korrosionsschutzmittel</b> |                         |                      |            |               |            |             |               |                 |            |
| Benzotriazol                  | 2013                    | 530                  | 408        | 122           | 106        | 6           | –             | 1,1             |            |
| 4- und 5-Methylbenzotriazol*  | –                       | 408                  | 379        | 29            | 23         | 3           | –             | *               |            |
| <b>Künstliche Süsstoffe</b>   |                         |                      |            |               |            |             |               |                 |            |
| Acesulfam*                    | –                       | 212                  | 123        | 89            | 88         | 39          | 11            | *               |            |
| Cyclamat*                     | –                       | 166                  | 164        | 2             | 2          | –           | –             | *               |            |
| Sucralose*                    | –                       | 166                  | 163        | 3             | 3          | 3           | –             | *               |            |
| <b>Komplexbildner</b>         |                         |                      |            |               |            |             |               |                 |            |
| EDTA*                         | 1997 **                 | 54                   | 23         | 31            | 31         | 29          | 10            | *               |            |
| <b>Total</b>                  |                         | <b>530</b>           | <b>335</b> | <b>195</b>    | <b>178</b> | <b>77</b>   | <b>22</b>     |                 |            |

BG Bestimmungsgrenze

\* kein landesweit statistisch belastbarer Datensatz vorhanden

\*\* ausschliesslich Modul TREND

Abbildung 13.1

Arzneimittel im Grundwasser (2014) sowie gereinigtes Abwasser in verschiedenen Fliessgewässern und Siedlungsfläche

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Fliessgewässer mit einem Abfluss Q347 > 2000 l/s.

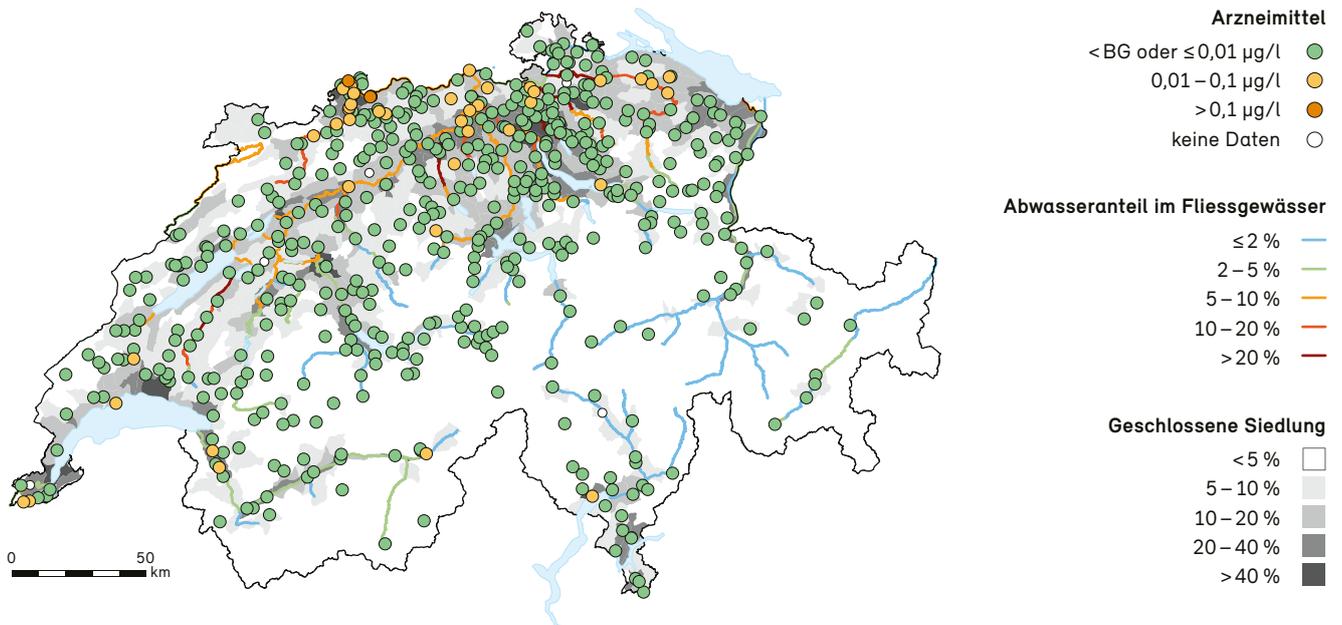


Abbildung 13.2

Korrosionsschutzmittel im Grundwasser (2014) sowie gereinigtes Abwasser in verschiedenen Fliessgewässern und Siedlungsfläche

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Fliessgewässer mit einem Abfluss Q347 > 2000 l/s.

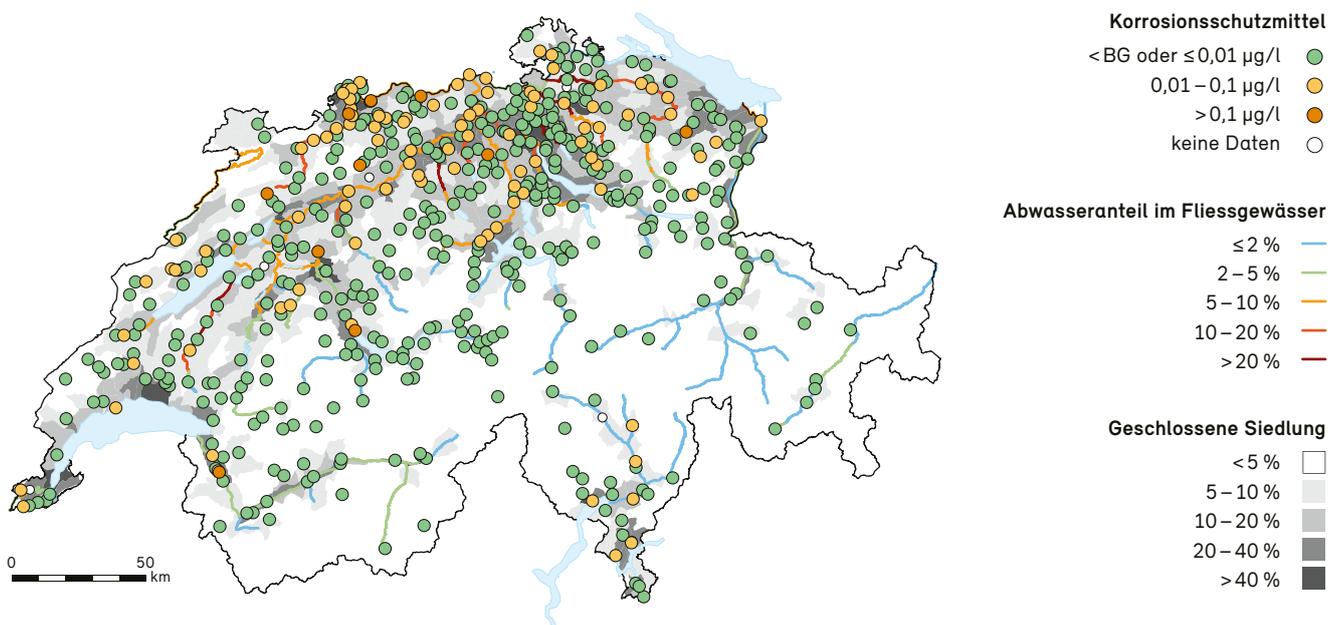
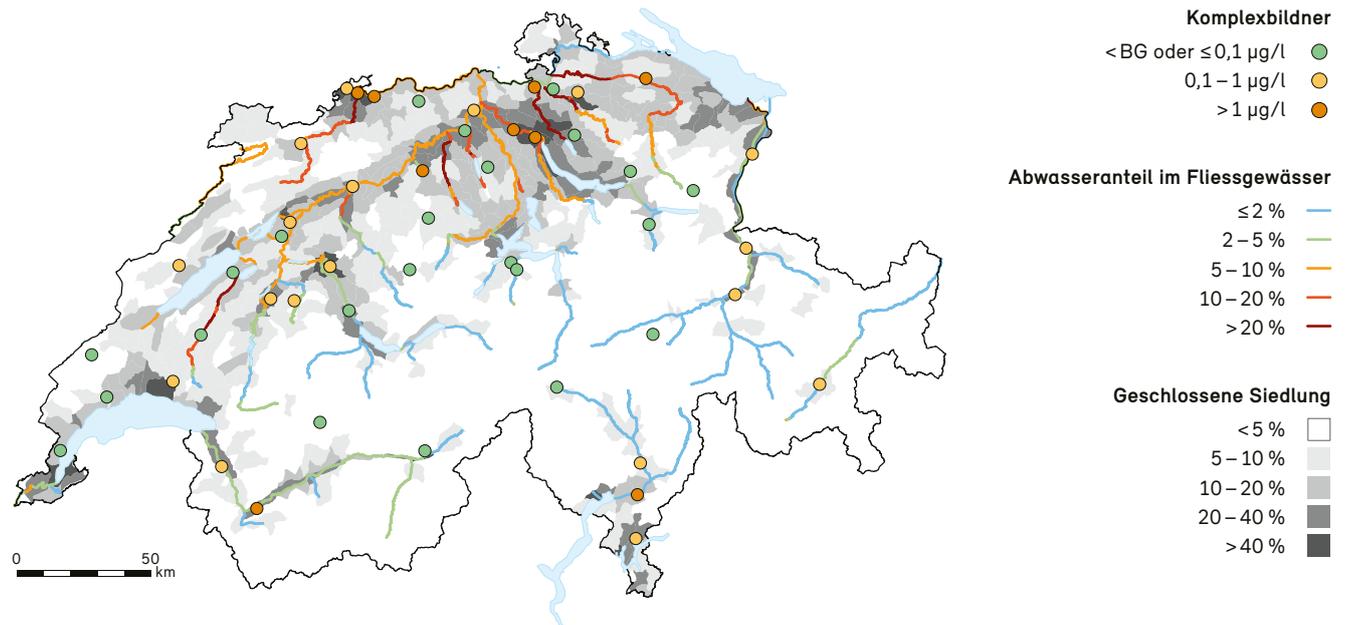


Abbildung 13.3

**Komplexbildner im Grundwasser (2014) sowie gereinigtes Abwasser in verschiedenen Fließgewässern und Siedlungsfläche**

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Messstellen des Moduls TREND. Fließgewässer mit einem Abfluss  $Q_{347} > 2000 \text{ l/s}$ .



## 13.4 Analyse

### Grundwasser-Qualität beeinträchtigt

Abwasserindikatoren werden an mehr als einem Drittel aller NAQUA-Messstellen nachgewiesen und sind somit eine für die Grundwasser-Qualität relevante Gruppe von Substanzen. Die höchsten Konzentrationen von mehr als  $1 \mu\text{g/l}$  gehen auf den in vielen Produkten enthaltenen künstlichen Süsstoff *Acesulfam* und den Komplexbildner *EDTA* zurück. Ebenfalls in erhöhten Konzentrationen von über  $0,1 \mu\text{g/l}$  tritt mehrfach das Korrosionsschutzmittel *Benzotriazol* auf. Rückstände von Arzneimitteln werden deutlich seltener und in eher tiefen Konzentrationen im Grundwasser nachgewiesen.

### Langlebige und mobile Substanzen

Die im Grundwasser nachgewiesenen Abwasserindikatoren sind ausgesprochen langlebig und gleichzeitig mobil, d. h. sie werden in den Kläranlagen bisher nur schlecht eliminiert und zudem im Untergrund kaum abgebaut oder zurückgehalten.

Das Röntgenkontrastmittel *Amidotrizoesäure* weist eine der schlechtesten Eliminationsraten in der mechanischen und biologischen Klärstufe auf. Selbst mit Ozon oder Pulveraktivkohle lässt sich *Amidotrizoesäure* kaum aus dem Abwasser entfernen (Götz et al. 2010a). Mit konventionellen, biologischen Reinigungsverfahren ebenfalls ausgesprochen schlecht eliminiert werden *Acesulfam*, *Carbamazepin* und *EDTA*; die Reinigungsleistung der konventionellen Kläranlagen liegt für diese Substanzen bisher bei weniger als 10% (Jekel & Dott 2013). *Acesulfam* und *EDTA* werden zudem weder in aerobem noch in anaerobem Milieu im Untergrund abgebaut bzw. zurückgehalten. *Amidotrizoesäure*, *Carbamazepin* und *Sulfamethoxazol* werden bei der Uferfiltration ebenfalls kaum eliminiert (Jekel & Dott 2013).

### Knapp 30 Tonnen Acesulfam

Neben der Persistenz und Mobilität der einzelnen Abwasserindikatoren spiegeln deren Konzentrationen im Grundwasser weitgehend das unterschiedliche Anwendungsspektrum bzw. die unterschiedlichen Einsatzmengen wider. Von dem Antibiotikum *Sulfamethoxazol*

und dem Antiepileptikum *Carbamazepin*, das auch zur Behandlung von Neuralgien und Depressionen eingesetzt wird, wurden in den letzten Jahren schweizweit rund 2 bis 4 Tonnen Wirkstoff pro Jahr (IMS Health GmbH 2009 in Götz et al. 2010b; IMS Health GmbH 2016 (nur Carbamazepin)) verkauft. Das Korrosionsschutzmittel *Benzo-triazol*, das u. a. als Silberschutz in Geschirrspülmitteln enthalten ist und auch in Frostschutzmitteln z. B. beim Enteisen von Flugzeugen zum Einsatz kommt, wird mit rund 16 Tonnen pro Jahr (Henkel 2006, in Götz et al. 2010b) in grösseren Mengen verwendet. Es tritt dementsprechend häufiger und in höheren Konzentrationen an den Messstellen auf. Im Grundwasser ebenfalls sehr weit verbreitet ist der künstliche Süsstoff *Acesulfam*, der als Lebensmittelzusatzstoff E 950 u. a. in vielen Produkten, wie z. B. Süssgetränken oder Zahnpasta, enthalten ist. Gemäss Hochrechnungen aus Kläranlagenzuläufen (Longrée et al. 2011) belief sich der Verbrauch von *Acesulfam* vor einigen Jahren auf knapp 30 Tonnen pro Jahr. Dieser scheint gemäss Daten der Rheinüberwachungsstation RÜS in Weil am Rhein jedoch mittlerweile rückläufig zu sein (Mazacek et al. 2016).

### Rund 300 Tonnen EDTA

In relativ grossen Mengen wird der Komplexbildner *EDTA* eingesetzt, der ebenfalls in deutlich erhöhten Konzentrationen im Grundwasser auftrat. Im Einzugsgebiet des Rheins wurden 2010 gemäss einer Zusammenstellung der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR 2012) allein auf Schweizer Seite rund 300 Tonnen *EDTA* verwendet. *EDTA* ist Bestandteil insbesondere industrieller und gewerblicher Wasch- und Reinigungsmittel, kommt allerdings auch als Stabilisator in Konserven (E385) und Kosmetika sowie in Düngemitteln zum Einsatz.

### Infiltration von Flusswasser

Dass Abwasserindikatoren primär an flussnahen Messstellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern nachgewiesen werden, bestätigt, dass diese hauptsächlich durch Infiltration von abwasserbelastetem Flusswasser ins Grundwasser gelangen. Die Konzentration einzelner langlebiger und mobiler Abwasserindikatoren kann an den betroffenen Messstellen ähnliche Werte erreichen wie in den benachbarten Fließgewässern (AWEL 2013). Je höher der Anteil an (gereinigtem) Abwasser im Fluss-

wasser und je höher der Anteil an Flusswasserinfiltrat im Grundwasser, desto höher ist auch die Konzentration dieser Abwasserindikatoren im Grundwasser.

### Filterwirkung des Untergrunds

Insgesamt ist die Qualität des Grundwassers im Vergleich zur Qualität der Fließgewässer (Kunz et al. 2016) insbesondere im Hinblick auf organisch-synthetische Chemikalien allerdings deutlich besser. Ein grosser Teil der Substanzen aus dem Abwasser, die im Flusswasser enthalten sind, wird bei der Untergrundpassage v. a. in den Uferbereichen und Flusssohlen abgebaut oder zurückgehalten.

### Undichte Abwasserkanalisationen

Allerdings sind nicht alle Messstellen, an denen Abwasserindikatoren im Grundwasser nachgewiesen werden, direkt durch Flusswasserinfiltrat beeinflusst. Im Siedlungsgebiet scheinen auch undichte Abwasserleitungen und -kanäle für den Eintrag dieser Substanzen ins Grundwasser verantwortlich zu sein. Ausserhalb geschlossener Siedlungen dürften Abwasserindikatoren auch aus undichten Güllegruben oder beim Ausbringen von mit häuslichem Abwasser vermischter Gülle ins Grundwasser gelangen, wie Nachweise von *Acesulfam* an einzelnen abgelegenen Messstellen zeigen.

### Rückgang zu erwarten

Eine Verbesserung der Grundwasser-Qualität an flussnahen Messstellen ist in den nächsten Jahren durch den Ausbau ausgewählter Kläranlagen mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe zu erwarten. Spätestens 2040 sollen gemäss Schätzungen des BAFU, die auf den heute vorliegenden kantonalen Planungen basieren, insgesamt rund 70% des kommunalen Abwassers mit Verfahren behandelt werden, die eine Elimination von Spurenstoffen ermöglichen. Zusätzlich zu diesen sogenannten End-of-pipe-Massnahmen wird diskutiert, inwiefern zusätzlich auch Massnahmen an der Quelle, d. h. direkt bei den Verursachern bzw. Emittenten, erforderlich sind. Hierzu ist es notwendig, das Wissen zum Eintrag von Chemikalien aus Spitälern und anderen Gesundheitsbetrieben sowie aus Industrie und Gewerbe in die Gewässer zu verbessern.

---

### **Erfolgskontrolle im Langzeitmonitoring von NAQUA**

Wie schnell die Massnahmen greifen und zu einem Rückgang der Konzentrationen der einzelnen Abwasserindikatoren im Grundwasser führen, werden die NAQUA-Daten in den nächsten Jahren zeigen. Abwasserindikatoren werden auch in Zukunft Bestandteil des landesweiten Langzeitmonitorings von NAQUA sein.

# 14 Pilotstudie Perfluorierte Chemikalien

## 14.1 Grundlagen

### Extrem stabil und oberflächenaktiv

Perfluorierte Chemikalien (PFC) bzw. Perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind synthetische, vollständig fluorierte organische Verbindungen. Bedingt durch die starke Kohlenstoff-Fluor-Bindung sind PFC thermisch und chemisch aussergewöhnlich stabil. PFC mit einer polaren funktionellen Endgruppe, wie z. B. perfluorierte Carbon- oder Sulfonsäuren, besitzen darüber hinaus oberflächenaktive Eigenschaften. Sie sind gleichzeitig wasser- und fettabweisend und werden daher auch als perfluorierte Tenside bezeichnet. Die in der Umwelt am weitesten verbreiteten und nach heutigen Kenntnissen toxikologisch relevantesten PFC sind *Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)* und *Perfluorooctansäure (PFOA)* mit jeweils 8 Kohlenstoff-Atomen. Sie werden so gut wie nicht abgebaut und sind daher extrem langlebig, d. h. persistent.

### Einsatz in Industrie und Haushalt

PFC werden seit mehr als 50 Jahren industriell hergestellt. Aufgrund ihrer Stabilität und Oberflächenaktivität besitzen sie ein sehr breites Anwendungsspektrum, sowohl in der Industrie als auch in Alltagsgegenständen. *PFOS* wird in der Schweiz gemäss einer Stoffflussanalyse des BAFU (Buser & Morf 2009) vor allem in der Hartverchromung eingesetzt. Grössere Mengen waren bis Ende 2018 auch in Feuerlöschschäumen enthalten, die zur Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden in Tanklagern, Industrieanlagen, an Flughäfen und auf militärischem Gelände eingesetzt wurden. *PFOA* wird vor allem als Prozesshilfsstoff bei der Produktion von Fluorpolymeren, wie z. B. Polytetrafluorethen (*PTFE*), verwendet, das auch unter dem Handelsnamen Teflon bekannt ist. *PFOA*-Rückstände können in verschiedenen Alltagsgegenständen enthalten sein, beispielsweise in antihafbeschichteten Pfannen, atmungsaktiver Regenschutzbekleidung, Imprägniersprays oder imprägnierten Verpackungsmaterialien.

### Stockholm-Konvention

Aufgrund ihrer Persistenz, Toxizität und Bioakkumulation wurde *PFOS* zusammen mit ihren Salzen sowie *Perfluorooctansulfonylfluorid* im Mai 2009 in das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe (POP-Konvention) aufgenommen (UNEP 2009). Die Herstellung und Verwendung dieser Substanzen ist damit weltweit Beschränkungen unterworfen. In der Schweiz wie auch in der EU sind die Herstellung und das Inverkehrbringen von *PFOS* und ihren Derivaten weitgehend verboten; nur für wenige industrielle Verwendungen von *PFOS* gelten noch Ausnahmen. *PFOA* wurde 2015 zusammen mit ihren Salzen und Vorläuferverbindungen von der Europäischen Kommission zur Aufnahme in die Stockholm-Konvention vorgeschlagen (EC 2015). Zuvor war *PFOA* von der Europäischen Chemikalienagentur ECHA aufgrund ihrer Persistenz, Bioakkumulation und Reproduktionstoxizität als besonders besorgniserregender Stoff identifiziert und 2013 in die Kandidatenliste für eine Regulation im Rahmen der EU-Chemikalienverordnung REACH aufgenommen worden (ECHA 2013). Basierend auf einer 2017 von der EU-Kommission erlassenen Regelung für *PFOA*, ihre Salze und Vorläuferverbindungen (EU 2017) ist in der EU die Herstellung und das Inverkehrbringen dieser Substanzen ab 2020 verboten, ebenso wie deren Verwendung zur Herstellung von Stoffgemischen und Erzeugnissen. Ab diesem Zeitpunkt dürfen auch keine Stoffe, Stoffgemische und Erzeugnisse mehr in Verkehr gebracht werden, die die vorgegebenen Höchstwerte für *PFOA*, ihre Salze bzw. Vorläuferverbindungen nicht einhalten. Für einzelne Produkte und Prozesse gelten Übergangsfristen und Ausnahmen. In der Schweiz wird zurzeit eine mit dem EU-Recht harmonisierte Regelung für *PFOA*, ihre Salze und Vorläuferverbindungen erarbeitet. Ein weiterer potenzieller Kandidat für die Aufnahme in die Stockholm-Konvention ist seit 2017 auf Initiative von Norwegen *Perfluorhexansäure (PFHxA)* sowie ihre Salze und Vorläuferverbindungen. Die Substanzgruppe wird zurzeit im Detail vom Überprüfungsausschuss der Stockholm-Konvention evaluiert.

**GSchV: keine numerischen Anforderungen**

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) soll Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten. Spezifische numerische Anforderungen für PFC im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, enthält die GSchV nicht. Das Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Für Trinkwasser gilt gemäss der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) seit 2017 ein Höchstwert von 0,3 µg/l für PFOS und PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) sowie von 0,5 µg/l für PFOA; die Höchstwerte der TBDV gelten durch den Verweis der GSchV auf die TBDV auch als numerische Anforderungen der GSchV für genutztes bzw. zur Nutzung vorgesehenes Grundwasser.

**14.2 Datenerhebung****Pilotstudie 2007/2008**

PFC zählen zu den Substanzen, die für die Grundwasser-Qualität potenziell relevant bzw. problematisch sind. Ziel einer Pilotstudie war es daher abzuklären, ob und in welchen Konzentrationen PFC im Schweizer Grundwasser auftreten, woher die PFC im Grundwasser allenfalls stammen und inwieweit Handlungsbedarf zum Schutz der Grundwasserressourcen vor PFC-Einträgen besteht. Ausgewählte PFC wurden daher in den Jahren 2007 und 2008 an 49 der 50 Messstellen des Moduls TREND analysiert (Reinhardt et al. 2010). Die Messstellen wurden in diesem Zeitraum zweimal, in Einzelfällen auch dreimal beprobt. Die Proben wurden auf 7 perfluorierte Carbonsäuren, 3 perfluorierte Sulfonsäuren und 1 perfluoriertes Sulfonamid analysiert (Tab. 14.1). Die Bestimmungsgrenze lag je nach Substanz zwischen 0,0005 und 0,001 µg/l.

**Tabelle 14.1****Perfluorierte Chemikalien (PFC) im Grundwasser (2007/2008)**

Grundlage: Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro NAQUA-Messstelle. An den einzelnen Messstellen können mehrere Substanzen gleichzeitig auftreten.

| Substanz                          |       | Messstellen [Anzahl] |               |             |            |          |
|-----------------------------------|-------|----------------------|---------------|-------------|------------|----------|
|                                   |       | beprobt              | Konzentration |             |            |          |
|                                   | < BG  |                      | ≥ BG          | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l |          |
| <b>Perfluorierte Carbonsäuren</b> |       |                      |               |             |            |          |
| Perfluorpentansäure               | PFPeA | 49                   | 41            | 8           | –          | –        |
| Perfluorhexansäure                | PFHxA | 49                   | 38            | 11          | 1          | –        |
| Perfluorheptansäure               | PFHpA | 49                   | 43            | 6           | –          | –        |
| Perfluoroctansäure                | PFOA  | 49                   | 35            | 14          | 3          | –        |
| Perfluornonansäure                | PFNA  | 49                   | 49            | –           | –          | –        |
| Perfluordecansäure                | PFDeA | 49                   | 49            | –           | –          | –        |
| Perfluorundecansäure              | PFUnA | 49                   | 49            | –           | –          | –        |
| <b>Perfluorierte Sulfonsäuren</b> |       |                      |               |             |            |          |
| Perfluorbutansulfonsäure          | PFBS  | 49                   | 34            | 15          | 3          | –        |
| Perfluorhexansulfonsäure          | PFHxS | 49                   | 32            | 17          | 4          | –        |
| Perfluoroctansulfonsäure          | PFOS  | 49                   | 32            | 17          | 6          | 1        |
| <b>Perfluorierte Sulfonamide</b>  |       |                      |               |             |            |          |
| Perfluoroctansulfonamid           | PFOSA | 49                   | 49            | –           | –          | –        |
| <b>Total</b>                      |       | <b>49</b>            | <b>28</b>     | <b>21</b>   | <b>11</b>  | <b>1</b> |

BG Bestimmungsgrenze

### Statistik – Maximalwerte

Die statistischen Auswertungen basieren auf dem Maximalwert der Konzentration der einzelnen Substanzen pro Messstelle.

## 14.3 Zustand

### Konzentrationen eher gering

Rückstände von PFC wurden an 21 der 49 beprobten Messstellen nachgewiesen. Die Konzentrationen waren in der Regel gering. Mit Ausnahme einer Messstelle lagen sie für die einzelnen Substanzen unter  $0,1 \mu\text{g/l}$ , an gut der Hälfte der Messstellen unter  $0,01 \mu\text{g/l}$ .

### Rückstände 7 verschiedener PFC

Insgesamt 7 verschiedene PFC wurden im Grundwasser detektiert (Tab. 14.1). Am häufigsten und gleichzeitig in den höchsten Konzentrationen wurden die perfluorierten Sulfonsäuren mit 8, 6 und 4 Kohlenstoff-Atomen *PFOS*, *PFHxS* und *Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)* nachgewiesen, gefolgt von den perfluorierten Carbonsäuren mit 8

bzw. 6 Kohlenstoff-Atomen *PFOA* und *PFHxA*. Der Maximalwert lag bei  $0,12 \mu\text{g/l}$  *PFOS*.

### Lockergesteins-Grundwasserleiter betroffen

Die Nachweise von PFC waren fast ausschliesslich auf Lockergesteins-Grundwasserleiter der Talsohlen beschränkt, die zu einem wesentlichen Teil durch die Infiltration von Flusswasser gespeist werden (Abb. 14.1). Insbesondere entlang mittelgrosser Fließgewässer, wie Reppisch, Ergolz, Sihl, Birs, Glatt oder Thur, traten die einzelnen PFC in Konzentrationen von mehr als  $0,01 \mu\text{g/l}$  im Grundwasser auf. An Messstellen in Flussschottern am Oberlauf von Aare, Rhein und Rhone wurden PFC dagegen nicht oder nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen.

## 14.4 Analyse

### Mobile und persistente PFC im Grundwasser

Diejenigen PFC, die an verschiedenen Messstellen in Konzentrationen von mehr als  $0,01 \mu\text{g/l}$  im Grundwasser

Abbildung 14.1

Perfluorierte Chemikalien (PFC) im Grundwasser (2007/2008) sowie gereinigtes Abwasser in verschiedenen Fließgewässern und Grundwasserleitertyp

Maximalwert der Konzentration der Substanzen pro NAQUA-Messstelle. Messstellen des Moduls TREND. Pilotstudie 2007/2008.

Fließgewässer mit einem Abfluss  $Q_{347} > 2000 \text{ l/s}$ .



nachgewiesen wurden, d.h. *PFOS*, *PFHxS*, *PFBS* und *PFOA*, sind in der Umwelt ausgesprochen mobil und gleichzeitig persistent. Besonders mobil ist *PFBS*, da es lediglich 4 Kohlenstoff-Atome enthält, und die Mobilität der Substanzen mit abnehmender Molekülgrösse generell zunimmt. PFC mit mehr als 8 Kohlenstoff-Atomen wurden dagegen nicht im Grundwasser nachgewiesen.

### Produktionsmengen

Neben den substanzspezifischen Eigenschaften ist für das Auftreten der einzelnen PFC im Grundwasser auch ausschlaggebend, in welchen Mengen sie produziert und eingesetzt werden. Insbesondere die relativ häufig nachgewiesenen Verbindungen *PFOS* und *PFOA* sowie strukturverwandte Perfluoroctyl-Verbindungen wurden in der Vergangenheit in grösseren Mengen industriell hergestellt und verarbeitet. Die kürzerkettigen PFC mit 4 bzw. 6 Kohlenstoff-Atomen haben erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Sie gelten als weniger toxisch und weniger bioakkumulierbar als *PFOS* und *PFOA* und werden mittlerweile vermehrt als deren Ersatzstoffe verwendet.

### Eintrag

In die Umwelt gelangen können PFC zum einen direkt und punktuell bei der industriellen Produktion und Verarbeitung. Zum anderen werden PFC beim Gebrauch PFC-haltiger Produkte freigesetzt bzw. entstehen beim Abbau vollständig oder teilfluorierter Vorläufersubstanzen in der Umwelt.

### Abwasser als Hauptquelle

Für den Eintrag von PFC ins Grundwasser scheint das Abwasser eine wesentliche Rolle zu spielen. PFC wurden hauptsächlich an Messstellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern nachgewiesen, die wesentlich durch die Infiltration von Flusswasser gespeist werden. Je höher der Anteil an gereinigtem Abwasser im Fliessgewässer, desto höher war häufig auch die PFC-Konzentration im flussnahen Grundwasser (Abb. 14.1). PFC gelangen demnach wohl hauptsächlich über das gereinigte Abwasser in die Oberflächengewässer und von dort durch Infiltration des Flusswassers ins Grundwasser. Das gleichzeitige Auftreten weiterer Abwasserindikatoren, wie z.B. *EDTA* oder Arzneimitteln, an den betroffenen Messstellen bestätigt diese Hypothese.

### Punktquellen eher von lokaler Bedeutung

Industrielle Punktquellen spielen für den Eintrag von PFC ins Grundwasser eher lokal begrenzt eine Rolle. An einzelnen Messstellen deuten auffällig erhöhte Konzentrationen einzelner PFC auf eine lokale PFC-Emission hin. So stammen die PFC im Grundwasser einer Messstelle im Wallis, an der eine *PFOS*-Konzentration von 0,12 µg/l aufgetreten ist, vermutlich aus dem Einsatz PFC-haltiger Feuerlöschschäume in einem nahegelegenen Industriebetrieb.

### Zukünftige Entwicklung

Wie sich die Konzentrationen von PFC im Grundwasser in Zukunft entwickeln, hängt in erster Linie davon ab, in welchen Mengen PFC industriell verwendet und beim Gebrauch PFC-haltiger Produkte freigesetzt werden. Um die *PFOS*-Emissionen in die Umwelt zu reduzieren, wurden das Inverkehrbringen und die Verwendung von *PFOS* in der Schweiz – in Einklang mit der Stockholm-Konvention und dem EU-Recht – in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) Ende 2010 stark eingeschränkt. Für weitere PFC, insbesondere *PFOA* und *PFHxA* inklusive deren Salze und Vorläuferverbindungen, werden zurzeit weitere Regelungen erarbeitet bzw. geprüft. Zudem wurden von der Organisation der Vereinten Nationen (UNO) und der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) Projekte initiiert, PFC weltweit zu substituieren. Die PFC-Befunde im Grundwasser der Schweiz könnten zukünftig auch infolge der Nachrüstung kommunaler Kläranlagen mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe abnehmen. Während PFC bei der Behandlung des Abwassers mit Ozon allerdings nur unzureichend abgebaut werden, kann beispielsweise mittels Aktivkohle ein grosser Teil der PFC aus dem Abwasser entfernt werden (Schröder et al. 2010).

### Erneut Pilotstudie geplant

Um zu überprüfen, ob die bereits getroffenen Massnahmen wirken, ist vorgesehen, im Jahr 2019 erneut eine Pilotstudie zu PFC durchzuführen und dabei auch potenzielle neue Ersatzstoffe zu berücksichtigen. Eine parallele Untersuchung der entsprechenden Oberflächengewässer soll es zudem erlauben, die PFC-Stoffflüsse besser zu verfolgen.

# 15 Pilotstudie Screening

## 15.1 Grundlagen

### Rund 100 000 Chemikalien auf dem Markt

Weltweit werden rund 100 000 Chemikalien industriell hergestellt und kommerziell genutzt. Sowohl bei der Produktion und Verarbeitung als auch beim regulären Gebrauch sowie bei der Entsorgung können diese Substanzen in die Umwelt gelangen. Für die Qualität des Grundwassers können vor allem diejenigen künstlichen Substanzen problematisch sein, die in der Umwelt schlecht abbaubar und daher langlebig (persistent) sind und die gleichzeitig eine hohe Mobilität aufweisen, d. h. gut wasserlöslich sind oder schlecht an Bodenpartikel sorbieren.

### Rund 60 organisch-synthetische Verbindungen im Langzeitmonitoring

Nur ein Bruchteil dieser Chemikalien lässt sich zurzeit mit vertretbarem Aufwand im Grundwasser analysieren. Die Zahl der Substanzen, die im Langzeitmonitoring von NAQUA untersucht werden können, ist daher beschränkt. Landesweit erfasst werden rund 60 organisch-synthetische Verbindungen, die für die Grundwasser-Qualität relevant sind und von den beteiligten Labors entsprechend dem Stand der Technik analysiert werden können.

### Früherkennung «emerging pollutants»

Um darüber hinaus allfällige weitere, neu auftretende und potenziell relevante Substanzen («emerging pollutants») im Grundwasser zu identifizieren, werden bei Bedarf zu einzelnen Substanzen oder Substanzgruppen zeitlich befristet Pilotstudien im Rahmen von NAQUA durchgeführt. Die Analytik dieser Substanzen ist häufig sehr anspruchsvoll und erfolgt in spezialisierten (Forschungs-)labors.

### GSchV: keine künstlichen, langlebigen Substanzen

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) soll Grundwasser generell keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten. Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, muss zudem –

gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen.

## 15.2 Datenerhebung

### Mehr als 200 Substanzen analysiert

Eine umfassende und leistungsstarke Analysemethode ist das sogenannte Screening, bei dem die Proben systematisch auf ein sehr breites Substanzspektrum «gescannt» werden. Mit einer an der Eawag entwickelten Methode (Hollender et al. 2010, Krauss et al. 2010) konnten in der Pilotstudie «Screening Mikroverunreinigungen» 2007/2008 rund 200 verschiedene, relativ gut wasserlösliche organische Substanzen bei Bestimmungsgrenzen von unter 0,01 µg/l analysiert werden. Untersucht wurden 76 Pflanzenschutzmittel (PSM), 16 Biozide und 46 Arzneimittel sowie insgesamt rund 70 zugehörige Metaboliten (Tab. 15.1). Ausserdem wurden auch Rückstände einzelner Lebensmittelzusatzstoffe, Körperpflegeprodukte, Industriechemikalien und Korrosionsschutzmittel analysiert.

### Identifikation unbekannter Verbindungen

Die Methode erlaubt im Idealfall nicht nur, genau definierte Zielsubstanzen nachzuweisen (Target-Screening), sondern auch unbekannte chemische Verbindungen – zumindest qualitativ – zu identifizieren, nach denen nicht gezielt gesucht wird (Non-target-Screening). Um die einzelnen Substanzen exakt zu quantifizieren, ist jedoch nach wie vor ein Abgleich mit isotopenmarkierten Referenzstandards erforderlich.

### 22 potenziell belastete Messstellen

Für die Pilotstudie wurde an insgesamt 22 Messstellen des Moduls TREND (Kap. 3) jeweils eine Probe entnommen. Ausgewählt wurden potenziell belastete Messstellen im Ackerbau- oder Siedlungsgebiet, an denen in der Vergangenheit bereits verschiedene organische Spurenstoffe im Grundwasser nachgewiesen worden waren.

## 15.3 Ergebnisse

### 19 «neue» Substanzen im Grundwasser identifiziert

In der Pilotstudie wurden insgesamt 50 Substanzen im Grundwasser identifiziert (Tab. 15.1). Knapp 30 % dieser Substanzen waren zum damaligen Zeitpunkt bereits Teil des Langzeitmonitorings und wurden regelmässig landesweit analysiert. Von weiteren 30 % der Substanzen lagen ebenfalls schon Daten aus vorherigen Pilotstudien bzw. kantonalen Erhebungen vor. 19 Substanzen wurden dagegen neu im Rahmen von NAQUA nachgewiesen (Tab. 15.2). Es handelt sich bei diesen «neuen» Substanzen hauptsächlich um PSM-Metaboliten.

### Konzentration meist gering

Die Konzentration der meisten erstmals nachgewiesenen Substanzen lag unter 0,1 µg/l, in vielen Fällen sogar unter 0,01 µg/l. Einzelne der neu detektierten Substanzen traten jedoch auch in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l auf. Zu diesen Substanzen gehören die PSM-Metaboliten *Desphenyl-chloridazon* und *Methyl-desphenyl-chloridazon* (Kap. 11), der künstliche Süsstoff *Acesulfam*, die beiden Korrosionsschutzmittel *Benzotriazol* und *5-Methylbenzotriazol* sowie die Industriechemikalie *2-Naphthalinsulfonsäure* (Tab. 15.2).

### Künstlicher Süsstoff

*Acesulfam* ist unter dem Kürzel E 950 als Lebensmittelzusatzstoff zugelassen und u. a. als Süsstoff in Getränken, Brotaufstrichen, Obst- und Gemüsekonserven, Zahn pasta und Kaugummi enthalten. Es wird nahezu unverändert wieder aus dem menschlichen Körper ausgeschieden.

### Korrosionsschutzmittel

*Benzotriazol* und *5-Methylbenzotriazol* werden als Korrosionsschutzmittel z.B. in Farben und Lacken, Kühlflüssigkeiten oder beim Enteisen von Flugzeugen eingesetzt. Darüber hinaus kommen sie auch häufig als Silberschutz in Geschirrspülmitteln zum Einsatz. Nach Angaben von Henkel (2006, in Götz et al. 2010b) werden in der Schweiz rund 16 t *Benzotriazol* pro Jahr verbraucht.

### Industriechemikalien

*Naphthalinsulfonsäuren* sind als Industriechemikalien weit verbreitet. Sie werden u. a. als Zwischenprodukte bei der Herstellung von Farbstoffen sowie als Zuschlagsstoff für Zement und Gipskarton oder als Emulgatoren und Dispersionsmittel verwendet.

Tabelle 15.1

Substanzen der Pilotstudie «Screening» (2007/2008)

Anzahl Substanzen nach Einsatzgebiet.

|                          | Substanzen [Anzahl] |               |      |             |            |
|--------------------------|---------------------|---------------|------|-------------|------------|
|                          | analysiert          | Konzentration |      |             |            |
|                          |                     | < BG          | ≥ BG | > 0,01 µg/l | > 0,1 µg/l |
| PSM-Wirkstoffe           | 76                  | 58            | 18   | 6           | –          |
| PSM-Metaboliten          | 53                  | 35            | 18   | 14          | 6          |
| Biozid-Wirkstoffe        | 16                  | 12            | 4    | 1           | –          |
| Biozid-Metaboliten       | 3                   | 2             | 1    | –           | –          |
| Arzneimittel-Wirkstoffe  | 46                  | 43            | 3    | 1           | –          |
| Arzneimittel-Metaboliten | 10                  | 10            | –    | –           | –          |
| Lebensmittelzusatzstoffe | 3                   | 1             | 2    | 2           | 1          |
| Körperpflegeprodukte     | 3                   | 2             | 1    | –           | –          |
| Korrosionsschutzmittel   | 2                   | –             | 2    | 2           | 2          |
| Industriechemikalien     | 8                   | 7             | 1    | 1           | 1          |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe, Biozid-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

BG Bestimmungsgrenze

Tabelle 15.2

## «Neue» Substanzen im Grundwasser (2007/2008)

Grundlage: Maximalwert der Konzentration aller beprobten Messstellen. Aufgeführt sind alle Substanzen, die in der Pilotstudie «Screening» erstmals im Rahmen von NAQUA nachgewiesen wurden. Die Substanzen sind nach Einsatzgebiet gruppiert.

|                          | Substanzen                      |                    |                              |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|
|                          | Konzentration                   |                    |                              |
|                          | ≤ 0,01 µg/l                     | 0,01 – 0,1 µg/l    | > 0,1 µg/l                   |
| PSM-Wirkstoffe           | Prometon                        | Asulam             | –                            |
|                          | Simeton                         |                    |                              |
| PSM-Metaboliten          | Desamino-metamitron             | Dimethachlor-OXA   | Desphenyl-chloridazon        |
|                          | Desamino-metribuzin             | Metazachlor-ESA    | Methyl-desphenyl-chloridazon |
|                          | Desethyl-2-hydroxy-terbutylazin | Metazachlor-OXA    |                              |
|                          |                                 | 2-Hydroxy-propazin |                              |
| Biozid-Wirkstoffe        | Benzisothiazolinon              | –                  | –                            |
| Biozid-Metaboliten       | Descyclopropyl-irgarol          | –                  | –                            |
| Arzneimittel-Wirkstoffe  | –                               | –                  | –                            |
| Arzneimittel-Metaboliten | –                               | –                  | –                            |
| Lebensmittelzusatzstoffe | –                               | –                  | Acesulfam                    |
| Körperpflegeprodukte     | Galaxolidon                     | –                  |                              |
| Korrosionsschutzmittel   | –                               | –                  | 5-Methylbenzotriazol         |
|                          |                                 |                    | Benztotriazol                |
| Industriechemikalien     | –                               | –                  | 2-Naphthalinsulfonsäure      |

Numerische Anforderung GSchV (PSM-Wirkstoffe, Biozid-Wirkstoffe): 0,1 µg/l

### Unbekannte Substanz

In mehreren Proben trat ausserdem eine bis dato unbekannte Substanz auf, bei der es sich vermutlich um einen Metaboliten des PSM-Wirkstoffs *Chlorthalonil* handelt. Anhand der exakten molekularen Masse und des Isotopenmusters konnte der entsprechenden Substanz eine eindeutige Summenformel zugeordnet werden. Da jedoch keine Referenzstandards zur Verfügung standen, war es nicht möglich, diese Substanz eindeutig zu identifizieren und zu quantifizieren.

## 15.4 Analyse

### Substanzen bereits im Langzeitmonitoring

Ein grosser Teil der Substanzen, die nach heutigem Kenntnisstand für die Grundwasser-Qualität relevant und mit den derzeit verfügbaren analytischen Methoden nachweisbar sind, wird im Langzeitmonitoring von NAQUA bereits erfasst. Mit dem erheblich erweiterten

Analytikspektrum der Pilotstudie konnten an den Messstellen jedoch auch 6 «neue» Substanzen in Konzentrationen von mehr als 0,1 µg/l identifiziert werden, die bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Langzeitmonitoring untersucht worden waren.

### Aufnahme «neuer» Substanzen in Langzeitmonitoring

Um die landesweite Bedeutung dieser Substanzen für die Grundwasser-Qualität zu eruieren und einen entsprechenden statistisch belastbaren, repräsentativen Datensatz zu generieren, wurden in der Folge die beiden *Chloridazon*-Metaboliten sowie *Benztotriazol* und *Acesulfam* in das Langzeitmonitoring aufgenommen. Die beiden *Chloridazon*-Metaboliten werden seit Anfang 2010, der Abwasserindikator *Benztotriazol* seit Anfang 2012 landesweit untersucht. *Acesulfam* ist als Abwasserindikator seit 2015 Bestandteil des Langzeitmonitorings.

### Grenzen der Methode

Obwohl mit der im Screening verwendeten Analyse-methode ein relativ breites Spektrum an Substanzen erfasst werden konnte, war das analytische Fenster dennoch begrenzt. Letztendlich konnten nur diejenigen Substanzen eindeutig identifiziert werden, nach denen gezielt gesucht wurde. Eine umfassende Non-target-Analytik war zum Zeitpunkt der Pilotstudie 2007/2008 noch nicht möglich.

### PMOC – persistent and mobile organic compounds

Insbesondere sogenannte «persistent and mobile organic compounds» (PMOC) lassen sich zudem mit der gängigen Screening-Analytik häufig nicht erfassen (Reemtsma et al. 2016). Diese langlebigen und mobilen Substanzen sind für die Qualität von Grund- und Trinkwasser von besonderer Bedeutung, da sie sich mit technischen Verfahren meist nicht entfernen lassen und auch während der Bodenpassage nicht zurückgehalten werden. Im Screening nicht erfasst werden u. a. kurzkettige perfluorierte Chemikalien, das Arzneimittel *Metformin* oder der Komplexbildner *EDTA*. Ebenso wie für die PSM-Rückstände *Glyphosat* und *AMPA* müssen für diese Substanzen jeweils separate, einzelstoffspezifische Analysemethoden entwickelt werden.

### Auswahl und Priorisierung Substanzen

Eine systematische und fundierte Auswahl und Priorisierung der Substanzen für das Monitoring erscheint daher umso wichtiger. Im Idealfall basiert diese Auswahl auf den jeweiligen stoffspezifischen Eigenschaften, wie der Langlebigkeit, der Wasserlöslichkeit und der Sorbierbarkeit, sowie auf den Stoffmengen, die pro Jahr in der Schweiz produziert, verarbeitet oder verwendet werden. Verbrauchszahlen werden für die Mehrheit der organisch-synthetischen Chemikalien allerdings selten erfasst bzw. publiziert und unterliegen in der Regel dem Betriebsgeheimnis.

### Modellprognosen für Metaboliten

Zu den zugehörigen Metaboliten liegen fast gar keine Daten vor. Mit Ausnahme der PSM, bei denen im Rahmen des Zulassungsverfahrens auch Daten zu ausgewählten Metaboliten erhoben werden, besteht für alle anderen organisch-synthetischen Chemikalien bisher keine Pflicht, diese systematisch auf die entsprechenden

Metaboliten zu untersuchen. Um die für die Gewässer potenziell relevanten Metaboliten zu prognostizieren, greift man daher auf Modelle zurück, wie sie z. B. im Projekt «Kombinierte Modellierung und Messung von Metaboliten» KoMet (Fenner et al. 2011) entwickelt wurden. Auf Basis der Struktur der Ausgangsverbindung werden hierbei typische Abbaureaktionen simuliert und die potenziellen Metaboliten nach der Wahrscheinlichkeit ihrer Entstehung priorisiert. Der Aufwand für solche Modellprognosen ist zurzeit allerdings noch sehr hoch.

### Ausblick Screening

Als Ergänzung zum Langzeitmonitoring erscheint auch in Zukunft ein breit angelegtes analytisches Screening in regelmässigen Abständen sinnvoll, um neue, potenziell problematische Substanzen im Grundwasser zu identifizieren. So findet seit 2017 erneut ein Target-Screening auf rund 600 Zielsubstanzen an ausgewählten NAQUA-Messstellen statt. Gleichzeitig werden die Proben in einem Suspect-Screening semiquantitativ auf bis zu 1000 PSM-Metaboliten untersucht. 2018 und 2019 werden ausgewählte Proben zusätzlich einem Non-target-Screening unterzogen.

# 16 Pilotstudie Mikroorganismen

## 16.1 Grundlagen

### Bakterien, Viren, Protozoen

Mikroorganismen lassen sich hauptsächlich in drei Gruppen – Bakterien, Viren und Protozoen – unterteilen. Bakterien weisen in der Regel eine Grösse von wenigen Mikrometern auf; Viren sind etwa 100-mal kleiner als Bakterien, Protozoen etwa 10-mal grösser.

### Harmlose und krankheitserregende Mikroorganismen

Mikroorganismen kommen überall in der Umwelt und somit auch im Grundwasser natürlicherweise in grosser Zahl vor. Die meisten Mikroorganismen sind für die menschliche Gesundheit vollkommen harmlos. Einige Mikroorganismen sind allerdings pathogen, d.h. krankheitserregend. Sie können die menschliche Gesundheit gefährden, indem sie z.B. Durchfallerkrankungen auslösen.

### Fäkalien als Hauptquelle pathogener Mikroorganismen

Pathogene Mikroorganismen gelangen vor allem mit menschlichen und tierischen Fäkalien in die ober- und unterirdischen Gewässer. Im Siedlungsgebiet geschieht dies durch undichte Kanalisationen, über Kläranlagenausläufe oder Mischwasserentlastungen. In landwirtschaftlich genutzten Gebieten erfolgt der Eintrag durch das Ausbringen von Hofdünger (Gülle und Mist, z.T. einschliesslich des häuslichen Abwassers) und Ausscheidungen von Nutztieren beim Weidegang. Auch im Wald und in unproduktiven Gebieten werden fäkale Mikroorganismen z.B. durch Ausscheidungen wildlebender Tiere oder von Menschen in der Natur freigesetzt und können ins Grundwasser gelangen.

### Indikatorbakterien

Indikatorbakterien, wie z.B. *Escherichia coli* (*E. coli*) und Enterokokken, sind nicht-pathogene Bakterien, welche in Fäkalien in erheblich grösseren Mengen als pathogene Mikroorganismen auftreten und deshalb in der Regel leichter nachzuweisen sind. Zur Qualitätskontrolle von Grund- und Trinkwasser werden deshalb hauptsächlich diese Indikatorbakterien analysiert und nur selten pathogene Mikroorganismen.

### Eintrag ins Grundwasser

Je nach Fäkalienmenge, Art des Umwelteintrags, Bodenbeschaffenheit und Grundwasserleitertyp werden fäkale Mikroorganismen nur teilweise an der Oberfläche und im Untergrund zurückgehalten. Ist das Grundwasser z.B. durch eine lediglich dünne Bodenschicht ungenügend geschützt oder weist der Boden tiefreichende präferenzielle Fließwege auf, können fäkale Mikroorganismen rasch von der Oberfläche ins Grundwasser verfrachtet werden.

### Grundwasserschutz

Die Grundwasserschutzzone S2 (Engere Schutzzone) hat gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) das zentrale Ziel zu verhindern, dass Krankheitserreger in solcher Menge in eine Grundwasserfassung gelangen, dass sie die Trinkwassernutzung gefährden. Ihr Eintrag soll – auch wenn nicht vollständig verhindert – so weit beschränkt werden, dass der Konsum des Trinkwassers keine Krankheiten auslösen kann. Deshalb ist in dieser Schutzzone u. a. das Ausbringen von flüssigen Hof- und Recyclingdüngern, wie z.B. Gülle oder flüssigem Gärgut, verboten. In Lockergesteins-Grundwasserleitern und schwach heterogenen Festgesteins-Grundwasserleitern wird die Schutzzone S2 so bemessen, dass die Fließzeit des Grundwassers vom äusseren Rand der Schutzzone bis zur Grundwasserfassung mindestens 10 Tage beträgt. Die langjährige Praxis zeigt, dass pathogene Mikroorganismen in der Regel innerhalb von 10 Tagen im gesättigten Untergrund eliminiert oder so stark dezimiert werden, dass von ihnen bei der Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser keine Gefahr mehr für die Gesundheit ausgeht.

### Stark heterogene Kluft- und Karst-Grundwasserleiter

In stark heterogenen Kluft- und Karst-Grundwasserleitern sieht die Gewässerschutzverordnung (GSchV) ähnliche Einschränkungen für diejenigen Bereiche des Einzugsgebietes einer Grundwasserfassung vor, die als hoch vulnerabel gegenüber dem Eintrag von Verunreinigungen (einschliesslich Krankheitserregern) gelten (Schutzzone S<sub>n</sub>). Allerdings kann hier aufgrund der hohen Vulnerabilität eine Verunreinigung des Grundwassers mit Krankheitserregern selbst bei konsequenter Umsetzung

des Grundwasserschutzes in vielen Fällen nicht verhindert werden. Auch lässt sich wegen der Heterogenität des Untergrundes in der Regel nicht gänzlich ausschliessen, dass es aus Bereichen nur mittlerer Vulnerabilität (Schutzzone  $S_m$ ) zu fäkalen Verunreinigungen des Grundwassers kommt. Die Schutzmassnahmen zielen in diesen Fällen darauf ab, das Auftreten fäkaler Mikroorganismen an der entsprechenden Grundwasserfassung weitestmöglich zu reduzieren.

#### **GSchV: keine numerischen Anforderungen**

Die GSchV enthält keine Anforderungen für Mikroorganismen im Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist. Das Grundwasser muss allerdings – gegebenenfalls nach einfacher Aufbereitung – die Anforderungen des Lebensmittelrechts erfüllen. Für Mikroorganismen sind gemäss Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) für Trinkwasser weder *E. coli* noch Enterokokken in 100ml-Proben zulässig; für aerobe mesophile Keime (AMK) gilt ein Höchstwert von 100 AMK pro ml.

#### **GSchV: naturnahe und standortgerechte Biozönose**

Entsprechend den ökologischen Zielen für Gewässer nach Anhang 1 GSchV soll die Biozönose des Grundwassers, d.h. die dort ansässige Gemeinschaft aus Kleinstlebewesen, naturnah und standortgerecht sein. Dazu gehört neben den Mikroorganismen auch die Grundwasserfauna. Der naturnahe Zustand der Grundwasserbiozönose zeichnet sich gemäss Wegleitung Grundwasserschutz (BUWAL 2004) u.a. «durch eine geringe Anzahl koloniebildender Keime und eine geringe Besiedlungsdichte der übrigen Bakterien» aus. Eine intakte Biozönose gilt als Indikator für eine gute Qualität des Grundwassers (Hunkeler et al. 2006).

## **16.2 Datenerhebung**

### **Pilotstudie 2009/2010**

Um die für die Grundwasser-Qualität relevanten Mikroorganismen zu identifizieren und den Einfluss der hydrogeologischen Standortverhältnisse sowie der Bodennutzung exemplarisch zu evaluieren, wurden in den Jahren 2009/2010 ausgewählte mikrobiologische Para-

meter in einer Pilotstudie untersucht (Pronk et al. 2010, Kötzsch & Sinreich 2014).

#### **Messstellen und Beprobungsfrequenz**

Im Rahmen dieser Pilotstudie wurden alle 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 potenziell belastete Messstellen des Moduls SPEZ beprobt. 40 Messstellen des Moduls TREND wurden zweimal beprobt, 10 Messstellen des Moduls TREND und alle 9 Messstellen des Moduls SPEZ jeweils vier- bis sechsmal. Die häufigere Beprobung erfolgte an potenziell belasteten Messstellen, wo aufgrund der Nutzungen im Einzugsgebiet oder der Eigenschaften des Grundwasserleiters Verunreinigungen zu erwarten waren bzw. an denen in der Vergangenheit bereits fäkale Mikroorganismen oder Schadstoffe, wie z. B. PSM oder Arzneimittel, im Grundwasser aufgetreten sind. Die Ergebnisse der Pilotstudie erlauben jedoch aufgrund der spezifischen Auswahl und Beprobungsfrequenz der Messstellen keine für die Schweiz repräsentative Aussage über den mikrobiologischen Zustand des Grundwassers.

#### **Probenahme und Qualitätssicherung**

Die Probenahme fand nach einem festen Probenahmeplan, unabhängig von den herrschenden meteorologischen und hydrologischen Verhältnissen statt. Um eine allfällige Verschleppung von Mikroorganismen bei der Entnahme auszuschliessen, wurden alle Proben unter besonderen hygienischen Vorsichtsmassnahmen (Atemmaske, mit Alkohol desinfizierte Latex-Handschuhe) entnommen und in sterile Probengefässe abgefüllt.

#### **Mikrobiologische Parameter**

Analysiert wurden 15 verschiedene für die Grundwasser-Qualität relevante mikrobiologische Parameter (Tab. 16.1). Davon gehören 9 zur Gruppe der Bakterien, 4 zu den Viren und 2 zu den Protozoen. Neben den gängigen Indikatorbakterien für fäkale Verunreinigungen (insbesondere *E. coli*, Enterokokken) wurden auch pathogene Bakterien sowie mikrobiologische Summenparameter (Gesamtzellzahl, AMK) analysiert. Mit Ausnahme der Gesamtzellzahl und der AMK stammen die untersuchten Mikroorganismen fast ausschliesslich aus Fäkalquellen. Während die fäkalen Bakterien und die Protozoen sowohl vom Menschen als auch von Tieren ausgeschieden werden, stammen die analysierten Viren ausschliesslich vom Menschen.

**Tabelle 16.1**  
**Parameter und Analytik der Pilotstudie Mikroorganismen (2009/2010)**

| Parameter  | Analysemethode       | Nachweis    | Probenvolumen | Nachweisgrenze               |
|--|----------------------|-------------|---------------|------------------------------|
| <b>Bakterien</b>   |                      |             |               |                              |
| Gesamtzellzahl   | Durchflusszytometrie | quantitativ | 1 ml          | 1 Zelle pro ml               |
| Aerobe mesophile Keime (AMK)                             | Kultivierung         | quantitativ | 1 ml          | 1 KBE pro ml                 |
| <b>– Indikatorbakterien</b>                              |                      |             |               |                              |
| <i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )               | Kultivierung         | quantitativ | 100 ml/1 l    | 1 KBE pro l                  |
| Enterokokken   | Kultivierung         | quantitativ | 100 ml        | 1 KBE pro 100 ml             |
| <i>Clostridium perfringens</i> ( <i>C. perfringens</i> ) | Kultivierung         | quantitativ | 100 ml        | 1 KBE pro 100 ml             |
| <b>– Pathogene Bakterien</b>                             |                      |             |               |                              |
| <i>Campylobacter</i> spp.                                | Kultivierung         | quantitativ | 1 l           | 1 KBE pro l                  |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ( <i>P. aeruginosa</i> )   | Kultivierung         | quantitativ | 100 ml        | 1 KBE pro 100 ml             |
| <i>Salmonella</i> spp.                                   | Kultivierung         | quantitativ | 1 l           | 1 KBE pro l                  |
| Verotoxinbildende <i>E. coli</i> (VTEC)                  | PCR                  | qualitativ  | 100 ml/1 l    | Bakterienbestandteile in 1 l |
| <b>Viren</b>   |                      |             |               |                              |
| Adenoviren   | PCR                  | qualitativ  | 1 l           | Virenbestandteile in 1 l     |
| Enteroviren  | PCR                  | qualitativ  | 1 l           | Virenbestandteile in 1 l     |
| Noroviren  | PCR                  | qualitativ  | 1 l           | Virenbestandteile in 1 l     |
| Rotaviren  | PCR                  | qualitativ  | 1 l           | Virenbestandteile in 1 l     |
| <b>Protozoen</b>   |                      |             |               |                              |
| <i>Cryptosporidium</i> spp.                              | Auszählung           | quantitativ | 20 l          | 1 Oozyste pro 20 l           |
| <i>Giardia</i> spp.                                      | Auszählung           | quantitativ | 20 l          | 1 Zyste pro 20 l             |

KBE Koloniebildende Einheiten  
(Oo)Zyste Dauerformen der Kryptosporidien bzw. Giardien  
PCR Polymerase Chain Reaction

### Analysemethoden und deren Aussagekraft

Je nach Parameter kamen unterschiedliche Analysemethoden zum Einsatz (Tab. 16.1). Die Gesamtzahl bakterieller Zellen wurde mittels Durchflusszytometrie bestimmt. Die meisten Bakterienarten wurden mit den klassischen Verfahren auf spezifischen Nährmedien kultiviert und als koloniebildende Einheiten (KBE) quantifiziert. Da die Nachweisgrenze bei diesem Verfahren bei einem einzigen Organismus liegt, ist sie direkt vom untersuchten Wasservolumen abhängig. Der Nachweis von Protozoen erfolgte nicht anhand der Protozoen selbst, sondern der von ihnen produzierten Dauerformen (Kryptosporidien-Oozysten bzw. Giardien-Zysten); diese wurden mittels Fluoreszenzmikroskopie quantifiziert. Aufgrund der zu erwartenden geringen Gehalte wurden entsprechend grosse Wasservolumina untersucht. Für den Nachweis humanpathogener Viren kamen molekularbiologische Verfahren zum Einsatz (PCR), d. h. es wurden

die molekularen Bestandteile der entsprechenden Viren qualitativ bestimmt, jedoch keine intakten oder infektiösen Viren analysiert.

### Statistik – Maximalwert pro Messstelle

Die statistischen Auswertungen basieren jeweils auf den maximalen Gehalten an Mikroorganismen pro Parameter und Messstelle.

## 16.3 Zustand

### Fäkale Mikroorganismen weit verbreitet

Insgesamt waren 42 der 59 untersuchten Messstellen vom Auftreten fäkaler Mikroorganismen (Indikatorbakterien, pathogene Bakterien, Protozoen, Viren) betroffen. Einzelne Parameter fäkalen Ursprungs wurden an bis zu 26 Messstellen nachgewiesen (Tab. 16.2).

**Indikatorbakterien insgesamt häufig**

Indikatorbakterien wurden an 24 der 59 untersuchten Messstellen nachgewiesen. Dabei traten in den 1-l-Proben dieser Messstellen *E. coli* auf, welche somit den häufigsten Indikator für Bakterien fäkalen Ursprungs darstellen (Tab. 16.2, Abb. 16.2). In 100-ml-Proben kamen *E. coli* seltener vor. Als weitere Indikatorbakterien wurden an 10 dieser Messstellen Enterokokken und an einzelnen Messstellen *C. perfringens* festgestellt.

**Pathogene Bakterien deutlich seltener**

Im Gegensatz zu den Indikatorbakterien wurden pathogene Bakterien nur selten nachgewiesen (Tab. 16.2). Vereinzelt wurden die Organismen Verotoxinbildende *E. coli* (VTEC) und *Pseudomonas aeruginosa* detektiert, während *Campylobacter* spp. und *Salmonella* spp. in keiner Probe auftraten.

Tabelle 16.2

**Mikroorganismen im Grundwasser (2009/2010)**

Grundlage: Auftreten bzw. Maximalwert der Gehalte der einzelnen Parameter pro NAQUA-Messstelle.

| Parameter                             | Messstellen [Anzahl] |               |              | Gehalt an Mikroorganismen |                       |
|---------------------------------------|----------------------|---------------|--------------|---------------------------|-----------------------|
|                                       | beprobt              | ohne Nachweis | mit Nachweis | > 10 000 Zellen/ml        | > 100 000 Zellen/ml   |
| <b>Bakterien</b>                      |                      |               |              |                           |                       |
| Gesamtzellzahl                        | 59                   | –             | 59           | 33                        | 8                     |
| AMK                                   | 59                   | 5             | 54           | 29                        | 9                     |
| – Indikatorbakterien                  |                      |               |              | > 10 KBE/l                | > 150 KBE/l           |
| <i>C. perfringens</i>                 | 59                   | 55            | 4            | –                         | –                     |
| <i>E. coli</i>                        | 59                   | 35            | 24           | 14                        | 6                     |
| Enterokokken                          | 59                   | 49            | 10           | 10                        | 6                     |
| Indikatorbakterien, total             | 59                   | 35            | 24           | 14                        | 6                     |
| – Pathogene Bakterien                 |                      |               |              | > 10 KBE/l                | > 150 KBE/l           |
| <i>Campylobacter</i> spp.             | 59                   | 59            | –            | –                         | –                     |
| <i>P. aeruginosa</i>                  | 59                   | 54            | 5            | –                         | –                     |
| <i>Salmonella</i> spp.                | 59                   | 59            | –            | –                         | –                     |
| VTEC                                  | 59                   | 58            | 1            |                           | nicht quantifizierbar |
| Pathogene Bakterien, total            | 59                   | 53            | 6            |                           |                       |
| <b>Viren</b>                          |                      |               |              |                           |                       |
| Adenoviren                            | 59                   | 34            | 25           |                           | nicht quantifizierbar |
| Enteroviren                           | 59                   | 33            | 26           |                           | nicht quantifizierbar |
| Noroviren                             | 59                   | 44            | 15           |                           | nicht quantifizierbar |
| Rotaviren                             | 59                   | 55            | 4            |                           | nicht quantifizierbar |
| Viren, total                          | 59                   | 21            | 38           |                           | nicht quantifizierbar |
| <b>Protozoen</b>                      |                      |               |              |                           | > 10 (Oo)Zysten/20l   |
| <i>Cryptosporidium</i> spp.           | 59                   | 53            | 6            |                           | –                     |
| <i>Giardia</i> spp.                   | 59                   | 56            | 3            |                           | –                     |
| Protozoen, total                      | 59                   | 52            | 7            |                           | –                     |
| <b>Fäkale Mikroorganismen*, total</b> | <b>59</b>            | <b>17</b>     | <b>42</b>    |                           |                       |

KBE Koloniebildende Einheiten

(Oo)Zyste Dauerformen der Kryptosporidien bzw. Giardien

\* Indikatorbakterien, pathogene Bakterien, Viren, Protozoen

**Gesamtzellzahl und AMK**

Jede Probe enthielt – unabhängig vom Auftreten fäkaler Bakterien – eine grosse Anzahl an bakteriellen Zellen. Die Gesamtzellzahl erstreckte sich über drei Grössenordnungen von mehreren Tausend Zellen bis zu mehr als 1 Million Zellen pro ml (Abb. 16.1). In den Proben mit Fäkalbakterien machten diese insgesamt nur etwa ein 100 000stel des gesamten natürlichen Bakteriengehalts aus. Aerobe mesophile Keime (AMK), die sowohl natürlicherweise im Untergrund vorkommen als auch infolge fäkaler Verunreinigung in erhöhter Anzahl auftreten können, wurden an fast allen Messstellen nachgewiesen (Tab. 16.2).

**Virenbestandteile häufig nachgewiesen**

Von allen 4 analysierten Virentypen wurden molekulare Bestandteile im Grundwasser nachgewiesen, am häufigsten von Adenoviren und Enteroviren. Insgesamt erfolgte an 38 der 59 Messstellen der Nachweis von Virenbestandteilen (Tab. 16.2, Abb. 16.3).

Abbildung 16.1

**Gesamtzellzahl, AMK, E. coli und Enterokokken im Grundwasser (2009/2010)**

Maximalwerte pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010. E. coli > 150 KBE/l sind dargestellt als 150 KBE/l.

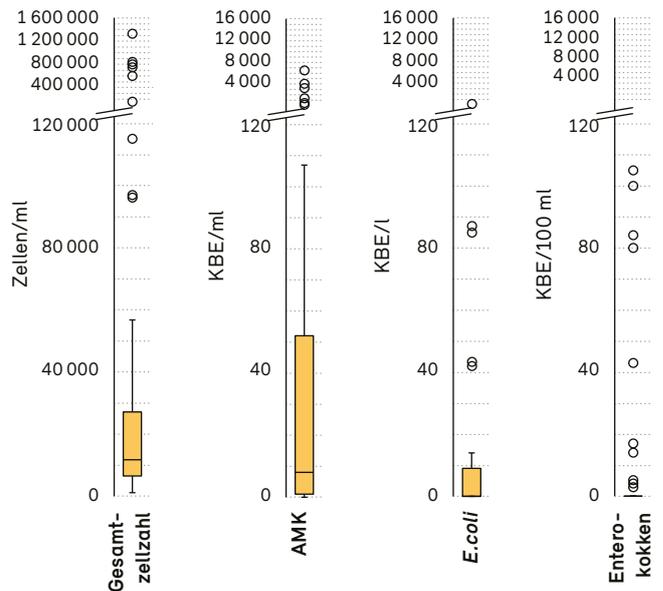


Abbildung 16.2

**Bakterien im Grundwasser (2009/2010) sowie Grundwasserleitertyp**

Auftreten bzw. Maximalwert pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010.

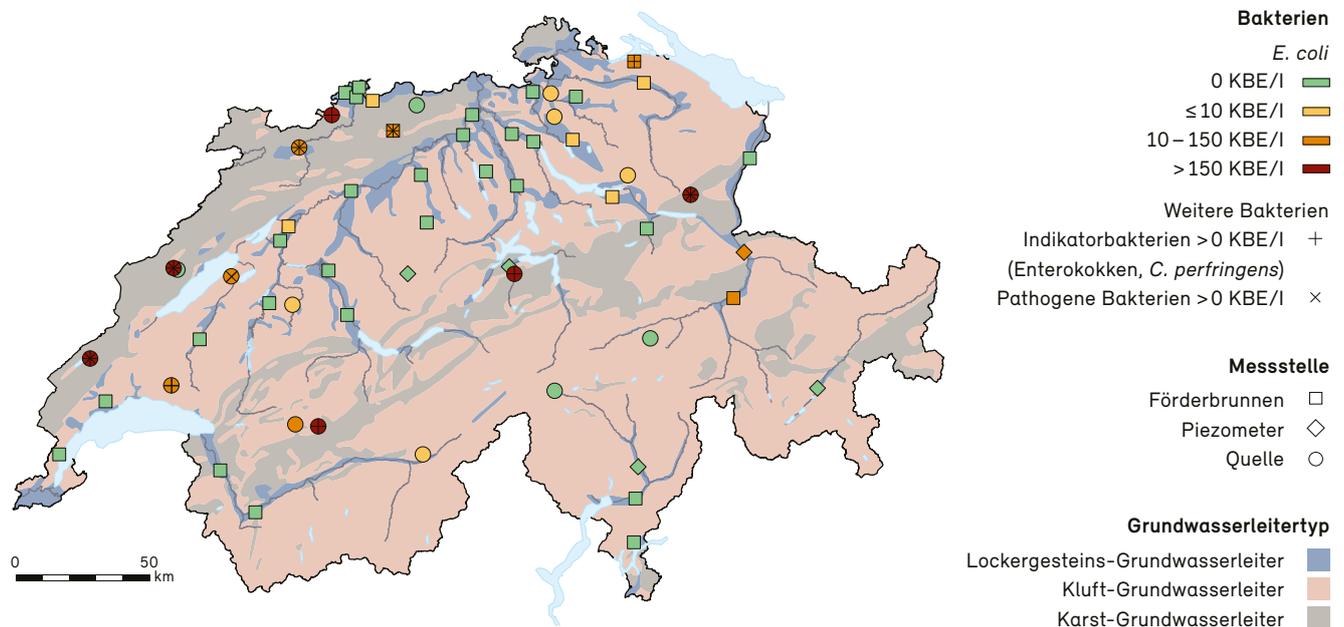


Abbildung 16.3

**Viren im Grundwasser (2009/2010) sowie Grundwasserleitertyp**

Auftreten pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010.

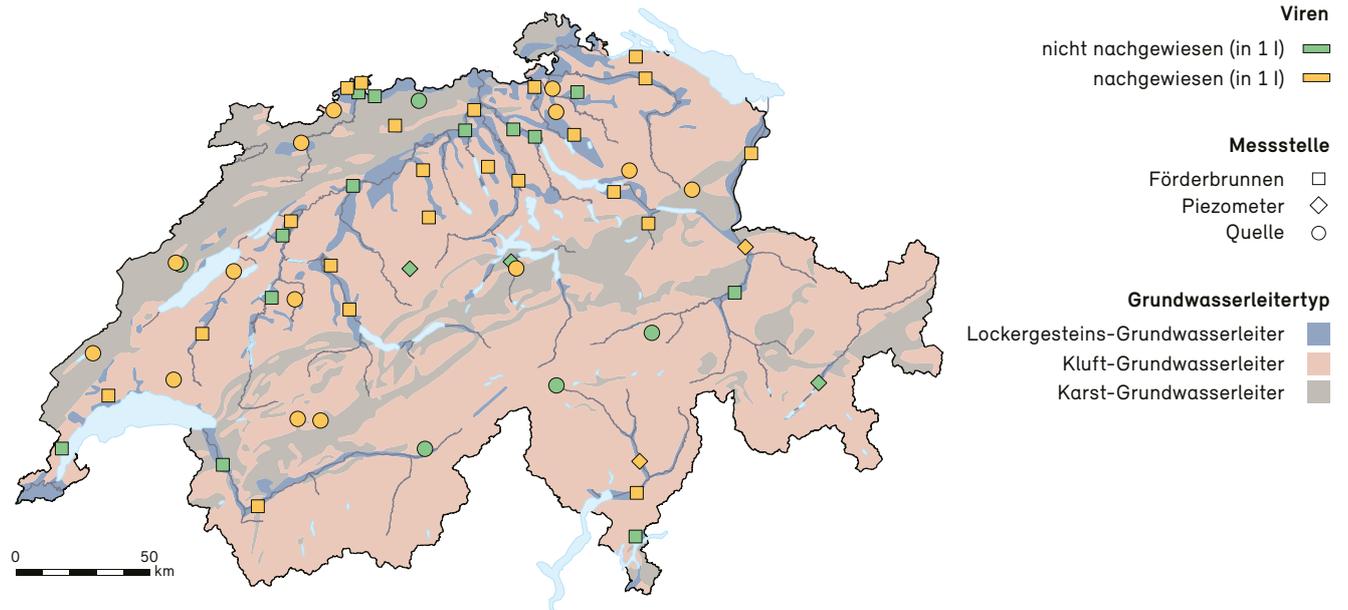
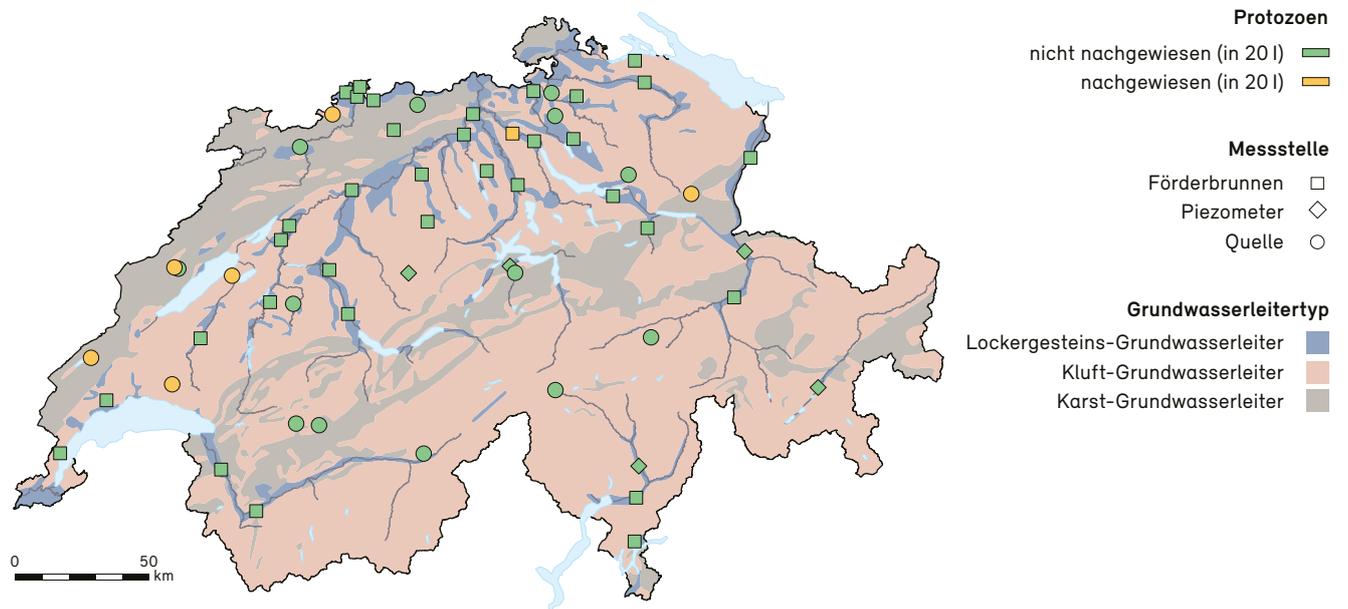


Abbildung 16.4

**Protozoen im Grundwasser (2009/2010) sowie Grundwasserleitertyp**

Auftreten pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010.



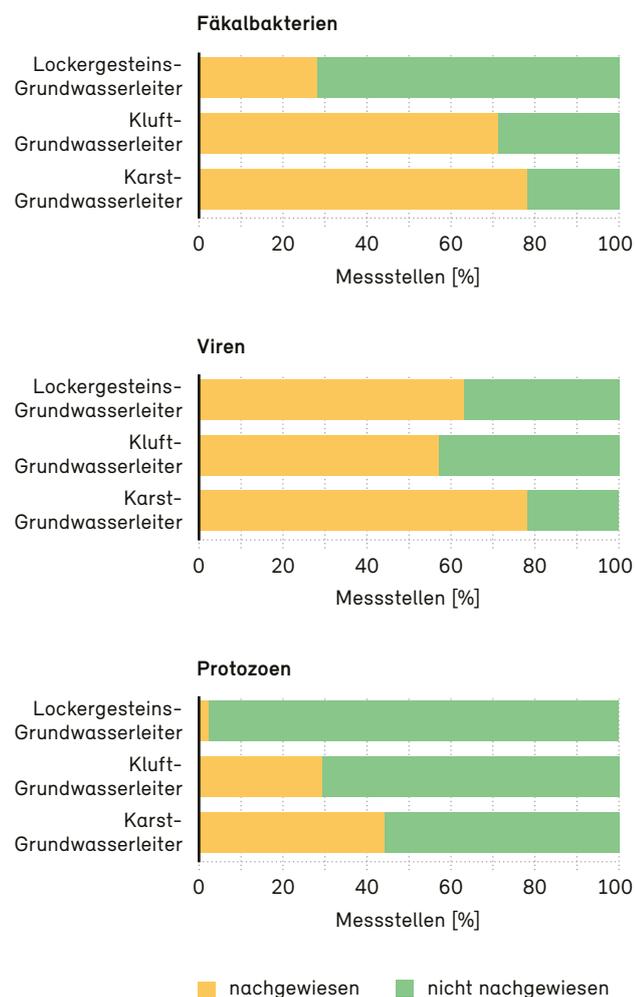
### Protozoen eher selten

Protozoen wurden im Vergleich zu Bakterien und Virenbestandteilen am seltensten nachgewiesen (Tab. 16.2, Abb. 16.4). *Cryptosporidium* spp. wurde an 6 und *Giardia* spp. an 3 der 59 Messstellen festgestellt.

Abbildung 16.5

#### Fäkalbakterien, Viren und Protozoen im Grundwasser (2009/2010) in Relation zum Grundwasserleitertyp

Grundlage: Auftreten pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010. Messstellen je Grundwasserleitertyp: Lockergesteins-Grundwasserleiter: 43 Mst.; Kluft-Grundwasserleiter: 7 Mst.; Karst-Grundwasserleiter: 9 Mst.; Fäkalbakterien: Indikatorbakterien und pathogene Bakterien.



### Fäkale Mikroorganismen vor allem im Karst

Alle 3 Gruppen von Mikroorganismen traten am häufigsten an Messstellen in Karst-Grundwasserleitern auf (Abb. 16.2 bis Abb. 16.5). Fäkalbakterien und Viren wurden dort an jeweils 7, Protozoen an 4 der 9 beprobten Messstellen nachgewiesen. Auch waren die jeweils höchste Gesamtzellzahl sowie die höchsten Gehalte einzelner Bakterienarten an Messstellen in Karst-Grundwasserleitern zu verzeichnen. Fäkalbakterien und Protozoen traten an Messstellen in Lockergesteins-Grundwasserleitern am seltensten auf. Bei den Viren erwiesen sich die Unterschiede zwischen den Grundwasserleitertypen als nicht sehr ausgeprägt.

### Deutliche Variabilität

An den meisten Messstellen mit positiven Befunden ist eine deutliche Variabilität des Auftretens der einzelnen mikrobiologischen Parameter zu beobachten. So erfolgte nur in Einzelfällen ein bei allen Probenahmen durchgehender Nachweis der untersuchten fäkalen Mikroorganismen. Bei den Indikatorbakterien wurden *E. coli* nicht nur am häufigsten, sondern auch an gut der Hälfte der Messstellen mit positivem Befund mehrmals nachgewiesen (Abb. 16.6). Enterokokken und *C. perfringens* traten zwar insgesamt seltener, aber ebenfalls an der Mehrzahl der betroffenen Messstellen mehrfach auf. Ähnliches gilt für die Adenoviren und für *Cryptosporidium* spp. bei den Protozoen. Bei den restlichen Parametern fäkalen Ursprungs handelte es sich an den jeweiligen Messstellen überwiegend um Einzelnachweise.

## 16.4 Analyse

### 16.4.1 Überblick

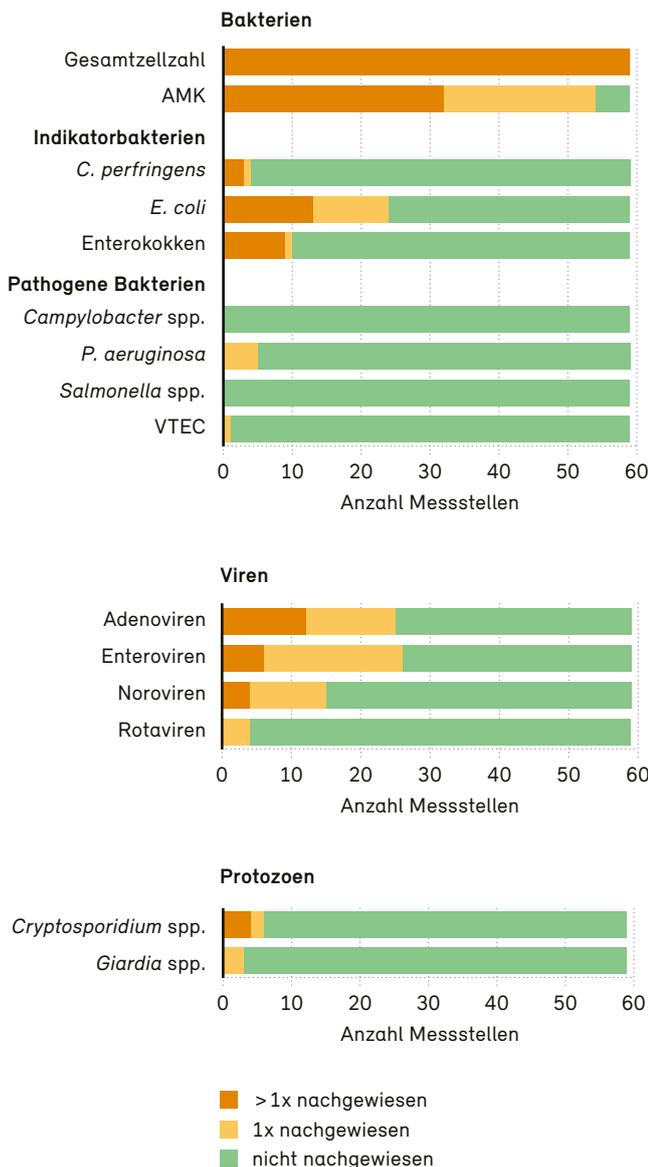
#### Fäkale Mikroorganismen weit verbreitet

Insgesamt traten fäkale Mikroorganismen vergleichsweise häufig auf, und zwar an gut zwei Dritteln der für die Pilotstudie berücksichtigten 50 Messstellen des Moduls TREND und der spezifisch ausgewählten 9 Messstellen des Moduls SPEZ. Auch wenn die Ergebnisse keine landesweit statistisch belastbaren Aussagen zulassen, verdeutlichen sie dennoch die Relevanz dieser Mikroorganismen für die Grundwasser-Qualität. Bei der Trinkwassernutzung stellen mikrobiologische Belastungen die

häufigste Beeinträchtigung der Rohwasserqualität dar. So sind laut BAG etwa 80% der Beanstandungen von Trinkwasser auf dessen mikrobiologische Beschaffenheit zurückzuführen, was etwa 6% der durchgeführten Kontrollen entspricht (BAG 2012).

Abbildung 16.6

**Mikroorganismen im Grundwasser (2009/2010) und deren Variabilität**  
 Grundlage: Anzahl Nachweise pro NAQUA-Messstelle. 50 Messstellen des Moduls TREND sowie 9 ausgewählte Messstellen des Moduls SPEZ. Pilotstudie 2009/2010.



**Bedeutung Viren und Protozoen unklar**

Virenbestandteile wurden in allen Grundwasserleitetypen relativ oft nachgewiesen. Ob dies die Folge der vergleichsweise hohen Persistenz in der Umwelt ist oder ob es sich lediglich um nicht mehr aktive Bestandteile dieser Mikroorganismen handelt, lässt sich auf Basis der Ergebnisse der Pilotstudie nicht beurteilen. Die molekulare PCR-basierte Analytik liefert die rein qualitative Information, ob in einer Wasserprobe genetisches Material des jeweiligen Virentyps vorhanden ist. Eine Aussage zur Menge oder auch zur Vermehrungsfähigkeit (Aktivität) bzw. Infektiosität – und damit der pathogenen Wirkung der Viren – ist mit dieser Methode nicht möglich. Ähnliches gilt für die Dauerformen der Protozoen, deren Auszählung keine Überprüfung der Infektiosität oder Vitalität der Organismen erlaubt.

**Krankheitserreger durch Indikatorbakterien angezeigt**

In allen Proben, in denen pathogene Bakterien nachgewiesen wurden, liessen sich gleichzeitig auch Indikatorbakterien feststellen. Gleiches gilt – bis auf eine Ausnahme (1 Giardien-Zyste) – auch für die Protozoen. Damit erwiesen sich die Indikatorbakterien und insbesondere *E. coli* als geeignet, Belastungen mit fäkalen Mikroorganismen im Grundwasser anzuzeigen. Generell signalisiert der Nachweis von Indikatorbakterien, dass auch pathogene Mikroorganismen im Grundwasser vorhanden sein könnten, da Indikatorbakterien und allfällige Krankheitserreger über den gleichen Pfad ins Grundwasser gelangen. Im Gegensatz zu pathogenen Bakterien und Protozoen traten Viren bzw. Virenbestandteile häufig unabhängig von Indikatorbakterien auf, insbesondere in Lockergesteins-Grundwasserleitern.

**Mikrobiologisch gute Grundwasser-Qualität in Lockergesteins-Grundwasserleitern**

An der Mehrzahl der Messstellen in den für die Trinkwasserversorgung besonders bedeutenden Lockergesteins-Grundwasserleitern traten keine Fäkalbakterien auf. Pathogene Bakterien und Protozoen wurden dort ebenfalls nur sporadisch nachgewiesen. Das relativ seltene Auftreten von Fäkalbakterien belegt die generell gute mikrobiologische Qualität dieser Grundwasservorkommen. Dies ist sicherlich auch auf entsprechende Massnahmen zum Schutz des Grundwassers an denje-

nigen Messstellen zurückzuführen, die für die Trinkwassergewinnung genutzt werden. In heterogenen Kluft- und v. a. Karst-Grundwasserleitern wurden dagegen erhöhte, jedoch für diese Grundwasserleitertypen zu erwartende Gehalte an Mikroorganismen festgestellt (Sinreich et al. 2014).

#### 16.4.2 Einflussfaktoren

##### Grundwasserleitertyp als dominierender Faktor

Die Art und Häufigkeit des Auftretens fäkaler Mikroorganismen an den einzelnen Messstellen kann mit dem Grundwasserleitertyp und/oder der Bodennutzung im Einzugsgebiet in Verbindung stehen. Für die verschiedenen Mikroorganismen – mit Ausnahme der Viren – hat sich der Grundwasserleitertyp erwartungsgemäss als dominierender Faktor für das Auftreten und auch die Gehalte an Mikroorganismen erwiesen (Abb. 16.5). Dies ist die Folge der generell unterschiedlichen Anfälligkeit (Vulnerabilität) der jeweiligen Grundwasserleitertypen gegenüber dem Eintrag und dem Transport von Mikroorganismen.

##### Karst-Grundwasserleiter hoch vulnerabel

Karst-Grundwasserleiter sind aufgrund ihrer Heterogenität und einer oft nur dünnen Bodenschicht naturgemäss anfälliger gegenüber dem Eintrag von Schadstoffen und Mikroorganismen als Lockergesteins- oder die meisten Kluft-Grundwasserleiter. An bevorzugten Infiltrationsstellen (u. a. Schlucklöcher) können Mikroorganismen dort auch bei räumlich begrenzter Ausbringung von Fäkalstoffen schnell ins Grundwasser gelangen. Die Vulnerabilität erhöht sich zusätzlich bei Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze. Im Fall einer mikrobiologischen Verunreinigung kann dann oft schon eine kleine Eintragsfläche – also auch eine Nebenbodennutzung im Einzugsgebiet – zu einer Belastung des Grundwassers führen.

##### Hauptbodennutzung von untergeordneter Bedeutung

Vor allem in Einzugsgebieten mit Viehhaltung ist generell mit einem Eintrag von fäkalen Mikroorganismen in den Untergrund zu rechnen (Gülle, Weidegang). So traten an einer relativ hohen Anzahl von Messstellen, deren Einzugsgebiete durch die Hauptbodennutzungen «Gras- & Viehwirtschaft» sowie «Ackerbau» geprägt sind, fäkale Mikroorganismen im Grundwasser auf. Gleiches gilt

allerdings auch für Messstellen im Wald, wo in der Regel nicht mit einem übermässigen Eintrag von Mikroorganismen zu rechnen ist. Bewaldete Einzugsgebiete sind jedoch typisch für viele Karstgebiete, sodass auch die untersuchten Messstellen in vulnerablen Karst-Grundwasserleitern überdurchschnittlich häufig die Hauptbodennutzung «Wald» aufweisen, allerdings stets in Verbindung mit einer landwirtschaftlichen Nebenbodennutzung.

##### Hohe Variabilität der Befunde

Mikrobiologische Befunde hängen – deutlich mehr als bei im Wasser gelösten und persistenten Schadstoffen – von den meteorologisch-hydrologischen Bedingungen und Nutzungsaktivitäten unmittelbar vor der Probenahme ab. Dies gilt vor allem für schnell reagierende, heterogene Grundwasserleiter, also solche, deren Wasserstände bzw. Quellabflüsse unmittelbar auf Niederschlagsereignisse reagieren. Dadurch können die mikrobiologischen Befunde innerhalb kurzer Zeitintervalle stark variieren. So waren insbesondere an Messstellen in Karst-Grundwasserleitern die Gehalte in der Regel nach Niederschlägen bzw. während verstärkter Grundwasserneubildung am höchsten.

##### Virenbestandteile auch in Lockergesteins-Grundwasserleitern

Bestandteile der untersuchten Viren, die alle humanpathogen sind und damit aus menschlichen Ausscheidungen stammen, traten auffallend häufig an Messstellen auf, welche signifikant durch Flusswasser gespeist werden. Dies deutet darauf hin, dass Virenbestandteile auch über die Siedlungsentwässerung und Fliessgewässer ins Grundwasser gelangen (Kap. 13). Zusätzlich kommt für humanpathogene Viren das Ausbringen von häuslichen Abwässern mit der Gülle infrage. Gemäss Gewässerschutzgesetz (GSchG) ist dies erlaubt für landwirtschaftliche Betriebe mit erheblichem Rindvieh- und Schweinebestand im Bereich der öffentlichen Kanalisation sowie ausserhalb des Bereichs der öffentlichen Kanalisation (Art. 12 Abs. 4, Art. 13 Abs. 1 GSchG). Insbesondere in Karstgebieten könnte dies von Bedeutung sein.

### 16.4.3 Monitoring

#### Keine Übernahme ins Langzeitmonitoring

Aufgrund der hohen Variabilität der Befunde stellt die Probenahme auf mikrobiologische Parameter eine Momentaufnahme der Belastungssituation dar. Mit den bei NAQUA üblichen 1 bis 4 Proben pro Jahr liessen sich die tatsächliche Belastung und damit auch die langfristige Entwicklung nur ungenügend erfassen. Eine Übernahme mikrobiologischer Parameter in das Langzeitmonitoring von NAQUA ist daher derzeit nicht vorgesehen. Zu gegebener Zeit können zur Überprüfung der Ergebnisse der Pilotstudie sowie im Falle neuer Fragestellungen weitere Untersuchungen erfolgen.

#### Infektiosität von Viren und Protozoen abklären

Noch ist die Bedeutung der beobachteten Virenbestandteile unklar, zumal bisher keine infektiösen Viren im Grundwasser der Schweiz nachgewiesen wurden. Angesichts der wenigen auf Trinkwasser zurückzuführenden Krankheitsfälle scheint es naheliegend, dass die wesentlich kleineren und resistenteren Viren ebenso wie Bakterien und Protozoen in Lockergesteins-Grundwasserleitern in ausreichendem Masse zurückgehalten bzw. eliminiert werden. Dennoch sollten weitere Abklärungen durchgeführt werden, sobald entsprechende Fortschritte bei den Analysemethoden zu verzeichnen sind.

#### Zusätzliche Identifizierung fäkaler Verunreinigungen

An 8 ausgewählten Messstellen des Moduls TREND wurden im Rahmen der Pilotstudie «Microbial Source Tracking» 2012/2013 zusätzliche Parameter als Indikatoren fäkaler Verunreinigungen getestet (Diston et al. 2015). Dabei wurden u. a. molekulare Marker analysiert, welche spezifisch das Auftreten humaner bzw. tierischer Fäkalstoffe anzeigen. Parameter menschlicher Fäkalquellen wurden an allen 8 Messstellen festgestellt und bestätigen somit eine mögliche Fäkalquelle auch für humanpathogene Virenbestandteile im Grundwasser. Daneben konnten in Proben von 7 der 8 Messstellen aktive Viren kultiviert werden, welche auf Fäkalbakterien als Wirtsmittel spezialisiert sind (Bakteriophagen), selbst aber nicht humanpathogen sind.

#### Referenzzustand Grundwasserbiozönose

Zur Charakterisierung der Grundwasserbiozönose können grundsätzlich die im Rahmen der Pilotstudie erhobenen Parameter Gesamtzellzahl, AMK und *E. coli* herangezogen werden. Allerdings müssen die Gehalte dieser Mikroorganismen im Zusammenhang mit einem standortspezifischen Referenzzustand der natürlichen Grundwasserbiozönose betrachtet werden, welcher derzeit noch nicht definiert ist. Gleiches gilt für die Grundwasserfauna, für die in der Pilotstudie «Grundwasserfauna» 2013/2014 nur einzelne Messstellen in ausgewählten Regionen untersucht wurden (BAFU 2015).

# 17 Fazit: Beurteilung und Handlungsbedarf

## Gute Grundwasser-Qualität nicht mehr selbstverständlich

Der Zustand des Grundwassers in der Schweiz erlaubt es immer noch, aus Grundwasservorkommen einwandfreies Trinkwasser in genügender Menge zu gewinnen. Dies ist allerdings nicht mehr selbstverständlich: Unsere wichtigste Trinkwasserressource gerät zunehmend unter Druck. So verdeutlicht der vorliegende Bericht der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, dass an zahlreichen Messstellen Verunreinigungen des Grundwassers festzustellen sind. Im Sinne der Vorsorge müssen deshalb bewährte Massnahmen zur Reduktion der Verunreinigungen fortgesetzt bzw. ausgebaut werden. Um die Grundwasservorkommen konsequent zu schützen, muss die landwirtschaftliche Bewirtschaftung regional so angepasst werden, dass das Grundwasser nicht verunreinigt wird. Zudem müssen rechtlich verbindliche und richtig dimensionierte Grundwasserschutzzonen ausgeschieden werden, was bei etwa 40 % der Trinkwasserfassungen in der Schweiz noch nicht der Fall ist (BAFU 2018d). In etlichen der korrekt ausgeschiedenen Schutz-zonen kommen darüber hinaus erhebliche Nutzungskonflikte vor, die Risiken für die Trinkwassernutzung mit sich bringen.

### 17.1 Beurteilung Grundwasserzustand

#### Unnatürlicher Zustand – Nitrat-Belastung

Am stärksten belastet ist das Grundwasser durch Nitrat: Natürlicherweise wäre die Nitrat-Konzentration im Grundwasser im tiefen mg/l-Bereich. Im Mittelland weisen jedoch 80 % der Messstellen eine Konzentration von mehr als 10 mg/l auf. Die Hauptursache liegt in der landwirtschaftlichen Nutzung, aus der jährlich über 150 000 t Nitrat in die Gewässer gelangen (Heldstab et al. 2010).

#### Numerische Anforderungen nicht überall eingehalten

Beurteilt man die Grundwasser-Qualität gemäss den numerischen Anforderungen der Gewässerschutzverordnung (GSchV), zeigt sich folgendes Bild: Am häufigsten

wird die numerische Anforderung durch Nitrat überschritten (15 bis 20 % der Messstellen mit Konzentrationen > 25 mg/l). Vereinzelt ist dies aber auch bei weiteren Substanzen der Fall, wie z. B. bei flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (FHKW, 4 % der Messstellen mit Konzentrationen > 1 µg/l) oder bei Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen (PSM, 2 % der Messstellen mit Konzentrationen > 0,1 µg/l). Nitrat und PSM stammen vorwiegend aus der Landwirtschaft, FHKW aus Altlasten.

#### Fremdstoffe verbreitet nachgewiesen

Generell treten Rückstände künstlicher und zum Teil langlebiger Substanzen an mehr als der Hälfte der Messstellen im Grundwasser auf. Auch wenn dabei die numerischen Anforderungen grösstenteils eingehalten werden, widersprechen diese Rückstände dem Ziel der GSchV, wonach das Grundwasser keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten soll. Insgesamt werden rund 100 verschiedene solcher Fremdstoffe nachgewiesen, die vor allem aus der Landwirtschaft und der Siedlungsentwässerung ins Grundwasser gelangen.

Abwasser kann via Flusswasser oder undichte Abwasserleitungen ins Grundwasser infiltrieren. Auf diesem Weg gelangen in Spurenkonzentrationen z. B. Arzneimittel, Korrosionsschutzmittel, künstliche Süsstoffe, perfluorierte Chemikalien (PFC), oder auch Mikroorganismen, aus dem Siedlungsgebiet ins Grundwasser.

Abbauprodukte von Pflanzenschutzmitteln (PSM), sogenannte PSM-Metaboliten, werden an 50 bis 60 % aller Messstellen nachgewiesen. Die Metaboliten stammen grossmehrerheitlich aus der Landwirtschaft. In den höchsten Konzentrationen treten die Metaboliten der Herbizide Chloridazon und Metolachlor auf. Chloridazon wird nur beim Anbau von Rändern, Zucker- und Futterrüben eingesetzt, Metolachlor hauptsächlich beim Maisanbau. Für die meisten PSM-Metaboliten enthält die GSchV keine numerischen Anforderungen.

### Spurenelemente

Die NAQUA-Erhebungen weisen manchenorts leicht erhöhte Werte von Spurenelementen nach, so z. B. der Schwermetalle Kupfer und Zink. Messwerte von besonders problematischen Spurenelementen wie Arsen, Antimon, Blei, Cadmium oder Uran deuten hingegen nicht darauf hin, dass menschliche Tätigkeiten zu erhöhten Konzentrationen dieser Elemente im Grundwasser führen. Spurenelemente gelangen in geringen Konzentrationen natürlicherweise ins Grundwasser, zusätzlich aber auch aus vielen anthropogenen Quellen. Zu letzteren gehören beispielsweise Strassen- und Gleisabwasser, die Siedlungsentwässerung, Sickerwasser, häusliches Abwasser oder Einträge aus der Landwirtschaft. Eine eindeutige Zuordnung der Befunde zu einzelnen Quellen ist anhand der vorliegenden Daten und der geringen Konzentrationen nicht möglich.

### Höchstwerte für Trinkwasser selten überschritten

Nur wenige Grundwassermessstellen halten die Höchstwerte für Trinkwasser<sup>1</sup>, die meist höher angesetzt sind als die numerischen Anforderungen der GSchV, nicht ein. Das unterstreicht, dass die Qualität des Grundwassers für die Trinkwassernutzung an den meisten Orten ausreichend ist, sodass Grundwasser ohne aufwendige Aufarbeitung abgegeben werden kann. Überschreitungen von Höchstwerten der TBDV werden nur für Nitrat (3 % der Messstellen) und für PSM-Wirkstoffe (2 %) bzw. für gewisse PSM-Metaboliten (1 %) festgestellt.

## 17.2 Handlungsbedarf und Massnahmen

Vorsorgliche Massnahmen sind zum Schutz des Grundwassers besonders wichtig, weil es oft viele Jahre bis Jahrzehnte im Untergrund verweilt, bevor es an einer Grundwasserfassung gefördert wird. Ist das Grundwasser einmal mit langlebigen Stoffen verunreinigt, dauert es meist sehr lange, bis eine Reduktion der Stoffeinträge auch effektiv zu einer Verbesserung der Qualität des geförderten Grundwassers führt. Vor dem Hintergrund

<sup>1</sup> Gemäss Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV) für Trinkwasser. Laut Anhang 2 Ziffer 22 Absatz 1 GSchV muss die Wasserqualität von Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, so beschaffen sein, dass das Wasser nach Anwendung einfacher Aufbereitungsverfahren die Anforderungen der Lebensmittelgesetzgebung, insbesondere der TBDV, einhält.

des Siedlungs- und Infrastrukturwachstums muss das Grundwasser generell konsequenter geschützt werden. Gefordert sind dabei insbesondere die für den Vollzug des Gewässerschutz- und Raumplanungsrechts zuständigen Behörden in Kantonen und Gemeinden.

### Nitrat-Eintrag reduzieren

Gemessen an den numerischen Anforderungen der GSchV sind die hohen Nitrat-Konzentrationen das vordringlichste Problem hinsichtlich der Grundwasser-Qualität. Seit Beginn der NAQUA-Erhebungen 2002 haben sich die Nitrat-Konzentrationen kaum verändert, abgesehen von primär meteorologisch bedingten Schwankungen. Notwendig sind hier insbesondere Massnahmen in der Landwirtschaft, da diese direkt 75 % der Nitrat-Emissionen ins Grundwasser verursacht (Heldstab et al. 2010) und weil die numerische Anforderung der GSchV vor allem in Ackerbaugebieten überschritten wird. Indirekt trägt die Landwirtschaft über die hohen Ammoniakemissionen zusätzlich zum Eintrag von Nitrat ins Grundwasser bei: Ammoniak verteilt sich via Atmosphäre über die ganze Schweiz und auf die Böden, wo es zu Nitrat umgewandelt und zum Teil ins Grundwasser ausgewaschen wird.

### Lehren aus Sanierungsprojekten – die landwirtschaftliche Bewirtschaftung optimieren

Heute werden in rund 30 Projekten im Zuströmbereich von Grundwasserfassungen Projekte nach Artikel 62a GSchG zur Senkung der Nitrat-Konzentration umgesetzt. Hauptziel dieser Projekte ist, die Auswaschung von Nitrat v. a. aus dem Acker- und Gemüsebau ins Grundwasser soweit zu reduzieren, dass die numerische Anforderung für Nitrat im genutzten Grundwasser von 25 mg/l eingehalten werden kann. Diese Sanierungsprojekte erreichen insgesamt nur einen relativ kleinen Teil der betroffenen Grundwasservorkommen. Um einen übermässigen Eintrag von Nitrat in das Grundwasser generell zu verhindern, müssten die in den Projekten erarbeiteten erfolgreichen Massnahmen in allen betroffenen Gebieten dauerhaft implementiert und mittels der Instrumente der Agrarpolitik in den Zuströmbereichen der Trinkwasserfassungen schweizweit umgesetzt werden.

Als Voraussetzung dafür müssten die Kantone bei den betroffenen Grundwasserfassungen die Zuströmbereiche ausscheiden. In diesen müsste die Landwirtschaft z. B.

den Anteil an Ackerkulturen auf das jeweils verträgliche Mass reduzieren und den Anbau von Nitrat-Risikokulturen wie Gemüse, Tabak oder Kartoffeln gezielt einschränken. Unterstützend wirken können eine optimierte Fruchtfolge, eine verringerte Stickstoffdüngung, die Verpflichtung zu einer lückenlosen Bodenbedeckung im Winter, ein Umbruchverbot bis in den Frühling sowie weitere Massnahmen. Um eine solche grundwasserverträgliche, auf den Standort angepasste landwirtschaftliche Nutzung zu fördern, sollte auch der Ökologische Leistungsnachweis (ÖLN) im Hinblick auf eine regional angepasste Ausgestaltung weiterentwickelt werden. Eine generelle und deutliche Reduktion der Ammoniakemissionen der Schweizer Landwirtschaft und eine Reduktion der ausgebrachten Düngermenge würden die Grundwasserbelastung zusätzlich reduzieren.

#### **Aktionsplan Pflanzenschutzmittel umsetzen**

Rückstände von PSM zählen zu den häufigsten Fremdstoffen im Grundwasser. Da sie hauptsächlich aus der Landwirtschaft ins Grundwasser gelangen, sind prioritär in diesem Bereich Massnahmen nötig. Mit dem «Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln» (AP PSM) sollen insbesondere die Einträge von PSM-Metaboliten ins Grundwasser deutlich vermindert werden (Bundesrat 2017). Eine besonders wichtige Massnahme zum Schutz des Grundwassers hat der Bund bereits initiiert: Seit Anfang 2018 unterstützt er mittels Ressourceneffizienzbeiträgen einen Zuckerrübenanbau, der keine oder nur reduziert Herbizide einsetzt. Dabei müssen die Landwirte auf den PSM-Wirkstoff Chloridazon – dessen Metaboliten im Grundwasser am verbreitetsten in hohen Konzentration vorkommen – vollständig verzichten. Dass ein umfangreicher Verzicht auf Chloridazon möglich ist, zeigen verschiedene umgesetzte Programme, z. B. im Berner Seeland. In der EU ist die Zulassung von Chloridazon Ende 2018 ausgelaufen und auch in der Schweiz wird der Wirkstoff reevaluiert. Eine Aufhebung der Zulassung von Chloridazon würde mittel- bis langfristig die Belastung des Grundwassers mit PSM-Metaboliten deutlich verringern. Zudem ist vorgesehen, den Anbau ohne oder nur mit geringem Einsatz von Herbiziden auch bei anderen Kulturen ab 2019 durch Direktzahlungen zu fördern. Durch die konsequente Umsetzung weiterer Massnahmen des AP PSM – z. B. indem die gute fachliche Praxis gefördert oder gewäs-

serrelevante Aspekte verstärkt kontrolliert werden – lässt sich das Grundwasser besser schützen. Schliesslich sollen zusätzliche Massnahmen gegen PSM-Verunreinigungen im Grundwasser im Rahmen des AP PSM priorisiert und weiterentwickelt werden. Nur wenn die Massnahmen schweizweit umgesetzt werden, kommt das Ziel des AP PSM, die Grundwasserbelastung mit PSM-Metaboliten bis 2027 deutlich zu reduzieren, in Reichweite.

#### **Elimination Mikroverunreinigungen in ARAs umsetzen**

Wenn gereinigtes Abwasser via Flusswasser ins Grundwasser infiltriert, können Fremdstoffe eingetragen werden. Um Spurenstoffe im Abwasser zu reduzieren, werden in den kommenden ca. 20 Jahren gezielt ausgewählte Abwasserreinigungsanlagen (ARAs) mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe aufgerüstet. Darunter fallen ARAs mit mindestens 8000 angeschlossenen Einwohnern, wenn ein Ausbau wegen der hydrogeologischen Verhältnisse zum Schutz des Grundwassers erforderlich ist. Mit fortschreitendem Ausbau der ARAs wird sich deshalb die Belastung mit Fremdstoffen, die via gereinigtes Abwasser und Flusswasser ins Grundwasser infiltrieren, an vielen Grundwasserfassungen verringern.

#### **FHKW – Altlastensanierung abschliessen**

Zusätzlicher Handlungsbedarf besteht bei Fremdstoffen, die aus alten Deponien, Unfall- und ehemaligen Betriebsstandorten in den Untergrund und ins Grundwasser gelangen. Als prioritäre Massnahme hat die Schweiz die Altlastensanierung in Angriff genommen. Dabei sind immer noch grosse Anstrengungen notwendig, um die anstehenden, teilweise sehr kostenintensiven Projekte erfolgreich meistern zu können. Dies betrifft vor allem die belasteten Standorte, aus denen FHKW ins Grundwasser gelangen. Die Behörden müssen die Sanierung vorantreiben, damit die Verunreinigung des Grundwassers mit Fremdstoffen aus belasteten Standorten in Zukunft weiter abnimmt. Gerade bei belasteten Standorten mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) sind die Sanierungen oft schwierig, so z. B. bei Tetrachlorethen, das für die höchsten Belastungen des Grundwassers mit Kohlenwasserstoffen verantwortlich ist. Da CKW rasch in die Tiefe migrieren und zudem häufig toxischere Abbauprodukte bilden, kommen zur Sanierung dieser Altlasten meist In-situ-Massnahmen zur Anwendung, die ihre Wirkung erst mit der Zeit entfalten. In vielen Fällen wird

daher die von belasteten Standorten ausgehende Verunreinigung des Grundwassers noch eine Weile andauern.

### **Sichere Trinkwasserversorgung gewährleisten**

Dass die Schweiz nur rund 7 % des theoretisch nachhaltig nutzbaren Grundwasserdargebots für die Trinkwasserversorgung nutzt, darf nicht zu Sorglosigkeit führen. Die übrigen 93 % stehen nämlich grösstenteils gar nicht mehr zur Verfügung, weil eine gefahrlose Trinkwassernutzung nicht gewährleistet werden kann oder weil deren Erschliessung mit unverhältnismässigen Kosten verbunden wäre. Die stete Zunahme des Flächenbedarfs für Siedlungen und Verkehrswege verringert zum einen die natürliche Schutzfunktion der Böden als Filter bei der Grundwasserneubildung. Eine verringerte Filterwirkung erhöht das Risiko, dass Krankheitserreger sowie Fremdstoffe in solchen Mengen in die Grundwasserfassungen gelangen, dass sie die Trinkwassernutzung gefährden. Zum andern führen die zunehmende Urbanisierung und die Intensivierung der Landwirtschaft dazu, dass lokale oder regionale Wasserversorger vermehrt Grundwasserfassungen aufheben müssen. Gründe dafür sind Nutzungskonflikte und damit einhergehende Risiken für die Trinkwassernutzung, namentlich, wenn Krankheitserreger sowie unerwünschte Stoffe in die Grundwasserfassungen gelangen können. Es wird zunehmend schwierig bis unmöglich, im Mittelland neue Fassungen zu erstellen, weil es an Flächen ohne erhebliche Nutzungskonflikte für die erforderlichen Schutzzonen mangelt.

### **Schutzzonen zur Sicherung der Trinkwasserressourcen**

Der zunehmende Druck auf die nutzbaren Grundwasservorkommen unterstreicht die Bedeutung von Grundwasserschutzzonen und -arealen. In diesen sind Aktivitäten, die das Grundwasser gefährden, verboten bzw. eingeschränkt. Handlungsbedarf besteht bei denjenigen Trinkwasserfassungen, die nicht über rechtlich konforme Schutzzonen verfügen, z.B. weil die Schutzzonen nur provisorisch festgelegt, zu klein oder gar nicht ausgedehnt sind. Korrekt ausgedehnte Schutzzonen und -areale ermöglichen es erst, die Gewässerschutzvorschriften konsequent zu vollziehen.

## **17.3 Ausblick Monitoring**

### **NAQUA weiterentwickeln**

Im Rahmen des Langzeitmonitorings der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA werden Bund und Kantone auch in Zukunft landesweite Daten zu Zustand und Entwicklung der Grundwasser-Quantität und -Qualität erheben, analysieren und publizieren. Anhand der Analysen von NAQUA können grundwasserrelevante Substanzen frühzeitig erkannt sowie Massnahmen zum Schutz der Grundwasserressourcen und zur Stärkung des Vollzugs entwickelt und evaluiert werden. Neue Erkenntnisse und Fragestellungen dienen gleichzeitig als Basis, das Monitoring kontinuierlich weiterzuentwickeln. Das BAFU wird in seiner federführenden Rolle die regelmässige Überprüfung und Anpassung der Parameter, der Messstellen und der Messfrequenz unter Einbezug der beteiligten Akteure gewährleisten.

### **Schwerpunkt Mikroverunreinigungen**

Regelmässige Pilotstudien werden das Langzeitmonitoring NAQUA in Bezug auf neue Herausforderungen, insbesondere bei den Spurenstoffen, auch in Zukunft ergänzen. Einer der Schwerpunkte bleibt dabei das Monitoring von PSM-Rückständen wegen der grossflächigen Anwendung von PSM insbesondere auf Landwirtschaftsflächen sowie der grossen und sich laufend ändernden Palette der eingesetzten Wirkstoffe. So untersucht eine aktuelle Pilotstudie das Grundwasser an ausgewählten Messstellen u. a. auf knapp 200 verschiedene PSM-Wirkstoffe und rund 1000 PSM-Metaboliten. Sie soll wichtige neue Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von Massnahmen zum Schutz des Grundwassers und das Langzeitmonitoring liefern. Zudem ist im Rahmen des AP PSM vorgesehen, ausgewählte Messstellen in Karst-Grundwasserleitern mit intensiver Landwirtschaft im Einzugsgebiet während 4 Jahren intensiv zu beproben, um das Auftreten von PSM im Karstgrundwasser besser zu erfassen.

### **NAQUA als Teil des integralen Gewässermonitorings**

Die Nationale Grundwasserbeobachtung NAQUA ist Teil des integralen Gewässermonitorings Schweiz. Neben NAQUA umfasst dieses auch das Monitoring der Wasserqualität und -quantität der Fliessgewässer (NAWA und Hydrologisches Basismessnetz). Bund und kan-

---

tonale Fachstellen werden weiterhin im integralen Gewässermonitoring eng zusammenarbeiten. Die 2016 neu geschaffene Strategische Begleitgruppe Gewässerbeurteilung Schweiz stellt zudem sicher, dass die Beurteilungskonzepte des gesamten Gewässersystems bestmöglich aufeinander abgestimmt werden. Auf der Basis dieser Messnetze besitzt der Bund die Grundlagen, Zustand und Entwicklung des gesamten Gewässersystems auch in Zukunft integral erfassen und beurteilen zu können.

---

# Literatur

ARE. Bundesamt für Raumentwicklung (2015): Cercle Indicateurs. Nachhaltigkeitsindikatoren für Kantone und Gemeinden. [www.aren.admin.ch/cercleindicateurs](http://www.aren.admin.ch/cercleindicateurs)

AWEL. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (2013): Mikroverunreinigungen in der Glatt und im Grundwasser des Glatttals. Ergebnisse der Untersuchungskampagne 2012/13. Zürich.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2018a): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2017. Umwelt-Zustand Nr. 1804. Bern.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2018b): Stand der Altlastenbearbeitung in der Schweiz. [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > *Thema Altlasten* > *Fachinformationen* > *Altlastenbearbeitung* > *Stand*

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2018c): Altlasten: Das Wichtigste in Kürze. [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > *Thema Altlasten* > *Das Wichtigste in Kürze*

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2018d): Schutz der Grundwasserfassungen in der Schweiz – Stand des Vollzugs. Bericht zur Umfrage bei den kantonalen Fachstellen. Bern.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen Nr. 1217. Bern.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2009a): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004 – 2006. Umwelt-Zustand Nr. 0903. Bern.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2009b): Leitfaden Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW). [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > *Thema Altlasten* > *Fachinformationen* > *ChloroNet: nationale Plattform für CKW-Altlasten (2007–2018)* >

*Umgang mit CKW-Belastungen* > *Leitfaden CKW-Stoffeigenschaften*

BAFU. Bundesamt für Umwelt (2004): Grundwasservorkommen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 8.6. Bern.

BAFU. Bundesamt für Umwelt (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Tafel 5.2. Bern.

BAFU/BLW. Bundesamt für Umwelt/Bundesamt für Landwirtschaft (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Umwelt-Wissen Nr. 1633. Bern.

BAFU/BLW. Bundesamt für Umwelt/Bundesamt für Landwirtschaft (2013): Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1312. Bern.

BAG. Bundesamt für Gesundheit (2017): Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz. Ergebnisse 2016. Bern.

BAG. Bundesamt für Gesundheit (2014): Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2013. Bern.

BAG. Bundesamt für Gesundheit (2012): Übersicht der in der amtlichen Lebensmittelkontrolle untersuchten kontrollpflichtigen Waren – Befundstatistiken 2007/2008/2009. Bern.

BFS. Bundesamt für Statistik (2018): Umwelt. Taschenstatistik 2018. Neuchâtel.

Bigalke M., Rehmus A., Keller A. (2016): Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Bericht im Auftrag des BLW.

BLV/BAFU. Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen/Bundesamt für Umwelt (2016): Umsetzung des Protokolls Wasser und Gesundheit in der

- Schweiz. Bewertung der von 2013 bis 2015 erzielten Fortschritte nach Artikel 7 des Protokolls. Bern.
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2019a): Pflanzenschutzmittelverzeichnis. [www.psm.admin.ch/de/wirkstoffe](http://www.psm.admin.ch/de/wirkstoffe)
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2019b): Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe. [www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html](http://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html)
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2018): Anwendungsverbote für Pflanzenschutzmittel in der Grundwasserschutzzone S2 bzw. S2 und S<sub>n</sub>. [www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html](http://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html)
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2017): Agrarbericht 2017. [www.agrarbericht.ch/de](http://www.agrarbericht.ch/de)
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2016a): Agrarbericht 2016. [www.agrarbericht.ch/de](http://www.agrarbericht.ch/de)
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2016b): In der Schweiz verkaufte Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe 2014. Unveröffentlicht.
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2014): Agrarumweltmonitoring. Gemeinsam für eine nachhaltige Landwirtschaft. Bern.
- BLW. Bundesamt für Landwirtschaft (2008): Agrarbericht 2008. Bern.
- BLW/BLV. Bundesamt für Landwirtschaft/Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (2019): Relevanz von Pflanzenschutzmittel-Metaboliten im Grund- und Trinkwasser gemäss EU-Leitfaden. Stand 20.05.19. [www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html](http://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/nachhaltige-anwendung-und-risikoreduktion.html)
- Bundesrat (2018): Umwelt Schweiz 2018. Bern.
- Bundesrat (2017): Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Bericht des Bundesrats. 6. September 2017.
- Burger A., Recordon E., Bovet D., Cotton L., Saugy B. (1985): Thermique des nappes souterraines. Presses polytechniques romandes. Lausanne.
- Buser A. Morf L. (2009): Substance flow analysis for Switzerland. Perfluorinated surfactants perfluorooctane-sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA). Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen. Nr. 0922. Bern.
- BUWAL. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt Nr. 2508. Bern.
- BUWAL/BWG. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft/Bundesamt für Wasser und Geologie (2004): NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003. Bern.
- BUWAL/BWG/MeteoSchweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft/Bundesamt für Wasser und Geologie/MeteoSchweiz (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Bern.
- CH. Schweizerische Eidgenossenschaft (2016): Erste Schritte der Schweiz zur Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Bern.
- ChemG. Bundesgesetz über den Schutz vor gefährlichen Stoffen und Zubereitungen (Chemikaliengesetz) vom 15. Dezember 2000. SR 813.1.
- ChemRRV. Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung) vom 18. Mai 2005. SR 814.81.
- Diston D., Sinreich M., Zimmermann S., Baumgartner A., Felleisen R. (2015): Evaluation of molecular- and culture-dependent MST markers to detect fecal contamination and indicate viral presence in good quality groundwater. Environ. Sci. Techn. 49: 7142 – 7151.

- EC. Council Decision (EU) 2015/633 of 20 April 2015 on the submission, on behalf of the European Union, of a proposal for the listing of additional chemicals in Annex A to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Official Journal of the European Union. 23.04.2015. L 104/14.
- ECHA. European Chemicals Agency (2017): Glyphosate not classified as a carcinogen by ECHA. ECHA/PR/17/06. <https://echa.europa.eu/de/-/glyphosate-not-classified-as-a-carcinogen-by-echa>
- ECHA. European Chemicals Agency (2013): Inclusion of Substances of Very High Concern in the Candidate List (Decision of the European Chemicals Agency). 17.06.2013. ED/69/2013.
- EFSA. European Food Safety Authority (2015): Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance glyphosate. EFSA Journal. 13, 11: 4302.
- Epting J., Scheidler S., Egli L., Affolter A., Mueller M. H., García-Gil A., Borer P., Huggenberger P. (2017): Thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources – A paradigmatic example. *Sci. Total Environ.* 15, 596-597: 87 – 96.
- Etcheverry D., Vennemann T. (2009): Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 0930. Bern.
- EU. Commission Regulation (EU) 2017/1000 of 13 June 2017 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related substances.
- EUA European Environment Agency (2018): Waterbase – Groundwater. Europäische Umweltagentur. [last modified 10 Apr 2018]. Available from: [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-water-quality](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/waterbase-water-quality)
- Fenner K., Kern S., Schärer M., Muralt R., Reinhardt M., Escher B. (2011): Transformationsprodukte von organischen Mikroverunreinigungen. Untersuchung von Auftreten und Wirkung im Gewässer. *Gas Wasser Abwasser gwa.* 2011, 5: 335 – 345.
- Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters.* 38, L23401.
- Freiburghaus M. (2012): Aufbereitung von Trinkwasser in der Schweiz: Auswertung der SVGW-Statistik 2005 und 2010. *Aqua & Gas.* 2012, 9: 78 – 81.
- Freiburghaus M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *Gas Wasser Abwasser gwa.* 2009, 12: 1001 – 1009.
- Garnier F. (2012): Contribution à l'évaluation biogéochimique des impacts liés à l'exploitation géothermique des aquifères superficiels: Expérimentations et simulations à l'échelle d'un pilote et d'installations réelles. Thèse de doctorat de l'école doctorale Sciences et Technologies, Université d'Orléans.
- GCOS Schweiz. Nationales Klimabeobachtungssystem [www.meteoschweiz.admin.ch/home/forschung-und-zusammenarbeit/internationale-zusammenarbeit/gcos/nationale-klimabeobachtung.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/forschung-und-zusammenarbeit/internationale-zusammenarbeit/gcos/nationale-klimabeobachtung.html)
- GGMN. Global Groundwater Network. <https://ggmn.un-igrac.org/>
- GNIP. Global Network of Isotopes in Precipitation. [www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html)
- GNIR. Global Network of Isotopes in Rivers. [www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnir.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnir.html)
- Götz C. W., Abegglen C., McArdell C. S., Koller M., Siegrist H., Hollender J., Schärer M. (2010a): Mikroverunreinigungen. Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen. *Gas Wasser Abwasser gwa.* 2010, 4: 1 – 9.

- Götz C. W., Kase R., Hollender J. (2010b): Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Studie im Auftrag des BAFU. Eawag, Dübendorf.
- GSchG. Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz) vom 24. Januar 1991. SR 814.20.
- GSchV. Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998. SR 814.201.
- Hanke I., Singer H., McArdell-Buergisser C., Brennwald M., Traber D., Muralt R., Herold T., Oechslin R., Kipfer R. (2007): Arzneimittel und Pestizide im Grundwasser. Gas Wasser Abwasser gwa. 2007, 3: 187 – 196.
- Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. (2010): Stickstoffflüsse in der Schweiz. Stoffflussanalyse für das Jahr 2005. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 1018. Bern.
- Hollender J., Singer H., Hernando D., Kosjek T., Heath E. (2010): The Challenge of the Identification and Quantification of Transformation Products in the Aquatic Environment Using High Resolution Mass Spectrometry. In: Fatta-Kassinos D. et al. (Hrsg.). Xenobiotics in the Urban Water Cycle. Mass Flows, Environmental Process, Mitigation and Treatment Strategies. 16: 195 – 211.
- Hunkeler D., Goldscheider N., Rossi P., Burn C. (2006): Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 0603. Bern.
- IACR. International Agency for Research on Cancer (2015): Glyphosate. IARC Monographs. 112.
- IKSR. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR (2012): Stoffdatenblatt Komplexbildner. Fachbericht 196A.
- IKSR. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1999): Übereinkommen zum Schutz des Rheins. 12. April 1999.
- IMS Health GmbH. (2016). Analyse der Menge an pharmazeutischen Wirkstoffen, die in der Schweiz verkauft wurden (Jahre 2014 – 2016). Erhebung im Auftrag des BAFU. Unveröffentlicht.
- Jekel M., Dott W. (2013): Leitfaden «Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf». Wissenschaftliches Begleitvorhaben der BMBF-Fördermassnahme «Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf» (RISKWa). Frankfurt am Main.
- Jordi B. (2015): Altlastenbearbeitung auf Kurs. Stand der Untersuchung, Überwachung und Sanierung. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Zustand Nr. 1516. Bern.
- Kiefer J., Fischer T. (2013): Grundwasserdatenbank Wasserversorgung. Sonderbericht zum Jahresbericht 2012. Erweiterte Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit in Baden-Württemberg 2012. TZW, DVGW-Technologiezentrum Wasser. Karlsruhe.
- Kötzsch S., Sinreich M. (2014): Zellzahlen zum Grundwasser – Bestimmung mittels Durchflusszytometrie. Aqua & Gas. 2014, 3: 14 – 21.
- Krauss M., Singer H., Hollender J. (2010): LC-high resolution MS in environmental analysis: from target screening to the identification of unknowns. Anal. Bioanal. Chem. 397: 943 – 951.
- Kunz M., Schindler Wildhaber Y., Dietzel A. (2016): Zustand der Schweizer Fliessgewässer. Ergebnisse der Nationalen Beobachtung der Oberflächengewässerqualität (NAWA) 2011 – 2014. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Zustand Nr. 1620. Bern.
- Latino D.A.R.S., Wicker J., Gütlein M., Schmid E., Kramer S., Fenner K. (2017): Eawag-Soil in enviPath: a new resource for exploring regulatory pesticide soil biodegradation pathways and half-life data. Environmental Science: Processes and Impacts. 19, 3: 449 – 464.
- Longrée P., Singer H., Moschet C., Goetz C., Schärer M., Keusen M. (2011): Organische Mikroverunreinigungen im Bodensee. Analyse und Bewertung der Situation in See

- und Einzugsgebiet. *Gas Wasser Abwasser gwa*. 2011, 7: 495 – 505.
- LUBW. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2018): Grundwasser-Überwachungsprogramm. Ergebnisse der Beprobung 2017. Grundwasserschutz Bd. 58. Karlsruhe.
- LUBW. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013): Grundwasserüberwachungsprogramm – Ergebnisse der Beprobung 2012. Grundwasserschutz Bd. 47. Karlsruhe.
- Mathys R., Dittmar J., Johnson C.A. (2007): Antimony in Switzerland. A substance flow analysis. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 0724. Bern.
- Mazacek J., Ruppe S., Griesshaber D., Langlois I., Dolf R., Singer H., Leve J., Hofacker A., Leu C. (2016): Vom Unfall zur präventiven Überwachung. Rheinüberwachungsstation (RÜS). *Aqua & Gas*. 2016, 11: 66 – 78.
- MeteoSwiss 2018: National Climate Observing System (GCOS Switzerland) Update 2018.
- MeteoSchweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (2014): Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht. Fachbericht Nr. 243. Bern.
- NADUF. Nationale Daueruntersuchung Fließgewässer. [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) > *Thema Wasser > Daten, Indikatoren und Karten > Messnetze > Qualität der Oberflächengewässer (NAWA) > NADUF: Fließgewässer*
- NFP61. Leitungsgruppe NFP61 (2015): Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz. Gesamtsynthese des Nationalen Forschungsprogramms NFP61 «Nachhaltige Wassernutzung». Bern.
- OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development (2013): OECD Compendium of Agri-environmental Indicators. OECD Publishing. Available from: [www1.oecd.org/environment/oecd-compendium-of-agri-environmental-indicators-9789264186217-en.htm](http://www1.oecd.org/environment/oecd-compendium-of-agri-environmental-indicators-9789264186217-en.htm)
- OSPAR. Oslo and Paris Commissions (1992). Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic. 22 September 1992.
- PPDB (2009). The Pesticide Properties Database developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU); University of Hertfordshire, funded by UK national sources and the EU-funded FOOTPRINT project (FP6-SSP-022704).  
<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/>
- Pronk M., Sinreich M., Guhl F., Egli T., Kötzsch S., Felleisen R., Koch M., Köster O., Raetz E., Ramseier C., Rossi P., Schürch N. (2010): Auftreten von Mikroorganismen im Grundwasser – Ein erster landesweiter Überblick. *Gas Wasser Abwasser gwa*. 2010, 12: 1059 – 1071.
- PSMV. Verordnung über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (Pflanzenschutzmittelverordnung) vom 18. Mai 2005. SR 916.161.
- Reemtsma T., Berger U., Arp H.P.H., Gallard H., Knepper T.P., Neumann M., Quintana J.B., de Voogt P. (2016): Mind the Gap: Persistent and Mobile Organic Compounds – Water Contaminants That Slip Through. *Environ. Sci. Technol.* 50: 10308 – 10315.
- Reinhardt M., Kozel R., Hofacker A., Leu C. (2017): Monitoring von PSM-Rückständen im Grundwasser. Zahlen und Fakten der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA. *Aqua & Gas*. 2017, 6: 78 – 89.
- Reinhardt M., Tresp J., Zoller O., Rupp H., Hoehn E. (2010): Perfluorierte Chemikalien im Grundwasser. Grundlagen und Pilotstudie Schweiz. *Gas Wasser Abwasser gwa*. 2010, 11: 967 – 978.
- Schmidt C.K., Brauch H.-J. (2008): N,N-Dimethylsulfamide as Precursor for N-Nitrosodimethylamine (NDMA) Formation upon Ozonation and its Fate During Drinking Water Treatment. *Environ. Sci. Technol.* 42,17: 6340 – 6343.
- Schröder H.F., Gebhardt W., Hayashi D., Chittka U., Pinnekamp J. (2010): Die Elimination perfluorierter Tenside (PFT) bei der Abwasserreinigung unter Einsatz

weitergehender physikalisch-chemischer Verfahren. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 57, 4: 350 – 356.

Schürch M., Bulgheroni M., Sinreich M. (2018): Température des eaux souterraines. Un aperçu de l'état et de l'évolution en Suisse. Aqua & Gas. 2018, 7/8: 40 – 48.

Schürch M., Sinreich M., Kozel R. (2016): Grundwasserregime an Quellen. Typisierung für die Schweiz. Aqua & Gas. 2016, 12: 14 – 22.

Schürch M., Kozel R., Biaggi D., Weingartner R. (2010): Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz. Konzept und Fallbeispiele. Gas Wasser Abwasser gwa. 2010, 11: 955 – 965.

Schweizer Salinen (2017). [www.taufix.ch/wp-content/uploads/2017/05/Statistiken\\_Salzverkauf.pdf](http://www.taufix.ch/wp-content/uploads/2017/05/Statistiken_Salzverkauf.pdf)

Sinreich M., Pronk M., Kozel R. (2014): Microbiological monitoring and classification of karst springs. Environmental Earth Sciences. 71: 563 – 572.

Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Löw S., Stauffer F. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas. 2012, 9: 16 – 28.

Spreafico M., Weingartner R. (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG. Serie Wasser Nr. 7. Bern.

Spycher S., Daniel O. (2013): Agrarumweltindikator Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Auswertungen von Daten der Zentralen Auswertung Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) der Jahre 2009 – 2010. Bericht im Auftrag des BLW. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW.

Stalder E., Blanc A., Haldimann M., Dudler V. (2012): Occurrence of uranium in Swiss drinking water. Chemosphere. 86: 672 – 679.

TBDV. Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen vom 16. Dezember 2016. SR 817.022.11.

Umweltbundesamt (2011): Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustandes in Österreich. Report 0328. Wien.

UNEP. United Nations Environment Programme (2009): Report of the Conference of the Parties of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its fourth meeting, Geneva, 4 – 8 May 2009. Document UNEP/POPS/COP.4/38.

Wittwer A., Gubser C. (2010): Umsetzung Verbot PSM. Untersuchung zum Stand der Umsetzung des Anwendungsverbots von Unkrautvertilgungsmitteln auf und an Strassen, Wegen und Plätzen. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Wissen Nr. 1014. Bern.

# Verzeichnis

## Abbildungen

|   |          |  |          |
|---|----------|--|----------|
| Abbildung 3.1<br>Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet der einzelnen Messstellen in Relation zur Fläche des gesamten Einzugsgebiets                                  | Seite 15 | Abbildung 6.1<br>Deuterium und Sauerstoff-18 in Niederschlag, Fließgewässern und Grundwasser (2013) sowie Naturraum bzw. Grundwasserregime in Talsohlen      | Seite 34 |
| Abbildung 3.2<br>Messstellen des Moduls QUANT zur Beobachtung der Grundwasser-Quantität mit Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet sowie Grundwasserleitertyp         | Seite 18 | Abbildung 6.2<br>Tritium in Niederschlag, Fließgewässern und Grundwasser (2009)  | Seite 34 |
| Abbildung 3.3<br>Messstellen der Module TREND und SPEZ zur Beobachtung der Grundwasser-Qualität mit Hauptbodennutzung im Einzugsgebiet sowie Grundwasserleitertyp | Seite 19 | Abbildung 6.3<br>Sauerstoff-18 und Tritium in Niederschlag und Fließgewässern an ausgewählten Messstellen (1980 bis 2016)                                    | Seite 35 |
| Abbildung 3.4<br>Messstellen des Moduls ISOT zur Beobachtung der Isotope in Niederschlag und Fließgewässern sowie Naturräume                                      | Seite 20 | Abbildung 7.1<br>Grundwassertemperatur und deren Variabilität (2016) in Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleitern                                 | Seite 40 |
| Abbildung 4.1<br>Grundwasserleitertypen   | Seite 23 | Abbildung 7.2<br>Grundwassertemperatur (2016) und deren Entwicklung (2000 bis 2016) sowie Grundwasserleitertyp   | Seite 41 |
| Abbildung 5.1<br>Niederschlag (2007 bis 2016)   | Seite 28 | Abbildung 7.3<br>Grundwassertemperatur (2000 bis 2016)   | Seite 39 |
| Abbildung 5.2<br>Grundwasserstand und Quellabfluss (2007 bis 2016) sowie Grundwasserregime  | Seite 29 | Abbildung 7.4<br>Langfristige Entwicklung der Grundwassertemperatur im Jahresverlauf (2000 bis 2016) in Lockergesteins-, Kluft- und Karst-Grundwasserleitern | Seite 40 |
| Abbildung 5.3<br>Indikatoren Grundwasser-Quantität (1987 bis 2016)  | Seite 29 | Abbildung 8.1<br>Elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers (2007 bis 2014) und Grundwasserleitertyp   | Seite 44 |
| Abbildung 5.4<br>Grundwasserstand bzw. Quellabfluss (1968 bis 2016) an ausgewählten Messstellen   | Seite 32 | Abbildung 8.2<br>Elektrische Leitfähigkeit (2007 bis 2014) und Hauptinhaltsstoffe (2007 bis 2016) im Grundwasser in Relation zum Grundwasserleitertyp        | Seite 45 |
|   |          | Abbildung 8.3<br>Sulfat und Chlorid im Grundwasser (2016) in Relation zur Hauptbodennutzung  | Seite 44 |

|   |          |  |          |
|---|----------|--|----------|
| Abbildung 8.4<br>Chlorid und Natrium im Grundwasser (2004 bis 2016) in<br>Relation zur Hauptbodennutzung  | Seite 45 | Abbildung 11.5<br>Rückstände von Chloridazon im Grundwasser (2014)<br>sowie Anbau von Zucker- und Futterrüben                          | Seite 71 |
| Abbildung 9.1<br>Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014)  | Seite 50 | Abbildung 11.6<br>Rückstände von Metolachlor im Grundwasser (2014)<br>sowie Anbau von Körner- und Silomais                             | Seite 71 |
| Abbildung 9.2<br>Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014) sowie<br>Grundwasserleitertyp  | Seite 51 | Abbildung 11.7<br>Rückstände von Atrazin im Grundwasser (2014) sowie<br>Anbau von Körner- und Silomais                                 | Seite 72 |
| Abbildung 9.3<br>Kupfer, Blei (2006 bis 2014), Antimon (2006 bis 2008)<br>und Uran (2006 bis 2008 sowie 2012) im Grundwasser<br>in Relation zur Hauptbodennutzung | Seite 52 | Abbildung 11.8<br>Rückstände von Dichlobenil im Grundwasser (2014)<br>sowie Siedlungsfläche, Obst- und Rebbaubau                       | Seite 72 |
| Abbildung 10.1<br>Nitrat im Grundwasser (2014) sowie offenes Ackerland  | Seite 58 | Abbildung 11.9<br>PSM-Wirkstoffe und PSM-Metaboliten im Grundwasser<br>(2014) in Relation zur Hauptbodennutzung                        | Seite 73 |
| Abbildung 10.2<br>Nitrat im Grundwasser (2014) in Relation zur Haupt-<br>bodennutzung   | Seite 57 | Abbildung 11.10<br>Ausgewählte PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im<br>Grundwasser (2002 bis 2014)                                       | Seite 77 |
| Abbildung 10.3<br>Nitrat im Grundwasser (2002 bis 2014) in Relation zur<br>Hauptbodennutzung  | Seite 57 | Abbildung 12.1<br>Flüchtige organische Verbindungen (VOC) im Grund-<br>wasser (2014)   | Seite 86 |
| Abbildung 11.1<br>PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser<br>(2014)  | Seite 65 | Abbildung 12.2<br>Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im<br>Grundwasser (2014) sowie CKW-belastete Betriebs-<br>standorte | Seite 89 |
| Abbildung 11.2<br>PSM-Wirkstoffe im Grundwasser (2014) sowie offenes<br>Ackerland   | Seite 69 | Abbildung 12.3<br>Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe<br>(MAKW) im Grundwasser (2014) sowie Siedlungsfläche                   | Seite 89 |
| Abbildung 11.3<br>Im Zulassungsverfahren als relevant eingestufte<br>PSM-Metaboliten im Grundwasser (2014) sowie offenes<br>Ackerland                             | Seite 70 | Abbildung 12.4<br>MTBE, ETBE und TBA im Grundwasser (2014) sowie<br>Siedlungsfläche  | Seite 90 |
| Abbildung 11.4<br>Im Zulassungsverfahren als nicht relevant eingestufte<br>PSM-Metaboliten im Grundwasser (2014) sowie offenes<br>Ackerland                       | Seite 70 | Abbildung 12.5<br>1,4-Dioxan im Grundwasser (2011/2012) sowie Sied-<br>lungsfläche   | Seite 90 |

|   |           |  |           |
|---|-----------|--|-----------|
| Abbildung 12.6<br>Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW),<br>Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe<br>(MAKW) und MTBE im Grundwasser (2014) in Relation<br>zur Hauptbodennutzung | Seite 91  | Abbildung 16.5<br>Fäkalbakterien, Viren und Protozoen im Grundwasser<br>(2009/2010) in Relation zum Grundwasserleitertyp   | Seite 118 |
| Abbildung 12.7<br>Trichlorethen, Tetrachlorethen, 1,1,1-Trichlorethan und<br>MTBE im Grundwasser (2003 bis 2014)  | Seite 95  | Abbildung 16.6<br>Mikroorganismen im Grundwasser (2009/2010) und<br>deren Variabilität   | Seite 119 |
| Abbildung 13.1<br>Arzneimittel im Grundwasser (2014) sowie gereinigtes<br>Abwasser in verschiedenen Fliessgewässern und Sied-<br>lungsfläche  | Seite 100 | <b>Tabellen</b>  |           |
| Abbildung 13.2<br>Korrosionsschutzmittel im Grundwasser (2014) sowie<br>gereinigtes Abwasser in verschiedenen Fliessgewässern<br>und Siedlungsfläche  | Seite 100 | Tabelle 3.1<br>Messstellen der einzelnen Module nach Messstellenart,<br>Grundwasserleitertyp, Hauptbodennutzung und Wasser-<br>nutzung                                     | Seite 14  |
| Abbildung 13.3<br>Komplexbildner im Grundwasser (2014) sowie gereinig-<br>tes Abwasser in verschiedenen Fliessgewässern und<br>Siedlungsfläche  | Seite 101 | Tabelle 8.1<br>Chlorid und Sulfat im Grundwasser (2007 bis 2016) in<br>Relation zur numerischen Anforderung GSchV  | Seite 44  |
| Abbildung 14.1<br>Perfluorierte Chemikalien (PFC) im Grundwasser<br>(2007/2008) sowie gereinigtes Abwasser in verschie-<br>denen Fliessgewässern und Grundwasserleitertyp                         | Seite 108 | Tabelle 9.1<br>Spurenelemente im Grundwasser (2006 bis 2014)   | Seite 49  |
| Abbildung 16.1<br>Gesamtzellzahl, AMK, <i>E. coli</i> und Enterokokken im<br>Grundwasser (2009/2010)  | Seite 116 | Tabelle 10.1<br>Nitrat im Grundwasser (2007 bis 2014)  | Seite 56  |
| Abbildung 16.2<br>Bakterien im Grundwasser (2009/2010) sowie Grund-<br>wasserleitertyp  | Seite 116 | Tabelle 11.1<br>PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Langzeit-<br>monitoring (2002 bis 2014)   | Seite 63  |
| Abbildung 16.3<br>Viren im Grundwasser (2009/2010) sowie Grundwasser-<br>leitertyp  | Seite 117 | Tabelle 11.2<br>PSM-Rückstände im Grundwasser (2014)   | Seite 66  |
| Abbildung 16.4<br>Protozoen im Grundwasser (2009/2010) sowie Grund-<br>wasserleitertyp  | Seite 117 | Tabelle 11.3<br>PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser<br>(2014)   | Seite 66  |
|   |           | Tabelle 11.4<br>PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser<br>(2007 bis 2014)  | Seite 74  |
|   |           | Tabelle 11.5<br>PSM-Wirkstoffe und -Metaboliten im Grundwasser<br>(2007 bis 2014) in Relation zur numerischen Anforde-<br>rung GSchV bzw. einer Konzentration von 0,1 µg/l | Seite 75  |

---

|  |           |  |           |
|--|-----------|--|-----------|
| Tabelle 12.1<br>Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser (2014)   | Seite 85  | Tabelle 16.1<br>Parameter und Analytik der Pilotstudie Mikroorganismen (2009/2010) | Seite 114 |
| Tabelle 12.2<br>Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) im Grundwasser (2014)  | Seite 87  | Tabelle 16.2<br>Mikroorganismen im Grundwasser (2009/2010)                         | Seite 115 |
| Tabelle 12.3<br>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im Grundwasser (2014)   | Seite 88  |  |           |
| Tabelle 12.4<br>1,4-Dioxan, ETBE, MTBE und TBA im Grundwasser (2014)   | Seite 88  |  |           |
| Tabelle 12.5<br>Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) im Grundwasser (2007 bis 2014)  | Seite 92  |  |           |
| Tabelle 12.6<br>Flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW), monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) und weitere flüchtige organische Verbindungen im Grundwasser (2007 bis 2014) in Relation zur numerischen Anforderung GSchV bzw. einer Konzentration von 1 µg/l | Seite 93  |  |           |
| Tabelle 12.7<br>Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (MAKW) im Grundwasser (2007 bis 2014)   | Seite 94  |  |           |
| Tabelle 13.1<br>Abwasserindikatoren im Grundwasser (2014)  | Seite 99  |  |           |
| Tabelle 14.1<br>Perfluorierte Chemikalien (PFC) im Grundwasser (2007/2008)   | Seite 105 |  |           |
| Tabelle 15.1<br>Substanzen der Pilotstudie «Screening» (2007/2008)   | Seite 109 |  |           |
| Tabelle 15.2<br>«Neue» Substanzen im Grundwasser (2007/2008)   | Seite 110 |  |           |

# Anhang 1

## Parameter Langzeitmonitoring

| Parameter                           | Modul |       |      |      | Stand Daten |
|-------------------------------------|-------|-------|------|------|-------------|
|                                     | QUANT | TREND | SPEZ | ISOT |             |
| Grundwasserstände und Quellabflüsse | •     |       |      |      | 2016        |
| Isotope                             |       |       |      | •    | 2016        |
| Grundwassertemperatur               | •     |       |      |      | 2016        |
| Hauptinhaltsstoffe                  |       | •     |      |      | 2016        |
| Spurenelemente                      |       | •     |      |      | 2016        |
| Nitrat                              |       | •     | •    |      | 2014        |
| Pflanzenschutzmittel                |       | •     | •    |      | 2014        |
| Flüchtige organische Verbindungen   |       | •     | •    |      | 2014        |
| Abwasserindikatoren                 |       | •     | •    |      | 2014        |

## Anhang 2

### Involvierte kantonale Fachstellen und Institutionen

#### Kantonale Fachstellen

- Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau
- Amt für Umwelt des Kantons Appenzell Innerrhoden
- Amt für Umwelt des Kantons Appenzell Ausserrhoden
- Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern
- Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft
- Amt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen des Kantons Basel-Landschaft
- Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt
- Amt für Umwelt des Kantons Freiburg
- Service de géologie, sols et déchets du canton de Genève
- Amt für Umweltschutz des Kantons Glarus
- Amt für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden
- Amt für Lebensmittelsicherheit und Tiergesundheit des Kantons Graubünden
- Office de l'environnement du canton du Jura
- Umwelt und Energie des Kantons Luzern
- Dienststelle Lebensmittelkontrolle und Verbraucherschutz des Kantons Luzern
- Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel
- Amt für Umwelt des Kantons Nidwalden
- Amt für Landwirtschaft und Umwelt des Kantons Obwalden
- Amt für Wasser und Energie des Kantons St.Gallen
- Amt für Verbraucherschutz und Veterinärwesen des Kantons St.Gallen
- Interkantonales Labor, Lebensmittelkontrolle Appenzell Ausserrhoden, Appenzell Innerrhoden, Schaffhausen & Umweltschutz Schaffhausen
- Amt für Umwelt des Kantons Solothurn
- Lebensmittelkontrolle des Kantons Solothurn
- Amt für Umweltschutz des Kantons Schwyz
- Amt für Umwelt des Kantons Thurgau
- Ufficio della protezione delle acque e dell'approvvigionamento idrico del cantone Ticino
- Ufficio del monitoraggio ambientale del cantone Ticino
- Amt für Umweltschutz des Kantons Uri
- Laboratorium der Urkantone
- Office de la consommation du canton de Vaud
- Dienststelle für Umwelt des Kantons Wallis
- Amt für Umwelt des Kantons Zug
- Amt für Verbraucherschutz und Lebensmittelkontrolle des Kantons Zug
- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich

#### Weitere Institutionen

- Agroscope, Wädenswil
- Bundesamt für Gesundheit (BAG)
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV)
- Bundesamt für Metrologie (METAS)
- Eawag, Dübendorf
- Wasserversorgung Stadt Zürich
- Services Industriels de Genève
- Wasserversorgungen mit NAQUA-Messstellen
- Auftragslabors und Büros