

The cover features a background image of a lush green field with several Swiss flags (red with a white cross) planted in it. In the distance, there are rolling hills and mountains under a blue sky with light clouds. A semi-transparent white box on the right side contains the title and other text. At the top, there are two horizontal bars: a light green one on the left and a dark green one on the right.

FRIBO

**Bodenbeobachtungsnetz des
Kantons Freiburg 1987–2016**

März 2019



ETAT DE FRIBOURG
STAAT FREIBURG

**Groupe de coordination pour la protection des sols GCSol
Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBo**

PROJEKT- UND REDAKTIONSVERANTWORTLICHE

Projektverantwortlicher:

**Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg
LIG:**

Clément Levasseur

Redaktion:

**Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg
LIG:**

Clément Levasseur

Estelle Favrelière

Adrian von Niederhäusern

Analysen:

Sol-Conseil

Erfassung und Bearbeitung der
elektronischen Daten:

**Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg
LIG:**

Joel Brülhart

Estelle Favrelière

Adrian von Niederhäusern

Nicolas Rossier

Clément Levasseur

Korrekturlesen:

Amt für Umwelt:

Barbara Gfeller-Laban

Rachel Brülhart

**Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg
LIG:**

Céline Vial-Magnin

Lorraine Sutter

Léa Fardel

Virginie Baechler

DANK

Ohne Mitarbeit der Landwirte, Gemeinden, Besitzer von Familiengärten und Grünanlagen sowie der *Association des jardins familiaux* hätte dieses Projekt nicht durchgeführt werden können. Sie sind alle im FRIBO-Netzwerk integriert. Wir danken ihnen für ihre Mitarbeit.

Wir bedanken uns herzlich bei allen Personen und Institutionen, die uns bei der Durchführung dieser Studie unterstützt haben:

- > Amt für Umwelt (AfU)
- > Frau Elena Havlicek (BAFU) sowie die Herren Jonas Siegrist und Serge Amiguet (Sol-Conseil) für ihre Mitarbeit und ihre Ratschläge für die Interpretation der Resultate
- > Kolleginnen und Kollegen des Landwirtschaftlichen Beratungszentrums

INHALTSVERZEICHNIS

| | | | | |
|------------|--|------------|--|--|
| 1 | Einleitung | 13 | | |
| 2 | Landwirtschaftliche Böden | 14 | | |
| 2.1 | Methodik | 14 | | |
| 2.1.1 | Bodennutzung | 15 | | |
| 2.1.2 | Statistische Analyse | 17 | | |
| 2.2 | Resultate | 20 | | |
| 2.2.1 | Physische und chemische Bodeneigenschaften | 20 | | |
| 2.2.2 | Nährstoffe | 33 | | |
| 2.2.3 | Spurenelemente | 65 | | |
| 2.2.4 | Schwermetalle | 67 | | |
| 2.2.5 | Biologische Parameter | 84 | | |
| 3 | Städtische Böden | 90 | | |
| 3.1 | Methodik | 90 | | |
| 3.1.1 | Geschichte des Netzes | 90 | | |
| 3.1.2 | Statistische Datenanalyse | 90 | | |
| 3.1.3 | Beschreibung der Standorte | 91 | | |
| 3.2 | Resultate | 94 | | |
| 3.2.1 | Phosphor | 94 | | |
| 3.2.2 | Kalium | 98 | | |
| 3.2.3 | Schwermetalle | 101 | | |
| 3.2.4 | Zusammenfassung der Ergebnisse der städtischen Böden | 112 | | |
| 4 | Parallele Untersuchungen und Zusammenarbeit mit Institutionen | 113 | | |
| 4.1 | Parallele Untersuchungen | 113 | | |
| 4.2 | Zusammenarbeit | 117 | | |
| 5 | Schlussfolgerungen | 118 | | |
| 6 | Quellenverzeichnis | 119 | | |
| 7 | Kontakte | 121 | | |
| 7.1 | Landwirtschaftliche Böden | 121 | | |
| 7.2 | Städtische Böden | 121 | | |
| A1 | Anhänge | 122 | | |

ZUSAMMENFASSUNG FRIBO

Das freiburgische Bodenbeobachtungsnetz setzt sich aus 250 Standorten zusammen, welche die ganze landwirtschaftliche Fläche des Kantons Freiburg abdecken. Jeder Standort wird alle fünf Jahre beprobt. Diese Zeitspanne entspricht einem Analysezyklus. 2016 stellte demnach das Ende des sechsten Zyklus dar und war das Jahr des 30-jährigen Bestehens des Netzes. Die erhobenen Daten dienen der Beobachtung der Bodenfruchtbarkeit im Kanton und ermöglichen es, die natürlichen oder anthropogenen Änderungen aufzuzeigen.

Das landwirtschaftliche Netz wurde zwischen 2004 und 2006 mit einem Beobachtungsnetz für städtische Böden ergänzt. 53 Standorte in acht Agglomerationen wurden untersucht. Dies gibt uns Aufschluss über den Bodenzustand sensibler Standorte und erlaubt uns, die diffuse Verschmutzung zu analysieren. 2004 wurden zum ersten Mal 14 Waldstandorte untersucht und ins Netz aufgenommen. Diese Standorte wurden in der letzten Periode nicht beprobt.

Die 250 landwirtschaftlichen Standorte wurden aufgrund ihrer Bodennutzung eingeteilt (Ackerflächen, Dauerwiesen und Alpweiden), um die Stichhaltigkeit der statistischen Interpretation zu erhöhen. Die 53 städtischen Standorte wurden in vier Gruppen eingeteilt: Spielplätze, Dauerwiesen, Grünanlagen und Familiengärten.

Landwirtschaftliche Böden

Die landwirtschaftlichen Böden des Kantons sind allgemein in gutem Zustand. Der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz ist zufriedenstellend und stabil, wobei zwischen den Ackerbau- und Tierhaltungsgebieten Unterschiede bestehen: Die Gehalte an organischer Substanz sind in der Talzone oft unzureichend, und es wird eine Nettoabnahme der Gehalte an organischer Substanz in den Torfböden beobachtet, die für den Gemüsebau verwendet werden. Der pH-Wert ist ebenfalls stabil, aber es gibt viele saure Böden.

Bei den Nährstoffen hat der kurzfristig verfügbare Phosphor abgenommen, während die Reserven infolge der Einführung des ÖLN, aber auch wegen höheren Düngerpreisen stabil geblieben sind. Das Risiko eines Eintrages in die Umwelt hat demnach abgenommen, ohne dass ein Phosphormangel zu befürchten wäre. In den Dauerwiesen wird eine Anreicherung mit Kali und Magnesium festgestellt. Wir empfehlen den Landwirten ihre Kalibilanz auszugleichen, da die Überdüngung die Gesundheit ihrer Tiere beeinträchtigen kann. Die Kalziumgehalte sind stabil.

Die Gehalte an Spurenelementen wie Eisen und Mangan sind sehr zufriedenstellend und stabil. Beim Bor sieht die Situation anders aus. Analytische Probleme beeinflussen die Resultate des 6. Zyklus zwar negativ, nichtsdestotrotz befinden sich die meisten Standorte historisch gesehen in den Versorgungsklassen «arm» und «mässig». Folglich sind bei sensiblen Kulturen wie Zuckerrüben, Raps, Sonnenblumen, Reben, Obstbäumen und Gemüse ausreichende Borgaben notwendig.

Die Schwermetallanalysen in verschiedenen Tiefen zeigen die geogene Herkunft von Kadmium und Zink in den Voralpen sowie von Chrom und Nickel in den Moränenböden. Anthropogene Verschmutzungen durch Schwermetalle stammen mehrheitlich von Fungiziden im Falle von Kupfer und Zink, und der der bis 2003 ausgebrachte Klärschlamm und weitere Düngemittel enthielten Schadstoffe wie Chrom. Die durchschnittlichen Zinkgehalte sind auch auf den Dauerwiesen rückläufig. Gemäss Literatur nehmen gewisse anthropogene Einträge wie zum Beispiel aus atmosphärischen Ablagerungen und aus Futtermittelzusatzstoffen ab. Das Ausbringungsverbot für Klärschlamm wirkte sich auch positiv aus und trug zur Abnahme der Schwermetallgehalte bei.

Die Biomasse ATP und die Mineralisierung des organischen Kohlenstoffes wurden als biologische Indikatoren der Bodenfruchtbarkeit analysiert. Die im 5. FRIBO-Bericht erwähnte Abnahme der Biomasse

ATP hat sich im 6. Zyklus nicht bestätigt, da wieder Werte auf dem Niveau des 3. Zyklus festgesetzt wurden. Der damals beobachtete Rückgang erklärt sich sehr wahrscheinlich mit analytischen Problemen im 4. und 5. Zyklus. Die Biomasse ATP hat vom 1. bis zum 6. Zyklus auf den Dauerwiesen und Ackerflächen nicht wesentlich abgenommen; an den Sömmerungsstandorten wurde hingegen ein erheblicher Rückgang um 26 % beobachtet. Die Mineralisierungsrate von organischem Kohlenstoff blieb auf den Dauerwiesen und Ackerflächen ebenfalls stabil, nahm aber auf den Alpweiden um 28 % ab.

Städtische Böden

Die Situation der Familiengärten muss weiter beobachtet werden. Die Böden enthalten wegen unangemessener Gartenbaupraxis in der Vergangenheit grosse Schwermetallmengen. Noch heute verwenden Hobbygärtner aus Informationsmangel übermässige Mengen an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Die abnehmenden Phosphorreserven zeigen jedoch, dass das Bewusstsein diesbezüglich gestiegen ist. Die Grünanlagen, Dauerwiesen und Spielplätze weisen, von einigen Ausnahmen abgesehen, keine problematischen Konzentrationen von Nährstoffen oder Schwermetallen auf.

Parallele Studien und Zusammenarbeiten

Mit seiner Dichte und Langfristigkeit sowie der homogenen Verteilung im ganzen Kanton Freiburg ist das landwirtschaftliche FRIBO-Netz zu einer nationalen Referenz für Bodenschutz und -beobachtung geworden. Unsere Daten sowie die seit 1987 referenzierten und aufbewahrten Proben sind für die wichtigsten agronomischen Forschungsanstalten und für andere Institute von Interesse. Kapitel 4 beschreibt kurz vier Projekte, in welchen das FRIBO-Netz involviert ist. Die Datenmigration von FRIBO auf die nationale Plattform NABODAT sei ebenfalls erwähnt.

ABKÜRZUNGEN

| | |
|-------------------|--|
| AAE10 | Ammoniumacetat + EDTA |
| AF | Ackerfläche |
| AfU | Amt für Umwelt |
| ALP | Alpweide |
| ATP | Adenosintriphosphat |
| B | Bor |
| Ca | Kalzium |
| CaCl ₂ | Kalziumchlorid |
| Cd | Kadmium |
| Co | Kobalt |
| Cr | Chrom |
| Cu | Kupfer |
| NW | Naturwiese / Dauerwiese |
| Fe | Eisen |
| FRIBO | Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Freiburg |
| GRUD | Düngungsgrundlagen (früher GRUDAF) |
| GRUDAF | Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau |
| K | Kalium |
| LIG | Landwirtschaftliches Institut Grangeneuve |
| LN | Landwirtschaftliche Nutzfläche |
| Mn | Mangan |
| Mg | Magnesium |
| Ni | Nickel |
| ÖLN | Ökologischer Leistungsnachweis |
| OS | Organische Substanz |
| P | Phosphor |
| Pb | Blei |
| VBBö | Verordnung über Belastungen des Bodens |
| Zn | Zink |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 2.1.1-1: Beprobungsschema und Bild eines FRIBO-Standortes Die 25 Bohrungen erfolgen an den schwarzen Punkten bei den Schnittstellen der parallelen Linien zum Seil zwischen den Fähnchen..... | 14 |
| Abbildung 2.1.2-1: Beispiel eines Liniendiagramms mit dem Gehalt an organischer Substanz..... | 17 |
| Abbildung 2.1.2-2: Illustration der logarithmischen Transformation gewisser Variablen am Beispiel des Reserve-Kaliums (K-AAE10). Links die Bruttodaten und rechts die Daten nach logarithmischer Transformation, die eher der Normalverteilung entsprechen..... | 18 |
| Abbildung 2.1.2-3: Signifikante Korrelation..... | 19 |
| Abbildung 2.1.2-4: Nicht signifikante Korrelation | 19 |
| Abbildung 2.2.1-1: Allgemeine Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz | 23 |
| Abbildung 2.2.1-2: Verteilung der Standorte gemäss Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz des Bodens aufgrund des Versorgungspotenzials mit Stickstoff, Modell GRUD 2017 | 24 |
| Abbildung 2.2.1-3: Verteilung der Standorte gemäss Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz des Bodens aufgrund des Verhältnisses OS/Ton, Modell STRUDEL..... | 25 |
| Abbildung 2.2.1-4: Allgemeine Entwicklung des pHs..... | 29 |
| Abbildung 2.2.1-5: Verteilung der Standorte aufgrund der pH-Beurteilung gemäss Modell GRUD 2017 .. | 31 |
| Abbildung 2.2.2-1: Allgemeine Entwicklung des mit der CO ₂ -Methode extrahierten P | 33 |
| Abbildung 2.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P CO ₂ gemäss Modell GRUD 2017..... | 34 |
| Abbildung 2.2.2-3: Allgemeine Entwicklung des mit der P AAE10-Methode extrahierten P..... | 39 |
| Abbildung 2.2.2-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 41 |
| Abbildung 2.2.2-5: Allgemeine Entwicklung des mit der CO ₂ -Methode extrahierten K..... | 44 |
| Abbildung 2.2.2-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO ₂ gemäss Modell GRUD 2017..... | 45 |
| Abbildung 2.2.2-7: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten K | 48 |
| Abbildung 2.2.2-8: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 49 |
| Abbildung 2.2.2-9: Allgemeine Entwicklung des mit der CaCl ₂ -Methode extrahierten Mg | 53 |
| Abbildung 2.2.2-10: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg CaCl ₂ gemäss Modell GRUD 2017 | 54 |
| Abbildung 2.2.2-11: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Mg..... | 57 |
| Abbildung 2.2.2-12: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 58 |
| Abbildung 2.2.2-13: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Ca..... | 61 |
| Abbildung 2.2.2-14: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Ca AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 62 |
| Abbildung 2.2.3-1: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des mit der Warmwassermethode extrahierten B gemäss Modell GRUD 2017..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 2.2.3-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Fe AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 65 |
| Abbildung 2.2.3-3: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mn AAE10 gemäss Modell GRUD 2017 | 66 |
| Abbildung 2.2.4-1: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Cd..... | 68 |
| Abbildung 2.2.4-2: Verteilung der Standorte gemäss Cd-Richtwert..... | 69 |
| Abbildung 2.2.4-3: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Cu..... | 72 |
| Abbildung 2.2.4-4: Verteilung der Standorte gemäss Richtwert des Cu..... | 74 |
| Abbildung 2.2.4-5: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Pb | 76 |
| Abbildung 2.2.4-6: Verteilung der Standorte gemäss Richtwert des Pb | 77 |
| Abbildung 2.2.4-7: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Zn | 80 |
| Abbildung 2.2.4-8: Verteilung der Standorte aufgrund des Richtwertes des Zn..... | 81 |
| Abbildung 2.2.5-1: Allgemeine Entwicklung der Biomasse ATP | 85 |
| Abbildung 2.2.5-2: Allgemeine Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs | 87 |
| Abbildung 3.1.2-1: Beispiel eines Box-Plots | 91 |
| Abbildung 3.2.1-1: Entwicklung des löslichen Phosphors nach Bodennutzungsart gemäss der CO ₂ -Extraktionsmethode..... | 94 |
| Abbildung 3.2.1-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P CO ₂ gemäss GRUD 2017.... | 95 |
| Abbildung 3.2.1-3: Entwicklung des Reservephosphors nach Bodennutzungsart gemäss AAE10-Extraktionsmethode. 1 ppm= 1 mg-P/kg Erde | 96 |
| Abbildung 3.2.1-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P AAE10 gemäss GRUD 2017 | 97 |
| Abbildung 3.2.2-1: Entwicklung des löslichen Kaliums pro Bodennutzungsart gemäss CO ₂ -Extraktionsmethode. 1 [mg %] = 1 [mg-K ₂ O/100 g Erde] = 8.3 [mg-K/kg Erde] | 98 |
| Abbildung 3.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO ₂ gemäss GRUD 2017... | 99 |
| Abbildung 3.2.2-3: Entwicklung des Reservekaliums pro Bodennutzungsart gemäss AAE10-Extraktionsmethode. 1 ppm= 1 mg-K/kg Erde..... | 100 |
| Abbildung 3.2.2-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K AAE10 gemäss GRUD 2017 | 101 |
| Abbildung 3.2.3-1: Entwicklung des Kadmiumgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp | 102 |
| Abbildung 3.2.3-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Kadmiums gemäss VBBo | 103 |
| Abbildung 3.2.3-3: Entwicklung des Chromgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp . | 104 |
| Abbildung 3.2.3-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Chroms gemäss VBBo..... | 105 |
| Abbildung 3.2.3-5: Entwicklung des Kupfergehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Der Richtwert (40 ppm) wird mit einem Pfeil angegeben..... | 106 |
| Abbildung 3.2.3-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Kupfer gemäss VBBo..... | 107 |
| Abbildung 3.2.3-7: Entwicklung des Nickelgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp.. | 108 |
| Abbildung 3.2.3-8: Entwicklung des Bleigealtes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Richt- (50 ppm) und Prüfwert (200 ppm) werden mit Pfeilen angegeben. | 109 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 3.2.3-9: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Blei gemäss VBBo | 110 |
| Abbildung 3.2.3-10: Entwicklung des Zinkgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Der Richtwert (150 ppm) wird mit einem Pfeil angegeben..... | 111 |
| Abbildung 3.2.3-11: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Zink gemäss VBBo | 112 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2.1-1: Nutzungsänderung der Standorte gegenüber dem 5. Zyklus..... | 15 |
| Tabelle 2.1-2: Verteilung der Standorte nach Nutzungsart im 6. Zyklus..... | 15 |
| Tabelle 2.1-3: Beispiel für die Signifikanz der Entwicklungen im HSD-Test für Magnesium..... | 18 |
| Tabelle 2.2-1: Wichtigste physiographische Klassen gemäss der Bodeneignungskarte der Schweiz..... | 20 |
| Tabelle 2.2.4-1: Richt-, Prüf- und Sanierungswerte der wichtigsten Schwermetalle gemäss VBBo in mg/kg Trockensubstanz des Bodens (Gesamtgehalte landwirtschaftlicher Böden) ¹ Aufgehoben seit 1998 ² Der Prüfwert beträgt 150 ppm für Futtermittelproduktionszonen (Dauerwiesen) | 67 |
| Tabelle 2: Verteilung der Standorte nach Gemeinden..... | 92 |
| Tabelle 3: Verteilung der Standorte nach Nutzung | 92 |
| Tabelle 4: Richt- und Prüfwerte der wichtigsten Schwermetalle gemäss VBBo in mg/kg Bodentrockensubstanz (ppm). ¹ Der Prüfwert liegt für die Futtermittelproduktionszonen bei 150 ppm (Dauerwiesen) | 101 |

KARTENVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Karte 2.1.1-1: Lokalisierung und Nutzung der FRIBO-Standorte | 16 |
| Karte 2.2.1-1: Wichtigste physiographische Klassen der Böden gemäss der Bodeneignungskarte der Schweiz im Massstab 1:200'000..... | 21 |
| Karte 2.2.1-2: Tongehalt der 250 landwirtschaftlichen Standorte des FRIBO-Netzes | 22 |
| Karte 2.2.1-3: Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz gemäss Modell STRUDEL – sechster Zyklus..... | 26 |
| Karte 2.2.1-4: Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz pro Standort während der sechs Zyklen. | 28 |
| Karte 2.2.1-5: Beurteilung des pHs gemäss GRUD-Modell – sechster Zyklus | 30 |
| Karte 2.2.1-6: Entwicklung des pHs pro Standort während der sechs Zyklen | 32 |
| Karte 2.2.2-1: Beurteilung des Gehalts an P CO ₂ – sechster Zyklus..... | 36 |
| Karte 2.2.2-2: Entwicklung des Gehalts an P CO ₂ pro Standort während der sechs Zyklen..... | 38 |
| Karte 2.2.2-3: Beurteilung des Gehalts an P AAE10 – sechster Zyklus | 40 |
| Karte 2.2.2-4: Entwicklung des Gehalts an P AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen | 42 |
| Karte 2.2.2-5: Beurteilung des Gehalts an K CO ₂ – sechster Zyklus | 46 |
| Karte 2.2.2-6: Entwicklung des Gehalts an K CO ₂ pro Standort während der sechs Zyklen..... | 47 |
| Karte 2.2.2-7: Beurteilung des Gehalts an K AAE10 – sechster Zyklus..... | 51 |
| Karte 2.2.2-8: Entwicklung des Gehalts an K AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen..... | 52 |
| Karte 2.2.2-9: Beurteilung des Gehalts an Mg CaCl ₂ – sechster Zyklus..... | 55 |
| Karte 2.2.2-10: Entwicklung des Gehalts an Mg CaCl ₂ pro Standort während der sechs Zyklen..... | 56 |
| Karte 2.2.2-11: Beurteilung des Gehalts an Mg AAE10 – sechster Zyklus | 59 |
| Karte 2.2.2-12: Entwicklung des Gehalts an Mg AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen..... | 60 |
| Karte 2.2.2-13: Beurteilung des Gehalts an Ca AAE10 – sechster Zyklus | 63 |
| Karte 2.2.2-14: Entwicklung des Gehalts an Ca AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen | 64 |
| Karte 2.2.4-1: Beurteilung des Gehalts an Cd – sechster Zyklus | 70 |
| Karte 2.2.4-2: Entwicklung des Gehalts an Cd pro Standort während der sechs Zyklen..... | 71 |
| Karte 2.2.4-3: Beurteilung des Gehalts an Cu – sechster Zyklus | 73 |
| Karte 2.2.4-4: Entwicklung des Gehalts an Cu pro Standort während der sechs Zyklen..... | 75 |
| Karte 2.2.4-5: Beurteilung des Gehalts an Pb – sechster Zyklus..... | 78 |
| Karte 2.2.4-6: Entwicklung des Gehalts an Pb pro Standort während der sechs Zyklen | 79 |
| Karte 2.2.4-7: Beurteilung des Gehalts an Zn – sechster Zyklus | 82 |
| Karte 2.2.4-8: Entwicklung des Gehalts an Zn pro Standort während der sechs Zyklen | 83 |
| Karte 2.2.5-1: Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs während der sechs Zyklen | 89 |
| Karte 3.1.3-1: Lage und Nutzung der städtischen FRIBO-Standorte..... | 93 |

1 Einleitung

Das freiburgische Bodenbeobachtungsnetz (FRIBO) wurde zwischen 1987 und 1991 eingeführt mit dem Hauptziel, bodenkundliche, agronomische und umweltrelevante Daten über die landwirtschaftlichen Böden im Kanton Freiburg zu erheben. Es wurde von 2004 bis 2006 mit je einem Beobachtungsnetz für städtische Böden und für Waldböden ergänzt. Anhand der erhobenen Daten können die langfristige Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit im Kanton beobachtet und die anthropogenen oder natürlichen Bodenveränderungen aufgezeigt werden.

Im Herbst 2016 wurden der 6. Analysezyklus der landwirtschaftlichen Böden und der 3. Zyklus der städtischen Böden abgeschlossen. Wir verfügen also über eine 30-jährige Erfahrung in der Beobachtung und Analyse der landwirtschaftlichen Böden. Nun liegt der sechste Bericht seit der Einführung des Netzes vor. Er knüpft an den letzten FRIBO-Bericht an (Rossier & al., 2012), ist aber kompakter und weniger beschreibend und konzentriert sich auf die wichtigen Parameter und signifikanten Entwicklungen. Weiter wurde der statistische Ansatz leicht angepasst. Die Entwicklung der biologischen Parameter wird im vorliegenden Dokument auch behandelt.

Für das Stadtnetz wird eine Zusammenfassung der Resultate präsentiert. Nach drei Analysezyklen zeichnen sich Tendenzen ab, aber ihre Signifikanz ist begrenzt. Das WaldA hat die Waldstandorte im 3. Zyklus nicht beprobt.

Insgesamt wurden 37 chemische, physische und biologische Parameter in den landwirtschaftlichen Böden analysiert; aus praktischen Gründen werden im vorliegenden Bericht jedoch nur 19 behandelt. Für die Beurteilung und Interpretation dieser Parameter wurden die Analysen in vier Kategorien eingeteilt:

1. Physisch-chemische Merkmale der Böden (Tongehalt, organische Substanz und pH)
2. Nährstoffe (P, K, Mg, Ca, B, Fe und Mn)
3. Schwermetalle (Cd, Cu, Pb und Zn)
4. Biologische Parameter (Biomasse ATP und Mineralisierung des organischen Kohlenstoffes)

Die Interpretationen betreffend die Nährstoffe, die physischen und chemischen Merkmale, die biologischen Parameter und Schwermetalle gelten für Oberbodenproben, die in einer Tiefe von 0 bis 20 cm entnommen wurden.

2 Landwirtschaftliche Böden

2.1 Methodik

Das Netz umfasst insgesamt 250 Standorte von 100 m² Grösse, die auf einem Raster von 2 x 2 km im ganzen Kanton verteilt sind. Dank dieser Dichte können repräsentative Informationen zur Situation in jeder Region und Unterregion erhoben werden. Für jeden Beobachtungszyklus werden jährlich 50 Parzellen in einer Tiefe von 0 bis 20 cm beprobt. Innerhalb von fünf Jahren – einem Analysezyklus - werden demnach alle Standorte beprobt.

Die Beprobung beginnt Mitte Juni auf den Alpweiden und endet im November auf den Ackerflächen (Karte 2.1.1-1: Lokalisierung und Nutzung der FRIBO-Standorte). Seit 2014 werden die Standorte mit GPS lokalisiert. Mit Hilfe eines Seils wird ein Quadrat von 10 m x 10 m abgesteckt, in welchem in regelmässigen Abständen 25 Proben mit einem Edelman-Bohrer entnommen werden. Alle 2 m wird dabei ein Fähnchen eingesteckt. Die 25 Proben werden zu einer Mischprobe vermengt. Diese bleibt bis zum Versand für die Analyse ans Labor in einem Kühlraum.

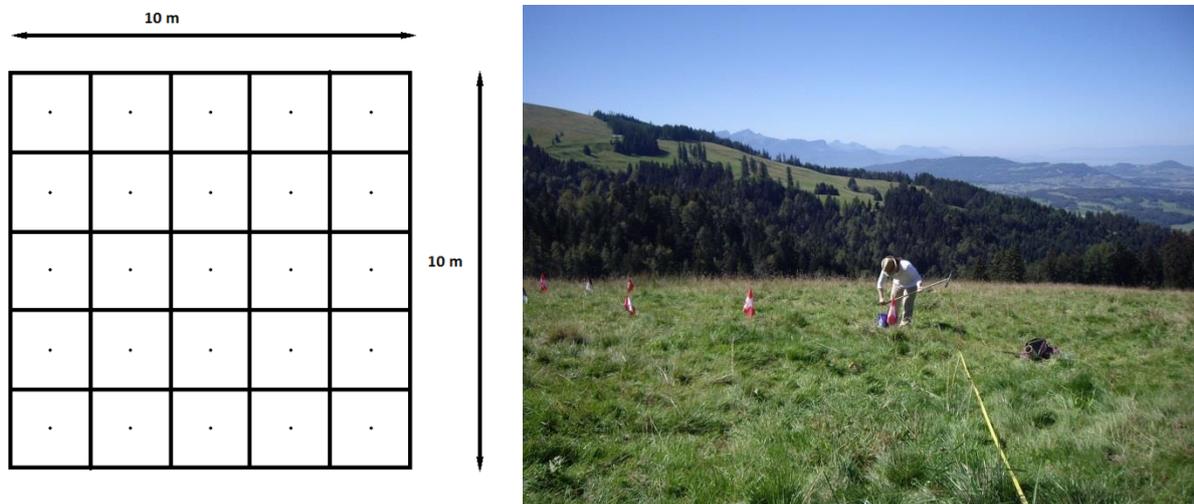


Abbildung 2.1.1-1: Beprobungsschema und Bild eines FRIBO-Standortes Die 25 Bohrungen erfolgen an den schwarzen Punkten bei den Schnittstellen der parallelen Linien zum Seil zwischen den Fähnchen.

Die 30 Beobachtungsjahre sind in folgende Zyklen eingeteilt:

| Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1987 - 1991 | 1992 - 1996 | 1997 - 2001 | 2002 - 2006 | 2007 - 2011 | 2012 - 2016 |

Detaillierte Informationen zum Aufbau des Netzes finden sich im ersten FRIBO-Bericht (Julien & Morand, 1995).

2.1.1 Bodennutzung

Die 250 Standorte des Beobachtungsnetzes wurden aufgrund der landwirtschaftlichen Bodennutzung in drei Klassen eingeteilt: Ackerflächen, Naturwiesen¹ und Alpweiden. Letztere bestehen zwar wie die Naturwiesen aus Dauergrünland, werden jedoch nur für das Weiden während der Sömmerung benutzt und gehören nicht zur landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) des Betriebs. Bei den Naturwiesen der LN handelt es sich mehrheitlich um intensiv genutztes Grünland.

Im Verlauf der 30 Jahre Beprobung fanden Änderungen bei der Bodennutzung statt. Auf den Alpweiden blieb die Nutzung unverändert, nicht aber auf den Ackerflächen und Naturwiesen. Zwischen dem 5. und 6. Zyklus kam es zu Nutzungsänderungen an 15 Standorten (Tabelle 2.1-1), wobei eine Zunahme der Dauerwiesen auf Kosten der Ackerflächen zu beobachten ist. Diese Entwicklung erklärt sich mit der zunehmenden Spezialisierung der Produktionszweige. Es kommt auch vor, dass gewisse Landwirte Kurzrasenweiden auf den Parzellen in der Nähe des Hofes bevorzugen.

Tabelle 2.1-1: Nutzungsänderung der Standorte gegenüber dem 5. Zyklus

| | Nr. der Standorte, die zu Ackerflächen wurden | Nr. der Standorte, die zu Naturwiesen werden |
|---------------|---|--|
| 15 Änderungen | 2, 7, 234, 235 | 1, 82, 91, 94, 117, 134, 166, 198, 216, 230, 241 |

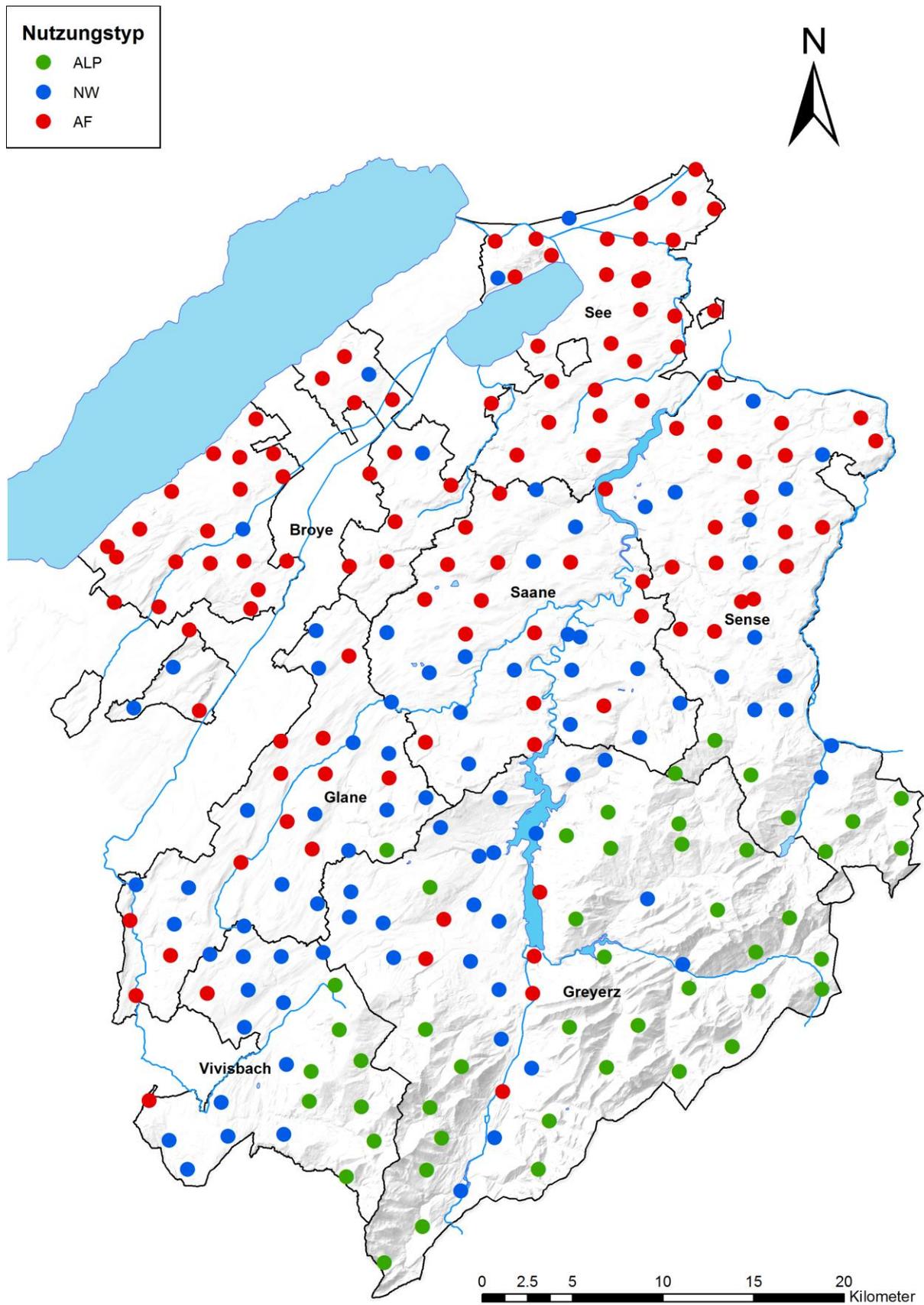
Die Karte 2.1.1-1: Lokalisierung und Nutzung der FRIBO-Standorte zeigt alle Standorte im Kanton Freiburg mit ihrer jeweiligen Nutzungsart und die Grenzen der sieben Bezirke.

Die Tabelle 2.1-2: Verteilung der Standorte nach Nutzungsart im 6. Zyklus listet die Anzahl Standorte aufgrund ihrer Nutzungsart auf.

Tabelle 2.1-2: Verteilung der Standorte nach Nutzungsart im 6. Zyklus

| Nutzung der Standorte | Anzahl Standorte |
|-----------------------|------------------|
| Ackerflächen | 116 |
| Naturwiesen | 87 |
| Alpweiden | 47 |

¹ In der deutschsprachigen Schweiz bezeichnet man Dauerwiesen, welche mehr als sechs Jahre in dieser Form bestehen in der Regel als Naturwiesen, auch wenn diese künstlich erschaffen wurden und intensiv bewirtschaftet werden.



Karte 2.1.1-1: Lokalisierung und Nutzung der FRIBO-Standorte

2.1.2 Statistische Analyse

Zuerst wurde eine Plausibilisierung der Daten für alle Parameter durchgeführt. Drei Standorte wiesen Ausreisser für mehrere Variablen auf. Es sind dies die Standorte 150, 161 und 206 (1 Ackerfläche und 2 Alpweiden), die sich auf Torfböden befinden. Die Gehalte an chemischen Elementen sind instabil, was bei solchen Böden oft der Fall ist. Zudem ist die analytische Unsicherheit bei diesen Böden grösser. Diese Standorte wurden aus der statistischen Analyse gestrichen.

Die grosse Anzahl analysierter Standorte ermöglicht eine repräsentative, deskriptive Statistik der Böden im Kanton Freiburg und einen Vergleich der Durchschnittswerte der verschiedenen Bodennutzungen und Zyklen. Die Statistiken wurden unter Einbezug aller Standorte mit der gleichen Nutzung – 115 Ackerflächen, 87 Naturwiesen und 45 Alpweiden – sowie für jeden einzelnen Standort erstellt.

Zwischen dem fünften FRIBO-Bericht (Rossier & al., 2011) und dem vorliegenden können Änderungen bei den Resultaten der fünf ersten Zyklen auftreten. In den früheren FRIBO-Berichten wurde die Bodennutzung zum Zeitpunkt der Abfassung des Berichts für die Klassierung der Standorte berücksichtigt, auch wenn ihre historische Nutzung eine andere war. Im vorliegenden Bericht wird nun die historische Nutzung berücksichtigt. Demzufolge variiert die Anzahl Standorte auf Dauerwiesen oder Ackerflächen von einem Zyklus zum anderen. Dies erschwert die statistischen Berechnungen. Um stimmige Ergebnisse zu erhalten, wurden die statistischen Methoden jedoch entsprechend korrigiert.

2.1.2.1 Gesamtanalyse pro Nutzung und Zyklus

Für die landwirtschaftlichen Böden erfolgt der Vergleich der Gehaltsentwicklung anhand von Liniendiagrammen, die den Durchschnitt und das Vertrauensintervall 95% pro Zyklus für jede Bodennutzungsart angeben (Abbildung 2.1.2-1: Beispiel eines Liniendiagramms mit dem Gehalt an organischer Substanz). Dieser Grafiktyp ermöglicht eine rasche Visualisierung und Beurteilung der Wertestreuung in einer Datengruppe sowie einen linearen Zeitvergleich.

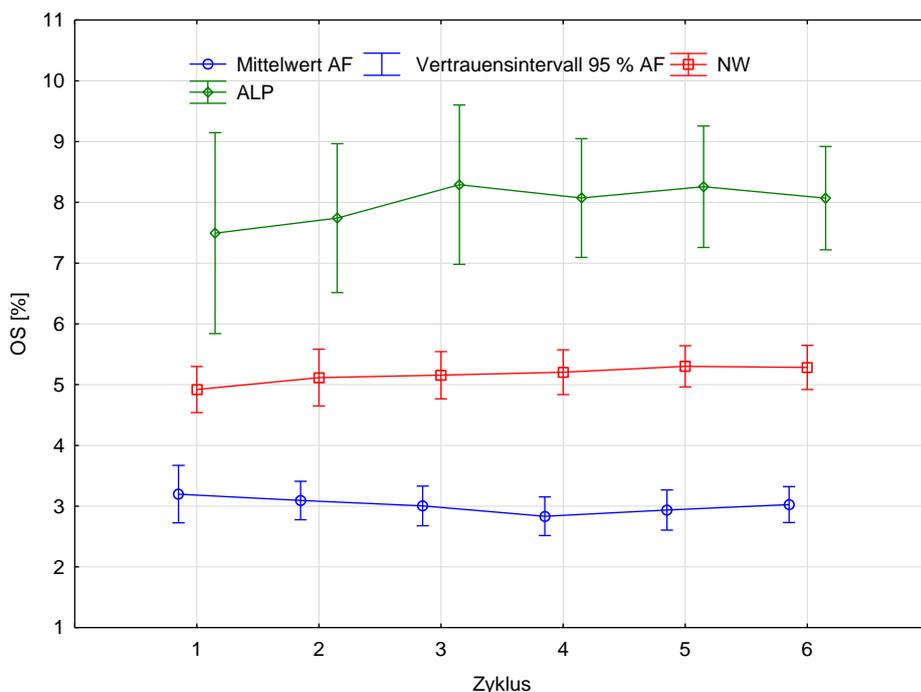


Abbildung 2.1.2-1: Beispiel eines Liniendiagramms mit dem Gehalt an organischer Substanz

Um zu untersuchen, ob eine Entwicklung für die gleiche Nutzung signifikant ist, wurde der für unterschiedlich grosse Proben (Nutzungsänderung der Standorte) angepasste **HSD-Test** (Tukeys Reichweitentest) verwendet. Für Parameter, die nicht einer normalen Verteilung, sondern eher einer log-normalen Verteilung entsprachen, wurde der Tukey-Test nach logarithmischer Transformation der Daten benutzt. Mit Ausnahme des pH, der bereits das Gegenteil des Logarithmus der Konzentration an H^+ -Ionen ausdrückt, wurden alle Variablen so umgewandelt. Eine solche Transformation wird in der Tabelle 2.1-3 mit dem Vermerk «log-transform» angegeben. Dieser Test berücksichtigte die Durchschnittswerte der sechs Zyklen und definierte, ob signifikante Unterschiede von 95% zwischen jedem Zyklus vorkamen (Statsoft).

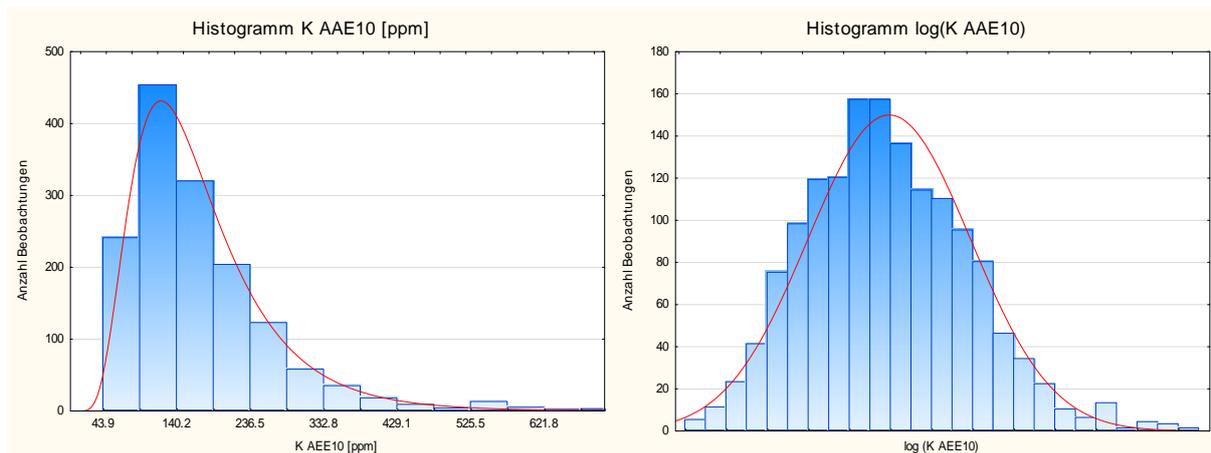


Abbildung 2.1.2-2: Illustration der logarithmischen Transformation gewisser Variablen am Beispiel des Reservekaliums (K-AAE10). Links die Bruttodaten und rechts die Daten nach logarithmischer Transformation, die eher der Normalverteilung entsprechen.

Tabelle 2.1-3: Beispiel für die Signifikanz der Entwicklungen im HSD-Test für Magnesium

| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|
| Durchschnitt Mg $CaCl_2$ | 7.22 | 7.20 | 7.40 | 7.93 | 9.03 | 9.32 | AF |
| p= 5 % (logtransform) | a | a | a | ab | bc | c | |

Im Beispiel in der Tabelle 2.1-3 werden Buchstaben verwendet, um leserlich darzulegen, ob die Entwicklung der beobachteten Parameter zwischen jedem Zyklus signifikant ist ($p = 5\%$). Verschiedene Buchstaben weisen auf einen signifikanten Unterschied hin. Zyklus 1 weicht zum Beispiel nicht signifikant von Zyklus 2, 3 oder 4 ab, jedoch von Zyklus 5 und 6. Zyklus 5 weicht signifikant von den Zyklen 1, 2 und 3 ab, aber nicht vom 4. und 6. Zyklus. Zyklus 6 weicht signifikant von allen anderen Zyklen ausser vom 5. ab.

2.1.2.1.1 Bemerkung

Im vierten und fünften FRIBO-Bericht, die 2007 und 2012 erschienen sind (Rossier & al., 2007 und 2012), wurde die zeitliche Entwicklung der Parameter pro Bodennutzungstyp mit Hilfe des LSD-Tests (Least Significant Difference) geschätzt. Der HSD-Test (Honest Significant Difference) teilt signifikante Unterschiede restriktiver zu. Die Normalisierung der meisten Daten durch logarithmische Transformation ermöglicht jedoch eine aussagekräftigere Anwendung dieser statistischen Tests.

2.1.2.2 Individuelle Analyse jedes Standortes

Die verschiedenen Variablen wurden für jeden Standort analysiert, um zu ermitteln, ob eine Variable signifikant zu- oder abnimmt oder als stabil eingeschätzt werden kann (wenn die beiden vorangehenden Möglichkeiten nicht eintreten). Zur Beantwortung dieser Frage wurde der **Korrelationskoeffizient nach Pearson** angewendet.

Da es keine Wiederholung pro Standort gab, konnte kein klassischer statistischer Test angewendet werden. Stattdessen wurde der statistische Index gewählt, der die Intensität und die Richtung (positiv oder negativ) der linearen Beziehung zwischen zwei quantitativen Variablen ausdrückt. Der Korrelationskoeffizient r gibt die Qualität der linearen Beziehung an. Das negative Vorzeichen zeigt eine negative lineare Beziehung (umgekehrt proportional) und das positive Vorzeichen eine positive Beziehung.

Eine signifikante Korrelation bedeutet, dass die festgestellte Entwicklung auf den Zyklus zurückzuführen ist und nicht an die zufällige Variabilität der Messung, an die Probenahme oder an einen Analysefehler.

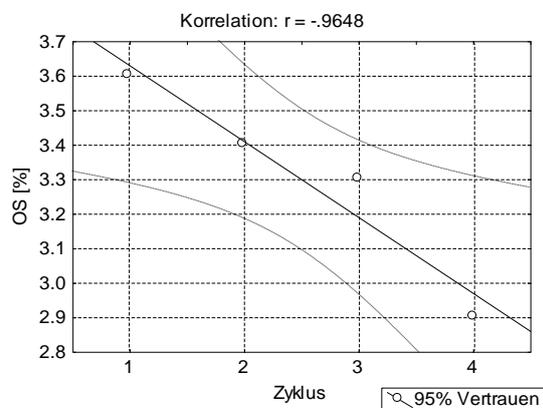


Abbildung 2.1.2-3: Signifikante Korrelation

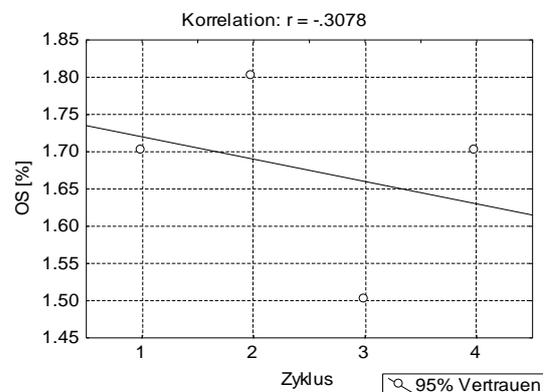


Abbildung 2.1.2-4: Nicht signifikante Korrelation

Ein Wert von -1 oder $+1$ zeigt eine perfekte lineare Korrelation zwischen den beiden Variablen auf. Besteht keine lineare Korrelation zwischen den Variablen, ist dieser Koeffizient gleich 0 ($r = 0$). Je mehr sich die Punkte einer linearen Beziehung annähern (Abbildung 2.1.2-3: Signifikante Korrelation), desto näher liegt der Koeffizient bei -1 oder $+1$. Um einen hohen Korrelationskoeffizienten zu erhalten, muss die Summe der Datenabweichung gegenüber der Regressionslinie (Distanz der Punkte gegenüber der Gerade) möglichst niedrig sein. Zur Ermittlung der Signifikanz einer Entwicklung wurde ein absoluter Grenzwert von 0.95 oder 95% für den Korrelationswert definiert. Das Vertrauensintervall (« 95% Vertrauen») in den oben stehenden Abbildungen definiert ein langfristig auf 5% begrenztes Fehlerrisiko. Je höher die Resultatunsicherheit, desto grösser die Distanz zwischen den Grenzen des Vertrauensintervalls.

Im Beispiel in der Abbildung 2.1.2-3: Signifikante Korrelation liegt der Korrelationskoeffizient bei -0.9648 . Es handelt sich um eine signifikante Korrelation von über 95% . In diesem Beispiel kommt klar zum Ausdruck, dass die für jeden Zyklus aufgrund des Gehalts an organischer Substanz definierten Punkte der linearen Beziehung nahe kommen. Die Abnahme des Gehalts an organischer Substanz an diesem Standort entspricht demnach einer effektiven zeitlichen Entwicklung und unterliegt nicht dem Zufall oder einem analytischen Fehler, im Gegensatz zur Abbildung 2.1.2-4: Nicht signifikante Korrelation. In letzterer liegen die Gehalte an organischer Substanz sehr weit auseinander und nicht auf einer Geraden. Der Korrelationskoeffizient spielt eine wesentliche Rolle für die Beurteilung gewisser Aspekte der Verlässlichkeit, Gültigkeit oder Objektivität eines Beurteilungs- oder Messsystems.

2.2 Resultate

2.2.1 Physische und chemische Bodeneigenschaften

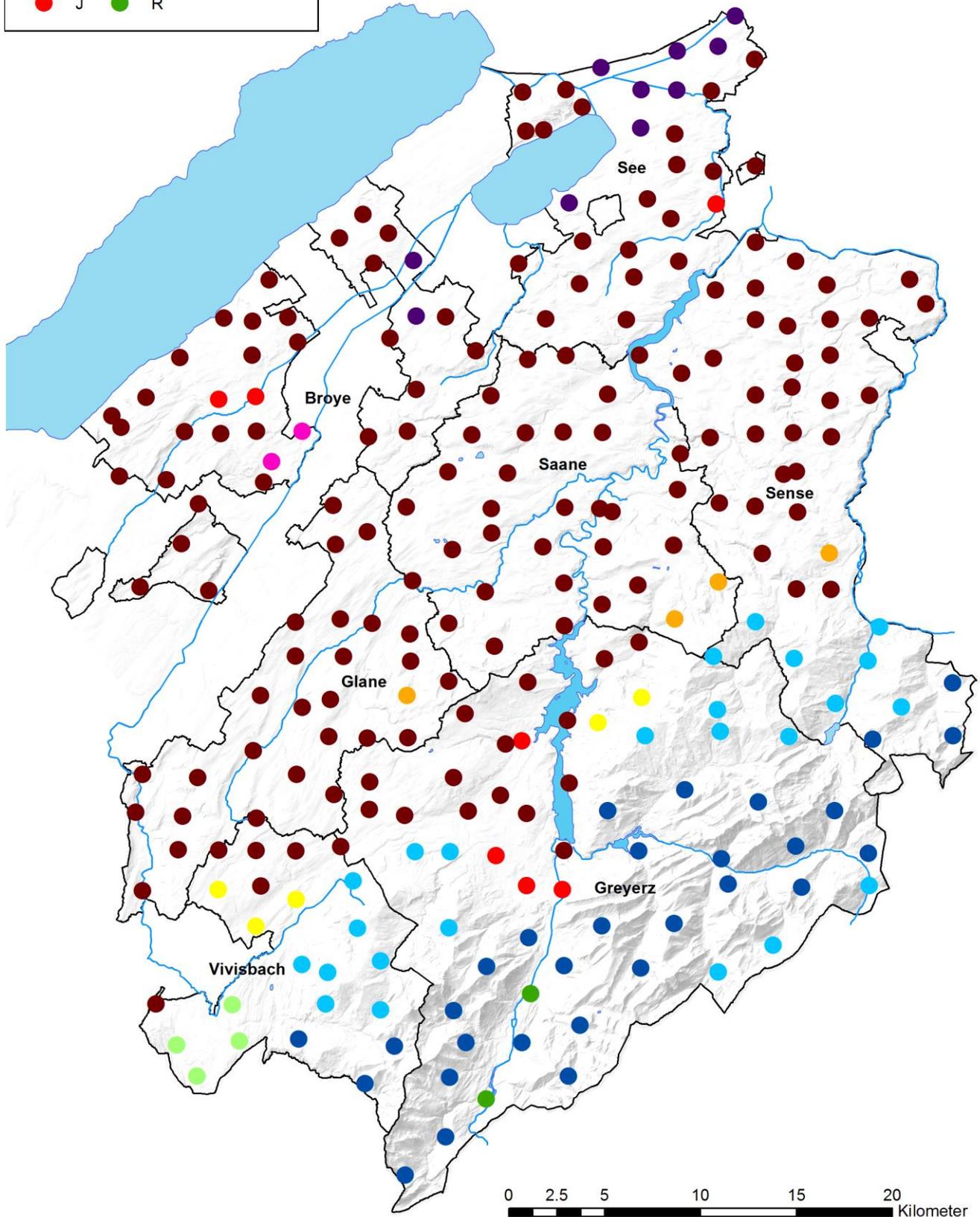
2.2.1.1 Bodentypen

Tabelle 2.2-1 zeigt die physiographischen Klassen, die bei der Bodeneignungskarte der Schweiz (BLW, 1980) angewendet wurden. Die FRIBO-Standorte wurden mit der Häufigkeit ihres Auftretens in zehn Hauptklassen eingeteilt. Die Karte 2.2.1-1: Wichtigste physiographische Klassen der Böden gemäss der Bodeneignungskarte der Schweiz zeigt die Lokalisierung der Hauptklassen im Kanton Freiburg. Der nördliche und der mittlere Kantonsteil zeichnen sich vor allem durch das Vorkommen von niedrigen Molassehügeln aus, die teilweise mit Moränen bedeckt sind. Im Süden des Kantons findet man hauptsächlich alpine Flysch- und Kalklandschaften.

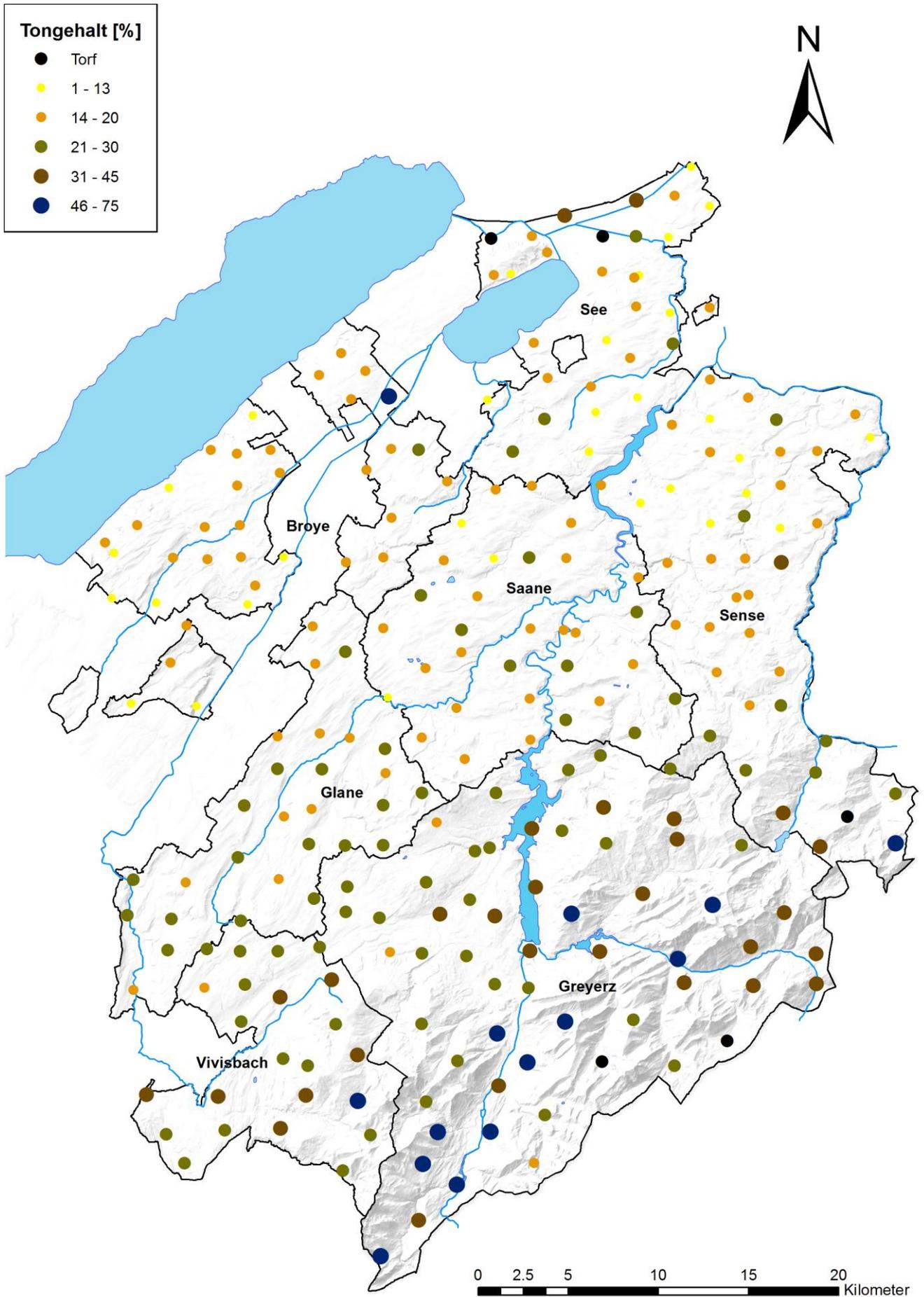
Tabelle 2.2-1: Wichtigste physiographische Klassen gemäss der Bodeneignungskarte der Schweiz

| Klasse | Beschreibung | Häufigkeit im Netz |
|--------|---|-----------------------|
| F | Ebenen des tieferen Mittellandes | 10 Standorte (4.0%) |
| G | Leicht gewelltes Moränenhügelland | 2 Standorte (0.8%) |
| H | Tieferes Molassehügelland mit teilweiser Moränenbedeckung | 162 Standorte (64.8%) |
| J | Sohlentäler des Mittellandes | 7 Standorte (2.8%) |
| K | Mittleres Molassehügelland mit teilweiser glazialer Überformung | 4 Standorte (1.6%) |
| O | Vorwiegend sandige Mollasse am Alpenrand | 5 Standorte (2.0%) |
| P | Vorwiegend Nagelfluh am Alpenrand | 4 Standorte (1.6%) |
| R | Enge Alpentäler | 2 Standorte (0.8%) |
| S | Alpine Flyschlandschaft und Bündnerschiefer, vorwiegend in den nördlichen Alpen | 24 Standorte (9.6%) |
| U | Alpine Kalkberglandschaft | 30 Standorte (12.0%) |

Eine Tabelle sowie detailliertere Erläuterungen finden sich im dritten FRIBO-Bericht (Julien & al. 2002).



Karte 2.2.1-1: Wichtigste physiographische Klassen der Böden gemäss der Bodeneignungskarte der Schweiz



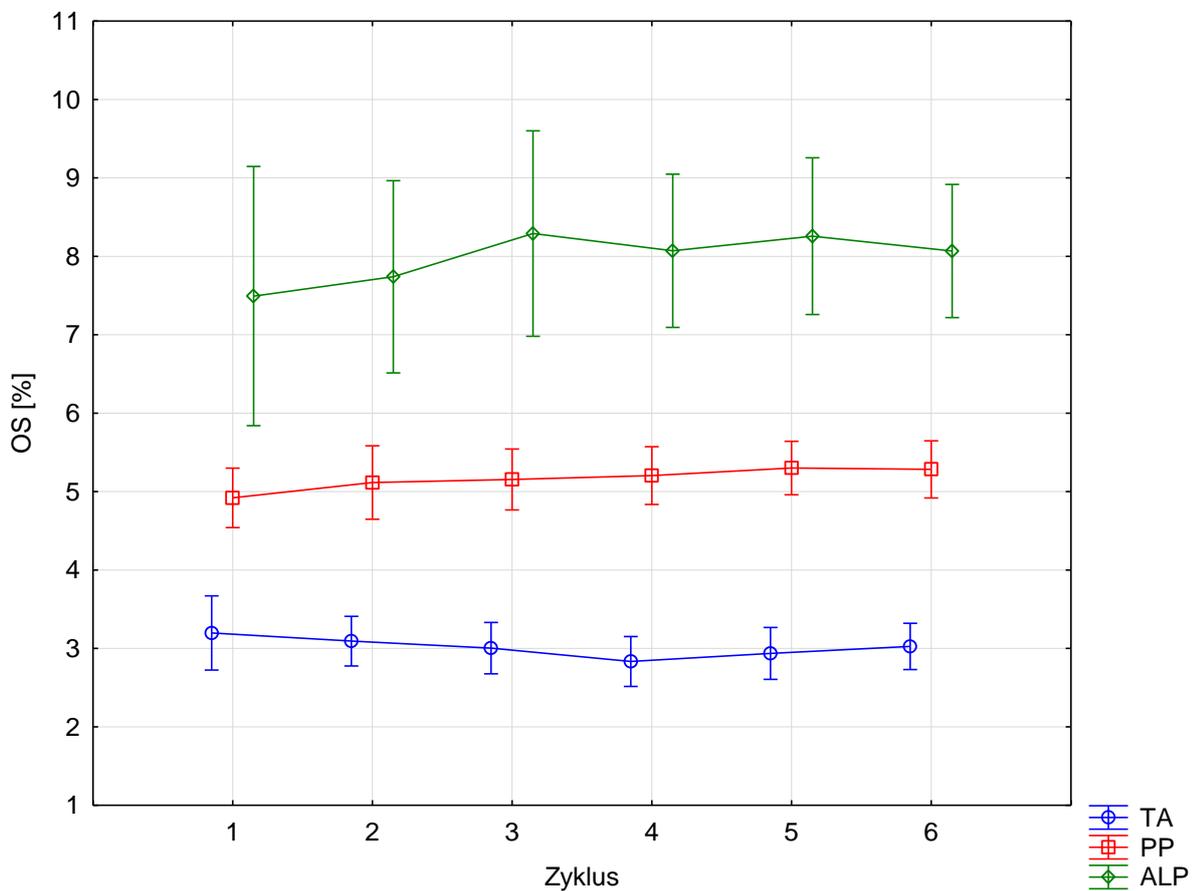
Karte 2.2.1-2: Tongehalt der 250 landwirtschaftlichen Standorte des FRIBO-Netzes

Die Bodenbeschaffenheit variiert stark und folgt einem steigenden Gradienten auf der NW-SO-Achse. Allgemein finden sich die leichtesten Böden im Broyebezirk, im Seebezirk (ausserhalb Grosses Moos) sowie im Norden des Sensebezirks, während sich sehr schwere Böden auf den Alpen in den Regionen Gruyère, Vivisbach und Schwarzsee befinden. Die mittleren Böden liegen grösstenteils im Glanebezirk, im Nordwesten des Greyerzbezirks und im Süden des Sensebezirks. Die Torfgebiete weisen zu hohe Gehalte an organischer Substanz auf, um die Körnung ermitteln zu können. Diese fünf Standorte liegen in den Voralpen und im Grossen Moos.

2.2.1.2 Organische Substanz

Abbildung 2.2.1-1: Allgemeine Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz ermöglicht einen Vergleich der Gehalte an organischer Substanz (OS) der Böden sowie deren Entwicklung in den 30 Erhebungsjahren. Die Gehalte blieben auf den Ackerflächen und Naturwiesen während der sechs Zyklen praktisch identisch. Auf den Alpweiden waren sie in den letzten vier Zyklen leicht höher als in den zwei ersten. Der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz auf den Ackerflächen nahm in den letzten zwei Zyklen zu, wobei jedoch kein signifikanter Unterschied zu beobachten ist.

Die Tabellen mit deskriptiver Statistik zu den Abbildungen im Text finden sich im Anhang.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| AF | 3.20 a | 3.09 a | 3.00 a | 2.83 a | 2.94 a | 3.03 a | Durchschn. OS p= 5 % (logtransform) |
| NW | 4.92 a | 5.12 a | 5.16 a | 5.20 a | 5.30 a | 5.28 a | Durchschn. OS p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 7.49 a | 7.74 a | 8.29 a | 8.07 a | 8.26 a | 8.07 a | Durchschn. OS p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.1-1: Allgemeine Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz

Zur Berücksichtigung der Menge an organischer Substanz im Boden wurden zwei Modelle verwendet. Das erste fusst auf den GRUD (Sinaj & Richner, 2017) und bezieht sich zur Schätzung des potenziell lieferbaren Stickstoffes auf den Humusgehalt des Bodens (Mineralisierung der organischen Substanz).

Das zweite Modell resultiert aus einer Doktorarbeit, in deren Rahmen einige FRIBO-Standorte beprobt und gewisse Daten des Netzes ausgewertet wurden (Johannes et al., 2017). Das Ergebnis dieser Arbeit zeigt, dass die Strukturqualität eines Braunbodens (Cambisol) in der Regel stark positiv korreliert mit dem Verhältnis von organischer Substanz zu Ton. Ein leichter, tonarmer Boden braucht weniger organische Substanz, um eine qualitativ gute Bodenstruktur aufzuweisen, als ein schwerer Boden mit viel Ton. Als ausreichend wird ein Quotient von 17 % betrachtet, und Böden mit weniger als 12 % organischer Substanz sind „schlecht“ einzustufen.

Versorgungspotenzial mit Stickstoff

Im ganzen Kanton sind keine Probleme beim Versorgungspotenzial der Böden mit Stickstoff wegen mangelnder organischer Substanz zu beobachten.

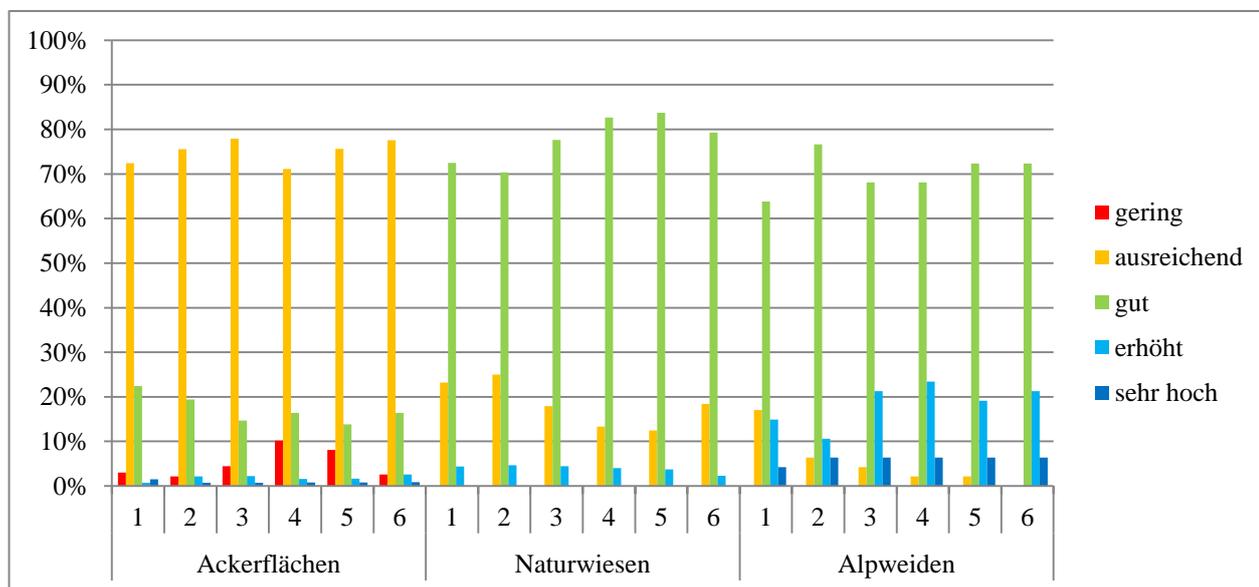


Abbildung 2.2.1-2: Verteilung der Standorte gemäss Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz des Bodens aufgrund des Versorgungspotenzials mit Stickstoff, Modell GRUD 2017

Potenzial der Bodenstruktur

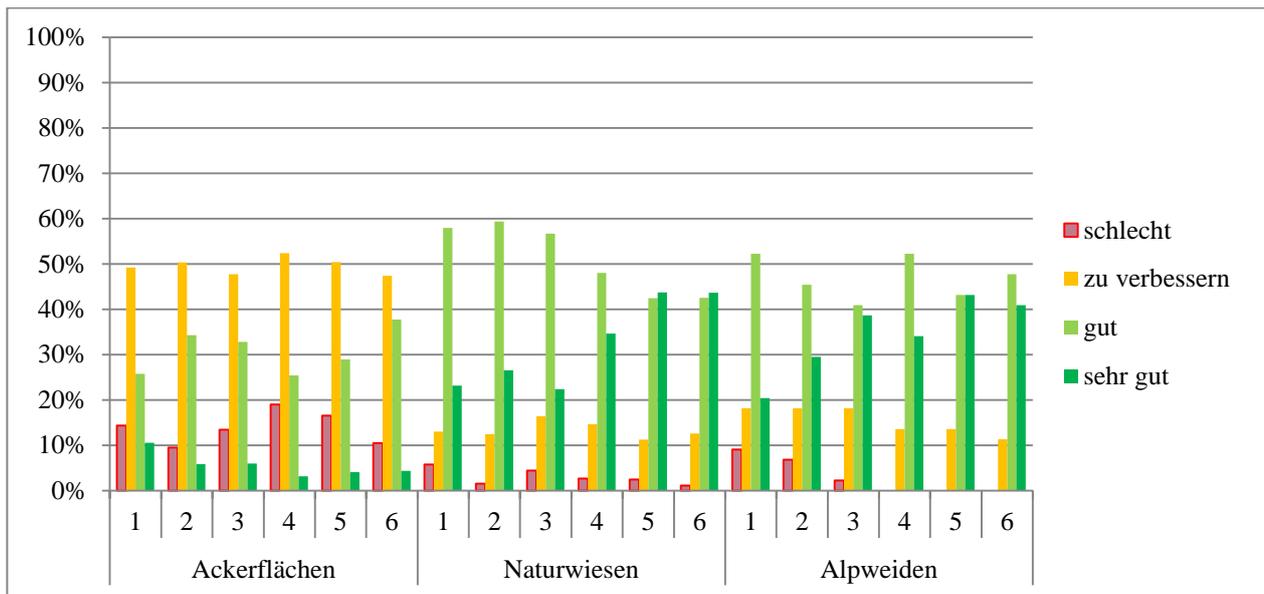
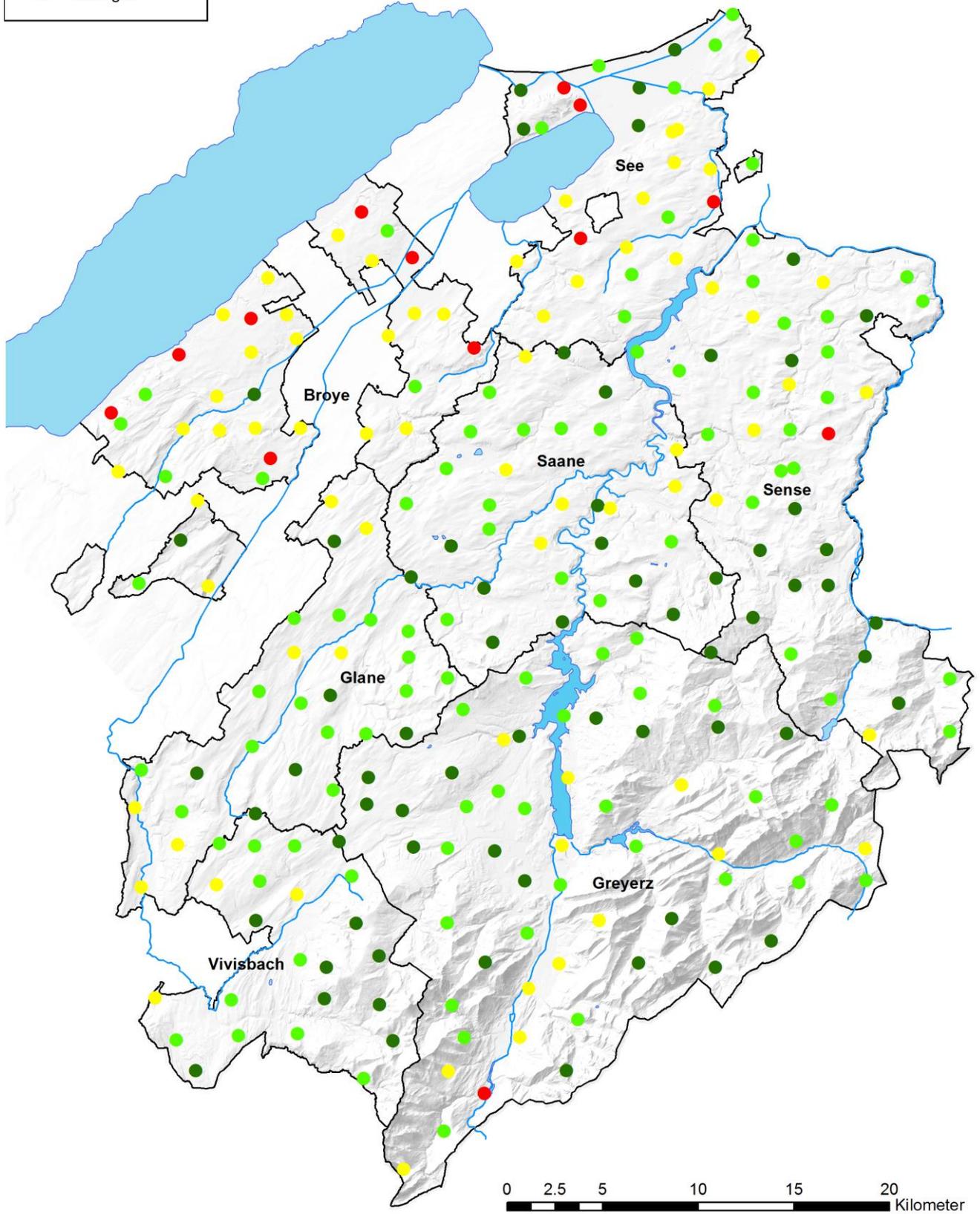


Abbildung 2.2.1-3: Verteilung der Standorte gemäss Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz des Bodens aufgrund des Verhältnisses OS/Ton, Modell STRUDEL

Die Situation ist eher beruhigend: Zurzeit weisen nur 11 % der Ackerflächen des FRIBO-Netzes (12 Standorte) und 1% der Wiesen (1 Standort) einen grossen Mangel an organischer Substanz auf. Bei 47 % der Ackerflächen ist ein leichter Mangel an organischer Substanz zu beobachten, während 38 % gut versorgt sind. 4 % weisen ein sehr gutes Kohlenstoff/Ton-Verhältnis auf, was nur selten zu beobachten ist, wenn der Boden bearbeitet wird. Obwohl etwas mehr als die Hälfte der Böden im Kanton Freiburg einen Mangel an organischer Substanz aufweist, ist die Situation besser als in den Nachbarkantonen (P. Boivin, persönliche Mitteilung), in welchen Ackerflächen mit gutem Niveau selten sind. Dies erklärt sich hauptsächlich mit dem grossen Viehbestand und der weniger stark ausgeprägten Spezialisierung in Freiburg. Über den Hofdünger werden dem Boden grosse Mengen organischer Substanz zurückgeführt und die Kunstdünger spielen eine wichtige Rolle in der Fruchtfolge. Die Durchschnitts- und Medianwerte des Verhältnisses OS/Ton der FRIBO-Ackerflächen liegen bei 0.169 resp. 0.158 ohne Moorböden, was einem ausreichenden Niveau recht nahe kommt.

Die detaillierte Analyse der Standorte mit grossem Mangel an organischer Substanz (Karte 2.2.1-3: Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz gemäss Modell STRUDEL – sechster Zyklus) liefert folgende Erkenntnisse: 12 der 13 betroffenen Standorte sind Ackerflächen und 1 ist eine Dauerwiese in Intyamou. Der Tongehalt des Bodens dieser Dauerwiese ist sehr hoch (ca. 60%) und sprengt die Grenzen der vorliegenden Studie, die sich mit Braunerde auseinandersetzt. 1 Ackerfläche in der Broye weist ebenfalls einen Tongehalt von fast 60 % auf. Acht andere Ackerflächen im Broye- und Seebezirk enthalten Kartoffeln oder Zuckerrüben in der Fruchtfolge, in drei Fällen sogar beide Kulturen. Der tiefe Gehalt an organischer Substanz lässt sich in zwei Fällen nicht mit der Fruchtfolge oder einem aussergewöhnlich hohen Tongehalt erklären. In einem Fall – Fluvisol an der Bibera – handelt es sich um einen Boden aus ziemlich jungem Schwemmland, was die eher tiefen Gehalte an organischer Substanz erklären könnte. Der zweite Fall ist eine Ackerfläche in Hanglage (etwa 18 %), die anfällig auf Verschlammung ist. Die Erosion könnte die Ursache der sehr tiefen Gehalte an organischer Substanz sein.



Karte 2.2.1-3: Beurteilung des Gehalts an organischer Substanz gemäss Modell STRUDEL – sechster Zyklus

Entwicklung pro Standort

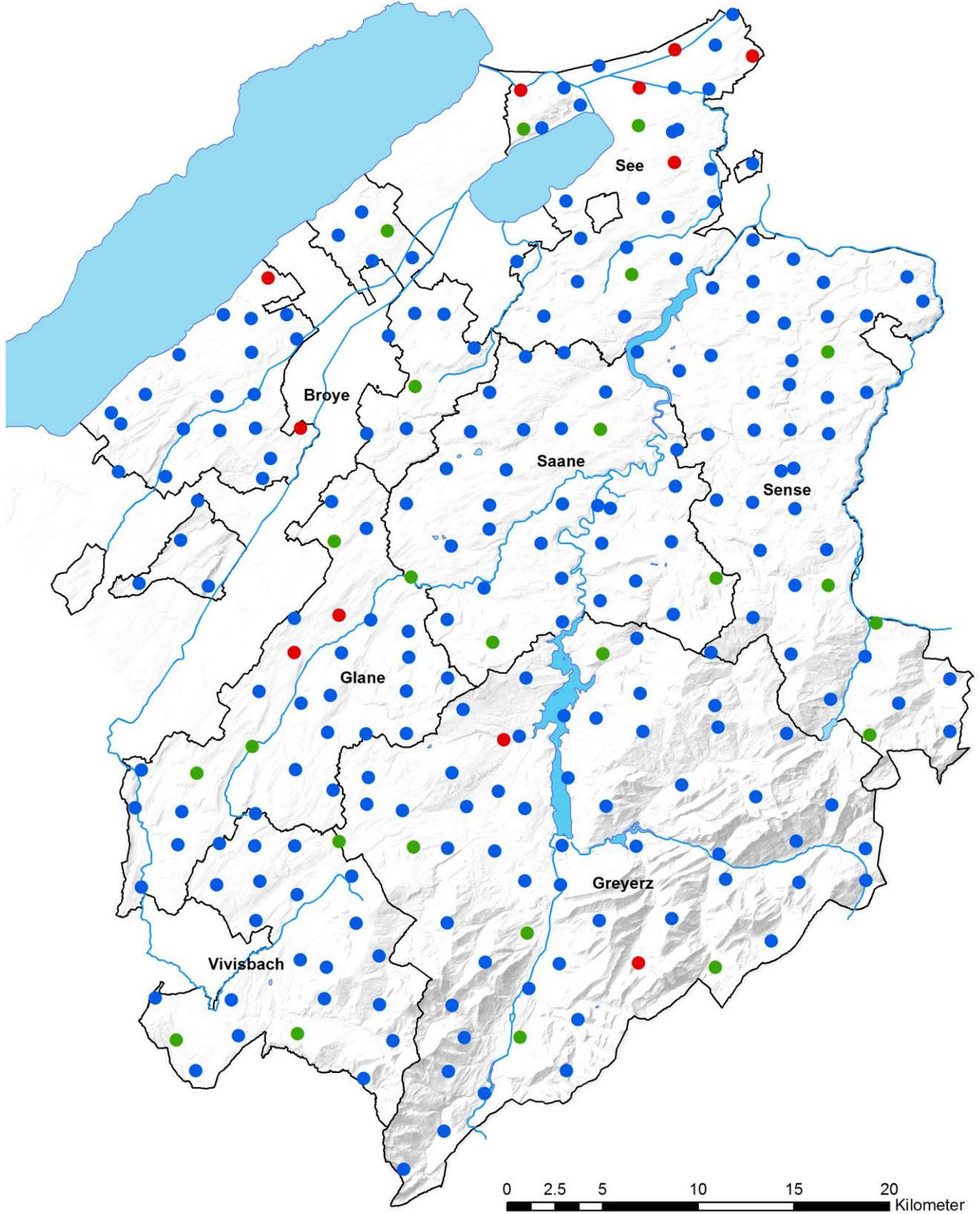
11 Standorte weisen eine Abnahme des Gehalts an organischer Substanz seit Beginn der Beobachtungen vor 30 Jahren auf: 9 Ackerflächen, 1 Naturwiese und 1 Alpweide. Es muss hervorgehoben werden, dass kein Standort mit abnehmendem Gehalt an organischer Substanz aufgrund des Modells von Johannes et al. als «schlecht» bewertet wird (Karte 2.2.1-4: Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz pro Standort während der sechs Zyklen). Im Gegenteil: 4 dieser Standorte – 3 Ackerflächen und 1 Alpweide – besitzen ein optimales Verhältnis OS/Ton. Die drei Ackerflächen liegen im Seeland und werden für Gemüsebau genutzt. Für die Alpweide ist es schwierig, den genauen Grund für den Rückgang zu ermitteln. Er könnte jedoch mit der Drainage der Fläche zusammenhängen.

24 Standorte weisen eine Zunahme des Gehalts an organischer Substanz seit Beginn der Erhebungen auf. Es sind dies 5 Ackerflächen, 17 Naturwiesen und 2 Alpweiden.

Auf den 5 Ackerflächen ist keine allgemeine Tendenz bezüglich Fruchtfolge oder Bodenbeschaffenheit zu erkennen. Die Standorte weisen sowohl wenig intensive (Kunstpflanzen und Getreide) als auch intensive Fruchtfolgen auf (Kartoffeln und Zuckerrüben an zwei Standorten). Diese Feststellung ist beruhigend und zeigt, dass es sogar mit sehr intensiven Fruchtfolgen möglich ist, den Gehalt an organischer Substanz zu erhöhen, wenn dem Boden genügend organische Substanz zurückgeführt wird. Zwei Faktoren können jedoch erklären, warum der Gehalt an organischer Substanz bei solch intensiven Fruchtfolgen zunehmen konnte: Ein Boden ist sehr leicht (8 % Ton), und der andere Boden enthält einen Torfhorizont in der Tiefe (30–40 cm). Sehr wahrscheinlich bringen jedes Jahr Regenwürmer ein wenig organische Substanz aus der Tiefe an die Bodenoberfläche. Den Ackerflächen mit einer Zunahme des Gehalts an organischer Substanz ist gemeinsam, dass sie wenig Verdichtungsanzeichen aufweisen. Informationen über die Mengen verwendeter organischer Bodenverbesserungsmittel könnten auch helfen, solche Zunahmen zu erklären.

Die 17 Naturwiesen, die eine Zunahme des Gehalts an organischer Substanz aufweisen, lassen sich in vier Kategorien einteilen: in Dauerwiesen umgewandelte Ackerflächen oder Obstgärten (5 Standorte); Abflachungen mit Viehhaltung, ersichtlich durch das Vorkommen von Kuhfladen und hohen Phosphorgehalten (4 Standorte); extensive oder wenig intensive Wiesen (2 Standorte); Standorte, für welche es keine besondere Erklärung gibt (6 Standorte).

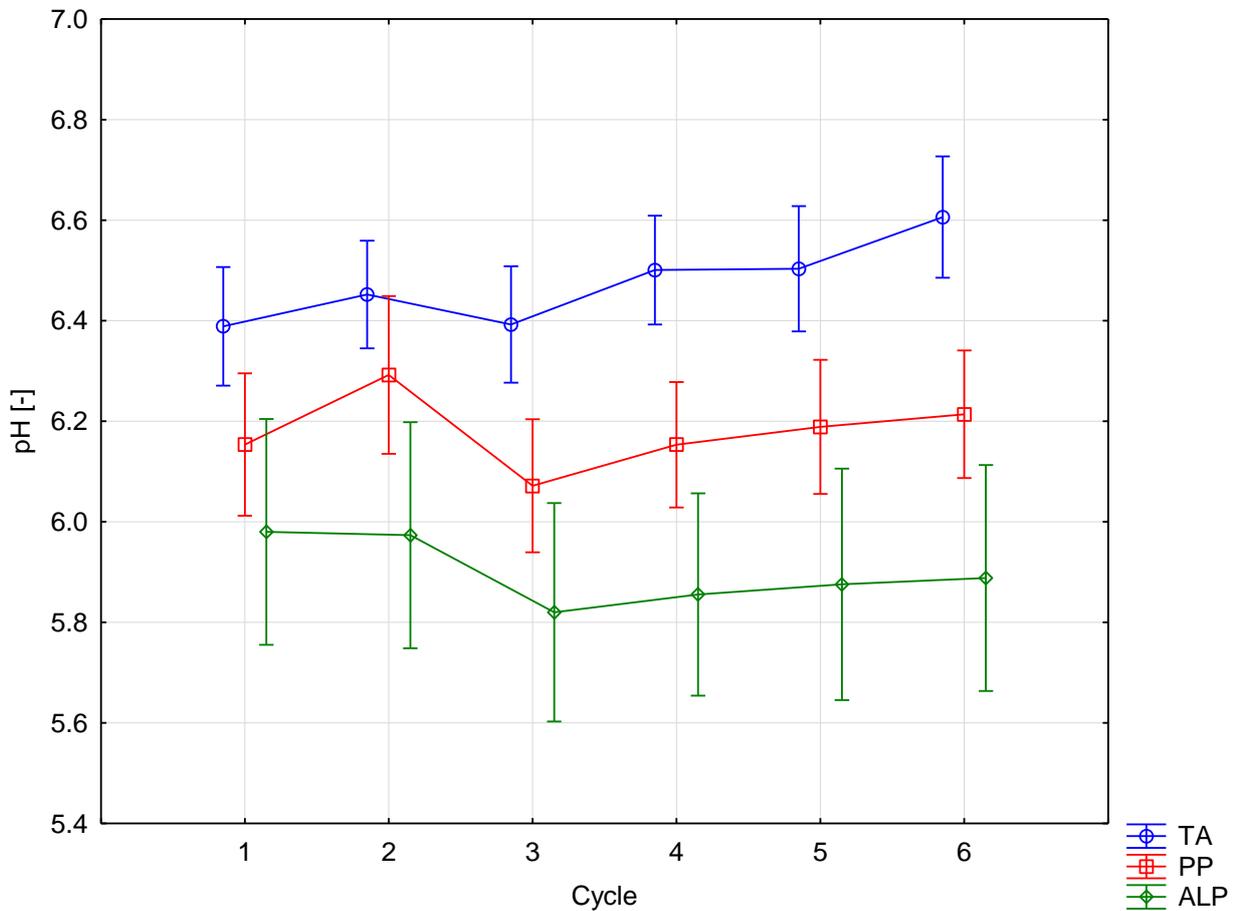
Ausser der Abnahme des Gehalts an organischer Substanz in den Torfböden im Seeland zeichnet sich keine prägende regionale Tendenz ab.



Karte 2.2.1-4: Entwicklung des Gehalts an organischer Substanz pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.1.3 pH

Die Abbildung 2.2.1-4: Allgemeine Entwicklung des pHs zeigt die Veränderung des pHs im Boden während der letzten 30 Jahre.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
| AF | 6.39 a | 6.45 a | 6.39 a | 6.50 a | 6.50 a | 6.61 a | Durchschn. pH p= 5 % |
| NW | 6.15 a | 6.29 a | 6.07 a | 6.15 a | 6.19 a | 6.21 a | Durchschn. pH p= 5 % |
| ALP | 5.98 a | 5.97 a | 5.82 a | 5.86 a | 5.88 a | 5.89 a | Durchschn. pH p= 5 % |

Abbildung 2.2.1-4: Allgemeine Entwicklung des pHs

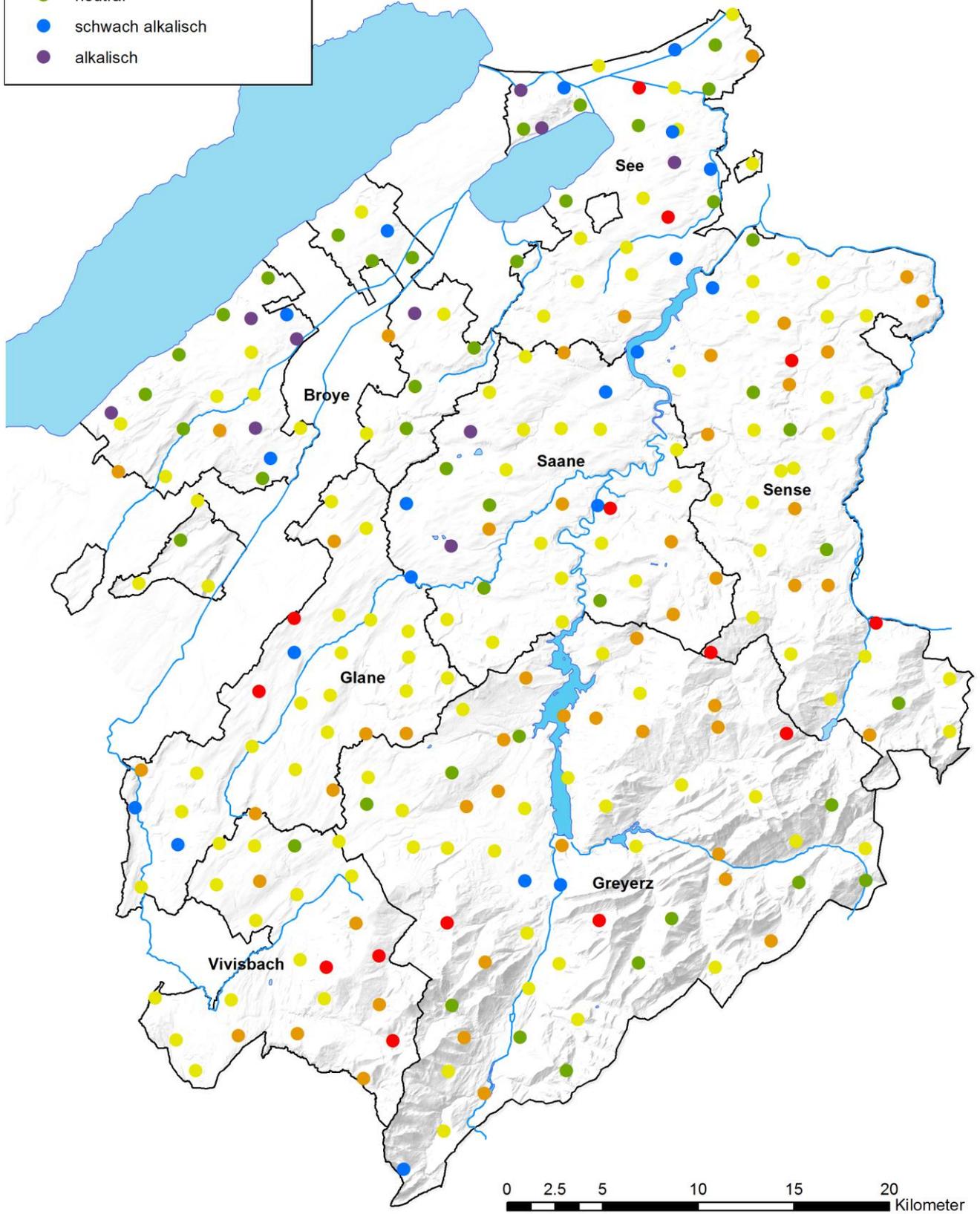
Der mit Wasser extrahierte pH variierte in den drei Bodennutzungstypen nicht signifikant während der sechs Zyklen. Der pH auf Ackerflächen nahm in letzter Zeit zu, aber nicht signifikant. Diese leichte Zunahme könnte sich mit der verbreiteten Verwendung von Kalk erklären.

Nach einer nicht signifikanten Abnahme im dritten Zyklus scheint sich der pH auf den Wiesen nun stabilisiert zu haben. Ein pH von 6.2 erlaubt es, Wiesen mit Klee und Gräsern aufrechtzuerhalten. Der Säuregehalt ist jedoch zu hoch für Mischungen mit Luzerne. Auf Naturwiesen hängt die botanische Zusammensetzung von den natürlichen Bedingungen ab, und der pH ist eine davon.

Der pH auf Alpweiden hat sich ebenfalls stabilisiert, aber auf einem erheblich tieferen Niveau.

Beurteilung des pH-Wertes

- stark sauer
- sauer
- schwach sauer
- neutral
- schwach alkalisch
- alkalisch



Karte 2.2.1-5: Beurteilung des pHs gemäss GRUD-Modell – sechster Zyklus

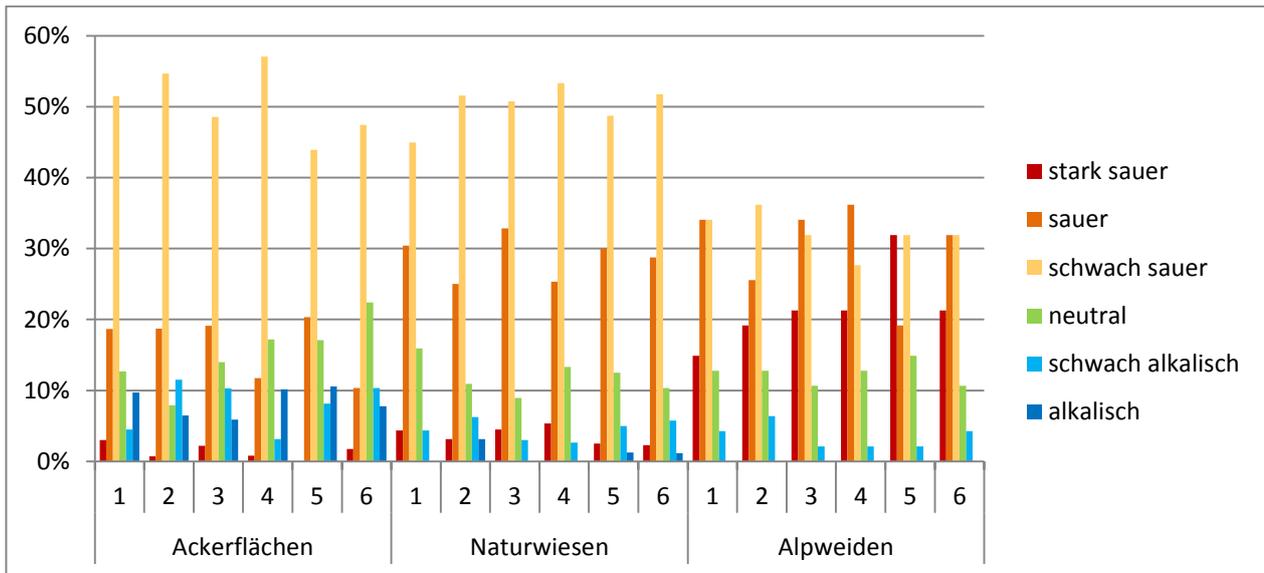


Abbildung 2.2.1-5: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des pH-Wertes gemäss Modell GRUD 2017

Beurteilung gemäss GRUD

Rund 60 % der Ackerflächen besitzen einen sauren oder leicht sauren Boden (pH-Wert < 6.8), und zwar unabhängig vom Zyklus (Abbildung 2.2.1-5: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des pH-Wertes gemäss Modell GRUD 2017), und 12 % der Ackerflächen sind sauer (pH < 5.9). Im sechsten Analysezyklus war der Anteil an sauren Böden kleiner, während derjenige an «neutralen» Böden zunahm. Dies erklärt sich sehr wahrscheinlich mit der Verbreitung der Kalkung auf tendenziell sauren Ackerflächen.

Über 50 % der Naturwiesen sind «sauer» oder «schwach sauer». Ungefähr 25 % werden als «sauer» bezeichnet. Um einen pH aufrechtzuerhalten, der eine ausgeglichene botanische Zusammensetzung ermöglicht, bringen heute viele Landwirte Kalk auf ihre Wiesen aus.

Auf den Alpweiden scheint sich der Anteil an stark sauren Böden bei etwa 30 % stabilisiert zu haben. Aus praktischen Gründen werden diese Böden sehr selten mit Kalk behandelt und sind somit der natürlichen Versauerung durch die Bodenentwicklung ausgesetzt. Die Versauerungstendenz, die zwischen dem 1. und 3. Zyklus beobachtet wurde, ist möglicherweise auf sauren Regen zurückzuführen. Dies ist ein von der Industrie und vom Strassenverkehr verursachtes Phänomen, das man heute insbesondere dank der Einführung der Katalysatoren gut in den Griff bekommen hat.

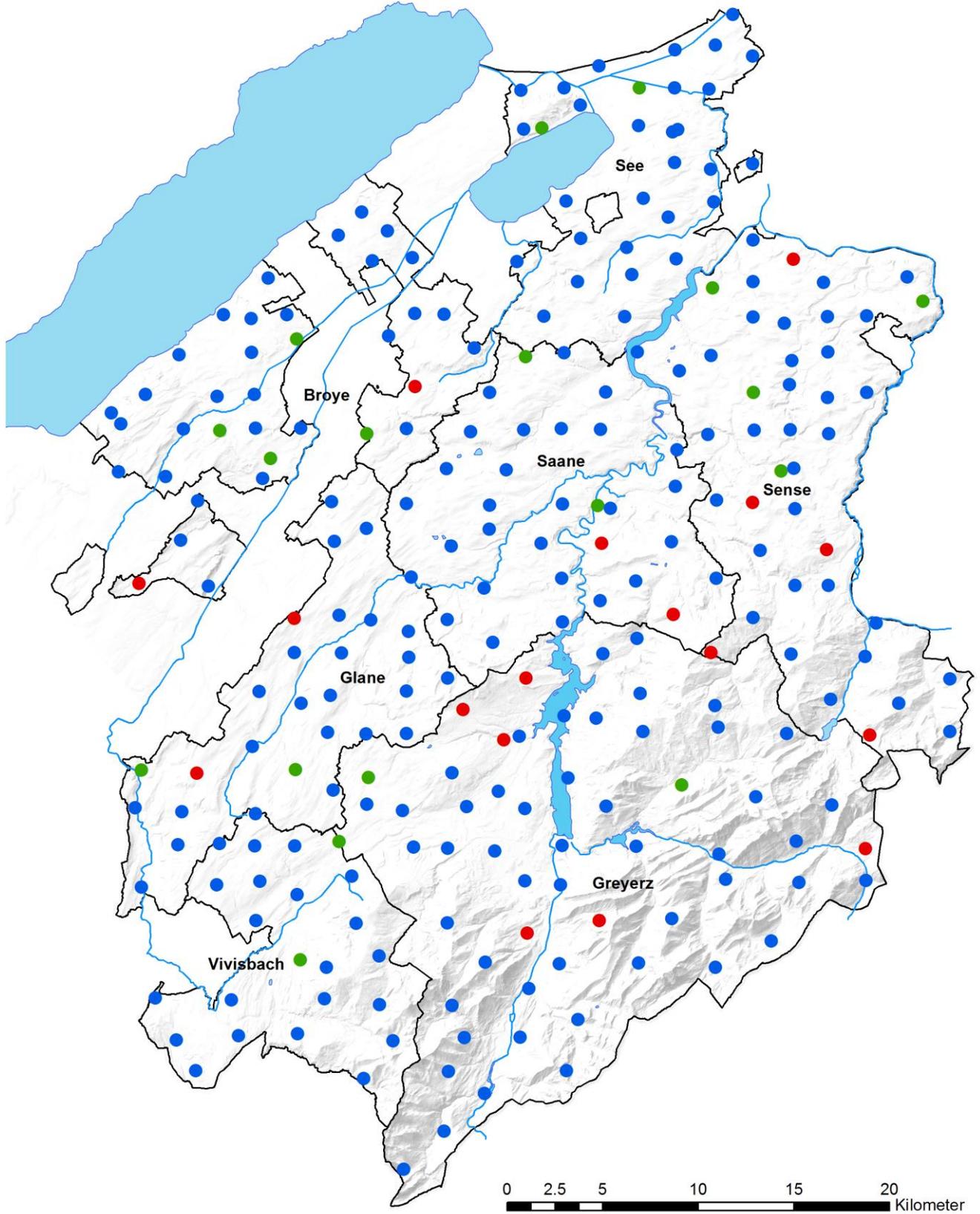
Entwicklung des pHs

Wie auf der Karte 2.2.1-6: Entwicklung des pHs pro Standort während der sechs Zyklen ersichtlich ist, hat der pH an 13 Standorten signifikant abgenommen. Ausser einer Alpweide handelt es sich bei diesen Standorten um Ackerflächen (6) und Naturwiesen (6). Der geringe Anteil an Standorten, die saurer werden, erklärt sich sicherlich mit der regelmässigen Kalkung durch die Landwirte, die sich der Bodenversauerung bewusst sind.

10 Standorte weisen eine Erhöhung des pHs auf. Es sind dies sieben Ackerflächen und drei Dauerwiesen, die in den letzten Jahren mit Kalk behandelt wurden oder Kompost- oder Geflügelmistgaben erhielten, beides Substanzen mit nicht zu vernachlässigender Kalkwirkung.

Entwicklung des pH-Wertes

- Abnahme
- Stabil
- Zunahme



Karte 2.2.1-6: Entwicklung des pHs pro Standort während der sechs Zyklen

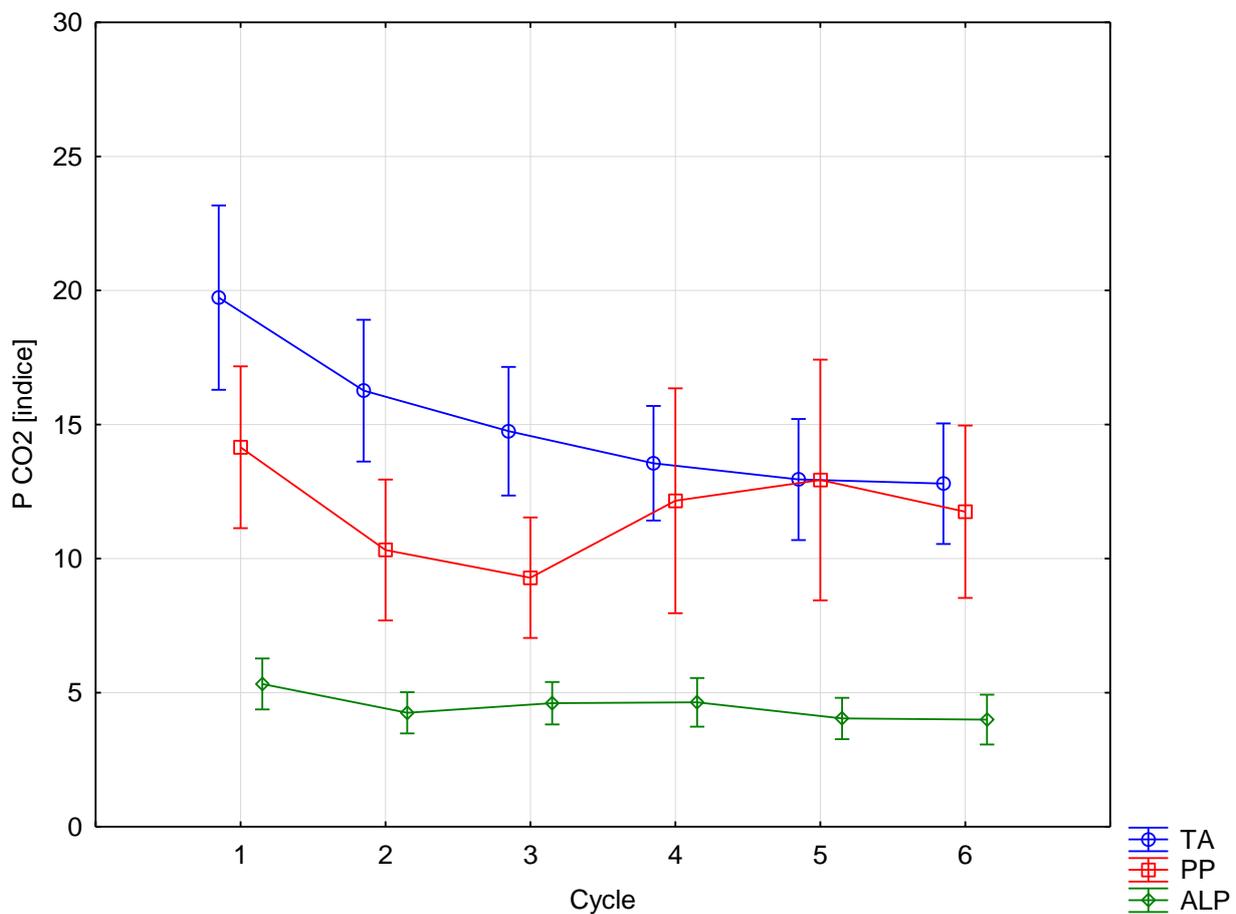
2.2.2 Nährstoffe

Das Bodenbeobachtungsnetz verfolgt die Entwicklung der Düngeelemente im Boden. Dazu werden die Gehalte von vier wesentlichen Nährstoffen analysiert: Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Kalzium (Ca). Der Stickstoff wird über die N_{\min} -Analyse ebenfalls beobachtet, doch diese Resultate werden angesichts ihrer sehr grossen Variabilität je nach Düngung und Wetterbedingungen nicht publiziert.

2.2.2.1 Phosphor

CO₂-Extraktion

Bei der P-Extraktion mit der CO₂-Methode – früher Dirks-Scheffer (DS) genannt – wird eine Bodenprobe (1g) mit 10 ml CO₂-gesättigtem Wasser vermischt. Es handelt sich um eine sogenannt milde Methode, da sie es ermöglicht, nur den gelösten oder sehr schwach an die Kolloide gebundenen P, der also rasch von der Pflanze aufgenommen werden kann, zu extrahieren.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|---|
| AF | 19.74 a | 16.27 ab | 14.75 b | 13.56 b | 12.95 b | 12.80 b | Durchschn. P CO ₂ p= 5 % (logtransform) |
| NW | 14.15 a | 10.32 a | 9.29 a | 12.16 a | 12.93 a | 11.75 a | Durchschn. P CO ₂ p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 5.33 a | 4.25 a | 4.61 a | 4.64 a | 4.04 a | 4.00 a | Durchschn. P CO ₂ p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-1: Allgemeine Entwicklung des mit der CO₂-Methode extrahierten P

Die Abbildung 2.2.2-1: Allgemeine Entwicklung des mit der CO₂-Methode extrahierten P zeigt, dass die Ackerflächen am meisten Phosphor enthalten, gefolgt von den Naturwiesen und den Alpweiden. Die höheren Gehalte

der Ackerflächen erklären sich mit einer stärkeren mineralischen Phosphatdüngung zur Optimierung der Kultureerträge.

Die Gehalte der Ackerflächen haben zwischen dem ersten und den nachfolgenden Zyklen signifikant abgenommen ($p=5\%$, unterschiedliche Buchstaben). Auf den Naturwiesen erfolgte keine signifikante Entwicklung des leicht verfügbaren Phosphors, doch der Durchschnittswert nahm im vierten und fünften Zyklus nach einem Rückgang im zweiten und dritten Zyklus wieder zu. Der Durchschnittswert scheint sich im sechsten Zyklus stabilisiert zu haben. Das Niveau an leicht verfügbarem Phosphor in den Böden der Alpweiden weist zwischen dem ersten und sechsten Zyklus keine signifikante Entwicklung auf ($p=5\%$), doch der Durchschnittswert hat um ca. 25 % abgenommen.

Dieser Rückgang des durchschnittlichen Gehalts an P_{CO_2} ist mit der Einführung des Ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) in Verbindung zu setzen. Die Landwirte müssen seit 1993 die Düngemenge für ihren Betrieb mittels einer Nährstoffbilanz berechnen. Dies führte zu einer Reduktion der mineralischen Düngegaben um 60 % innerhalb von 15 Jahren (BLW, 2006). Die Ackerflächen weisen einen starken Rückgang auf, die Naturwiesen und Alpweiden einen weniger markanten.

Gemäss Frossard & al. (2004) könnten zahlreiche Böden des FRIBO-Netzes ein erhöhtes Risiko für Phosphorverlust durch Auswaschung aufweisen. Die beobachtete Abnahme der Gehalte an löslichem Phosphor dürfte dieses Risiko vermindern und so zu einer besseren Umweltqualität beitragen, indem insbesondere Eutrophierungserscheinungen in den Oberflächengewässern eingeschränkt werden.

Beurteilung gemäss GRUD

Die Gehalte an P_{CO_2} wurden gemäss Interpretationsmodell der GRUD 2017 klassiert, um einzuschätzen, wie reich die Böden an leicht verfügbarem P sind. Zur bestmöglichen Interpretation berücksichtigt das Modell den Tongehalt und den Gehalt an organischer Substanz im Boden. Das gleiche Verfahren wurde für Kalium und Magnesium angewendet.

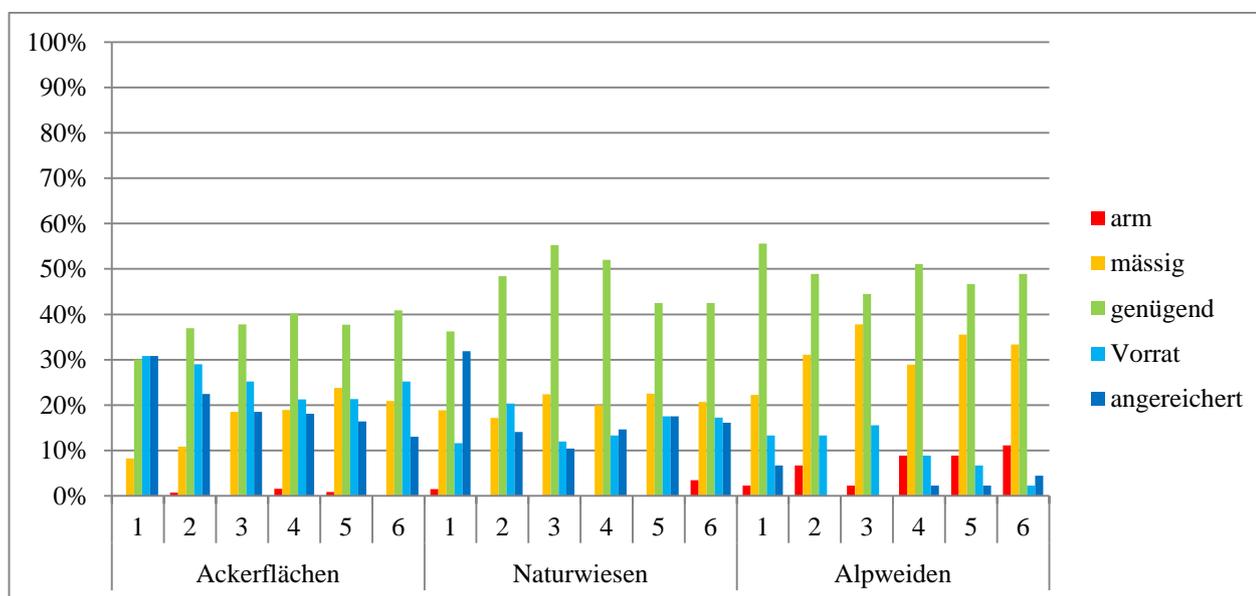


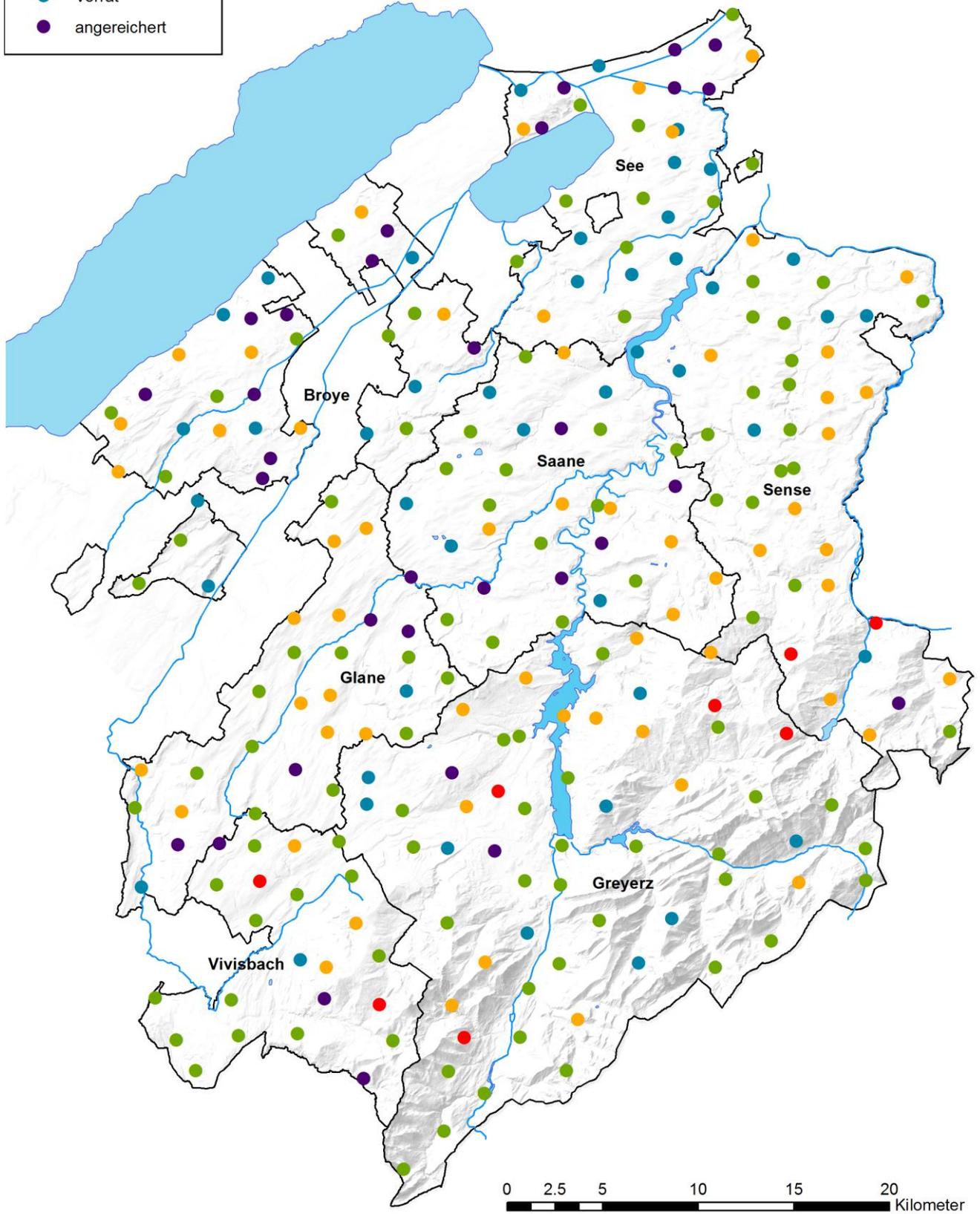
Abbildung 2.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P_{CO_2} gemäss Modell GRUD 2017

Über 40 % der Ackerflächen werden als «zufriedenstellend» eingestuft (Abbildung 2.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P_{CO_2} gemäss Modell GRUD 2017). Die Anzahl der «mittelmässigen» Standorte nahm innerhalb von 30 Jahren zu (von 8 auf 21 %), im Gegensatz zu den Klassen «reich» und «sehr reich» (von 60 auf 38 %). Diese Entwicklung erklärt sich sehr wahrscheinlich mit der Einführung des ÖLN. Sie kann auch auf die

Erhöhung der Phosphatdünger-Preise zurückgeführt werden: Das Verhältnis des Preises für 1 Tonne Phosphat zum Preis für 1 Tonne Weizen betrug 1988 0.22 und 2016 ca. 0.7 (indexmundi, 2018).

Vor dem 4. Zyklus wurden mehr als die Hälfte der Standorte auf Naturwiesen als «genügend» bezeichnet. Während des letzten Beprobungszyklus nahm die Anzahl der auf «Vorrat» und «mässig» versorgten Standorte zu Lasten der «genügenden» Böden zu. Im dritten Zyklus wurde ein optimaler Gehalt an verfügbarem P in den Wiesen erreicht, wobei 55 % der Naturwiesen als «genügend» eingestuft waren. Dies zeigt, dass es noch heute wichtig ist, auch auf den Dauerwiesen regelmässig Bodenanalysen durchzuführen und die Resultate im Rahmen der landwirtschaftlichen Beratung zu nutzen. Über ein Drittel der Standorte im Sömmerungsgebiet befinden sich in der Klasse «mässig».

Allgemein finden sich zufriedenstellende Gehalte an P CO₂ in den meisten Bezirken und im ganzen Kanton (Karte 2.2.2-1: Beurteilung des Gehalts an P CO₂ – sechster Zyklus). Die reichsten Böden liegen mehrheitlich im See- und Broyebezirk sowie in minderer Masse im Saanebezirk. Die hohen Gehalte an P CO₂ erklären sich mit intensiveren und stärker gedüngten Kulturen oder Wiesen.

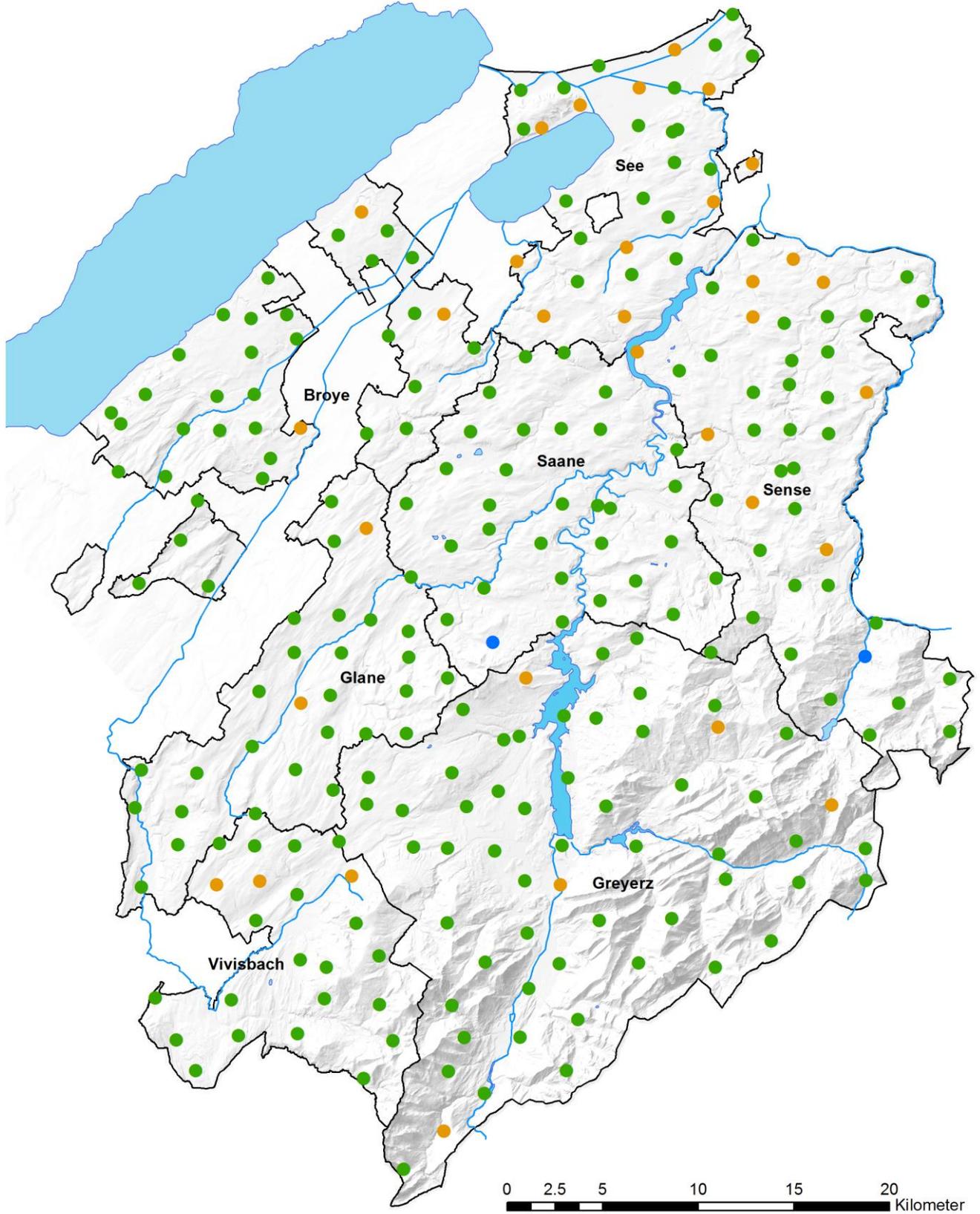


Karte 2.2.2-1: Beurteilung des Gehalts an P CO₂ – sechster Zyklus

Entwicklung pro Standort

Die 33 Standorte mit einer signifikanten Abnahme des Gehalts an P CO₂ sind folgendermassen aufgeteilt: 23 Ackerflächen, 6 Naturwiesen und 4 Alpweiden. Der Rückgang des P CO₂ erfolgte linear während mehreren Jahren. Diese zahlreichen Standorte mit signifikant abnehmendem Gehalt bestätigen den Rückgang der Durchschnittswerte; ihre Anzahl nahm gegenüber dem vorangehenden Zyklus zu (33 gegenüber 25 am Ende des 5. Zyklus).

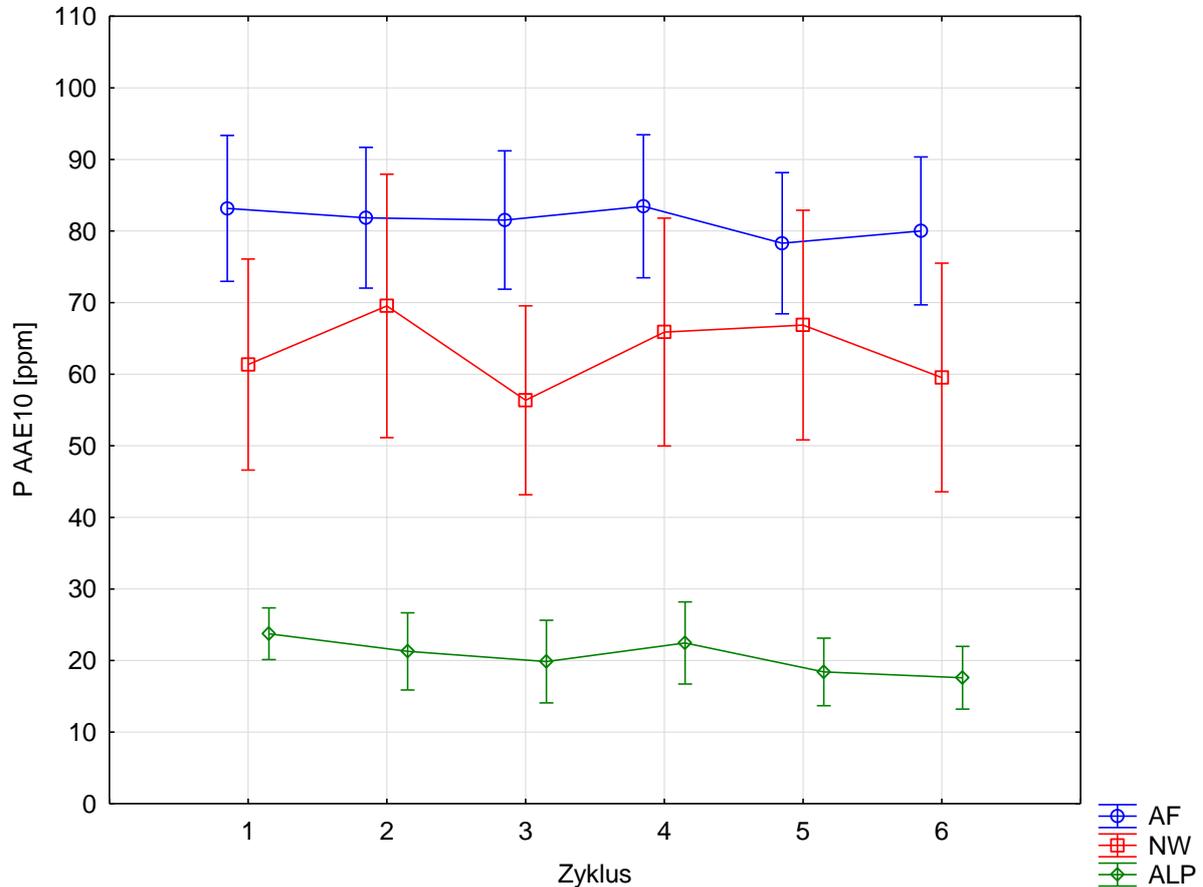
Zwei Standorte auf Naturwiesen zeigten eine signifikante Zunahme.



Karte 2.2.2-2: Entwicklung des Gehalts an P CO₂ pro Standort während der sechs Zyklen

AAE10-Extraktion (Ammoniumacetat + EDTA)

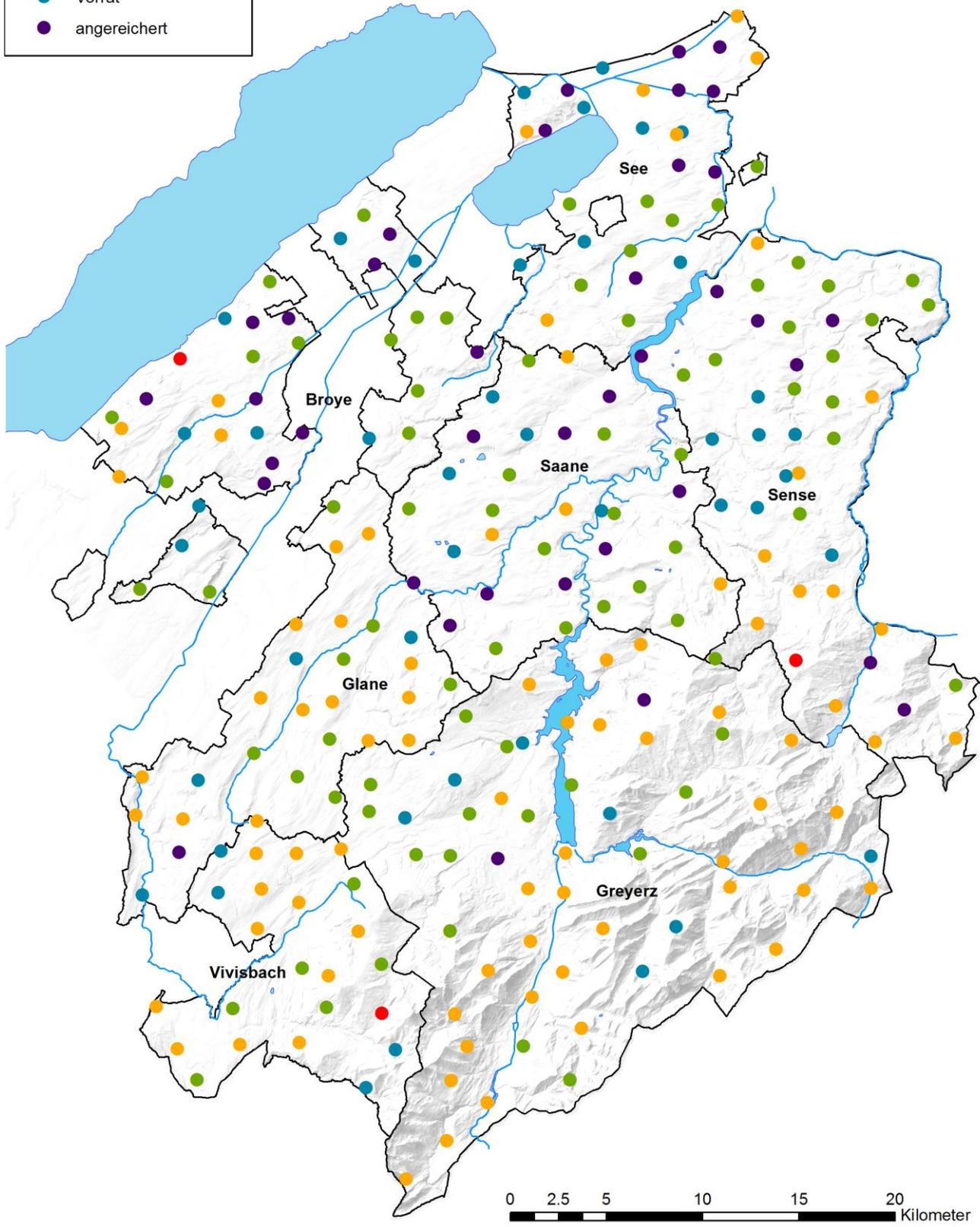
Zur Messung der P-Menge im Boden kommt noch eine zweite Extraktionsmethode zur Anwendung. Dabei wird eine Lösung aus Ammoniumacetat und EDTA im Verhältnis 1:10 (AAE10) verwendet. Mit dieser Methode kann der mittelfristig verfügbare Phosphor extrahiert werden, also der Phosphor, welcher der Pflanze während der Wachstumsperiode zur Verfügung steht. Die extrahierte Phosphormenge ist grösser als mit der CO₂-Methode.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|---|
| AF | 83.16 a | 81.85 a | 81.53 a | 83.46 a | 78.30 a | 80.02 a | Durchschn. P AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| NW | 61.36 a | 69.54 a | 56.36 a | 65.89 a | 66.86 a | 59.53 a | Durchschn. P AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 23.74 a | 21.28 ab | 19.86 ab | 22.45 ab | 18.41 b | 17.60 b | Durchschn. P AAE10 p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-3: Allgemeine Entwicklung des mit der P AAE10-Methode extrahierten P

Wie bereits das CO₂-Verfahren zeigt die AAE10-Methode, dass die Ackerflächen am meisten und die Alpenweiden am wenigsten P enthalten (Karte 2.2.2-3: Beurteilung des Gehalts an P AAE10 – sechster Zyklus). Die statistische Analyse weist auf keine Anreicherung oder Verarmung an P AAE10 auf den Ackerflächen und Naturwiesen hin. Gemäss den Resultaten hat jedoch die Menge an «Reserve-P» in den Alpweidenböden ab dem fünften Zyklus signifikant abgenommen. Dies entspricht der Einführung des Verbots von Düngemiteleinträgen im Sömmerungsgebiet. Da jedoch keine signifikante Abnahme des bereits tiefen P CO₂ daraus resultierte, ist bezüglich des Ertrags der Weiden wenig zu befürchten. Eine Studie von Agroscope (Roger et al., 2013), die mit Proben des FRIBO-Netzes durchgeführt wurde, wies für die Alpweidenböden hohe Phosphor-Gesamtwerte nach. Der grösste Teil des Gesamtphosphors ist an die mineralischen Bodenelemente gebunden und steht den Pflanzen nicht zur Verfügung. Nur eine intensive Aktivität der Bodenorganismen kann diesen Phosphor für die Pflanzen verfügbar machen.



Karte 2.2.2-3: Beurteilung des Gehalts an P AAE10 – sechster Zyklus

Beurteilung gemäss GRUD

Die meisten Standorte auf Ackerflächen finden sich in der Klasse «genügend» (Abbildung 2.2.2-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P AAE10 gemäss Modell GRUD 2017). Diese Klasse nimmt seit dem dritten Zyklus zulasten der Klasse «Vorrat» zu.

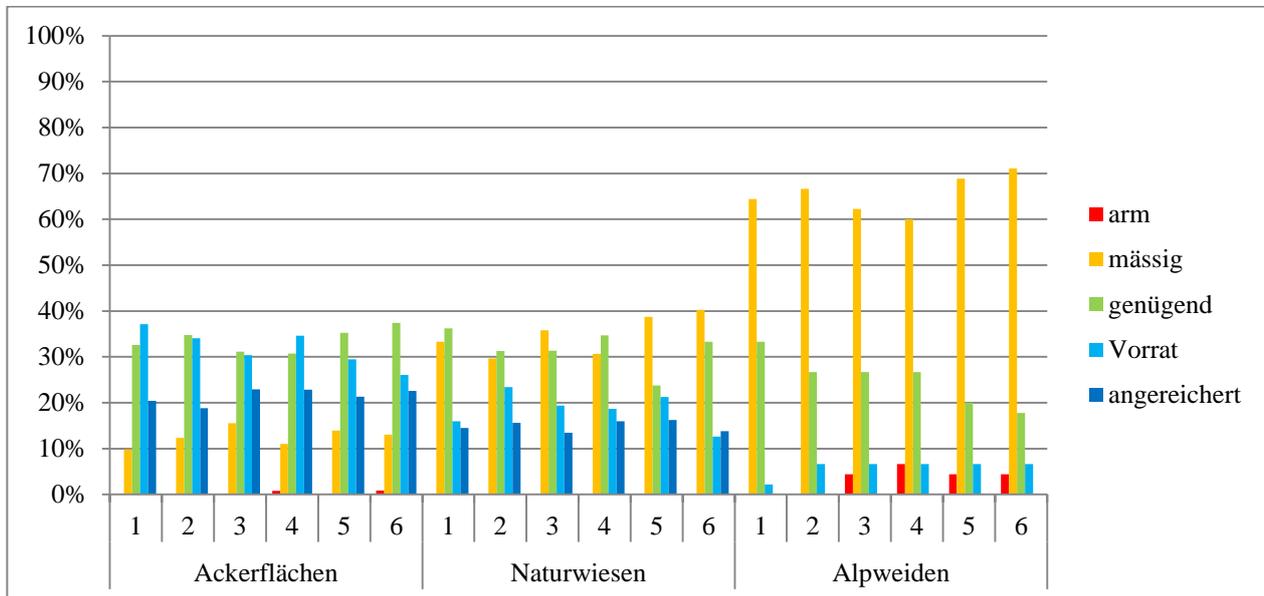


Abbildung 2.2.2-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

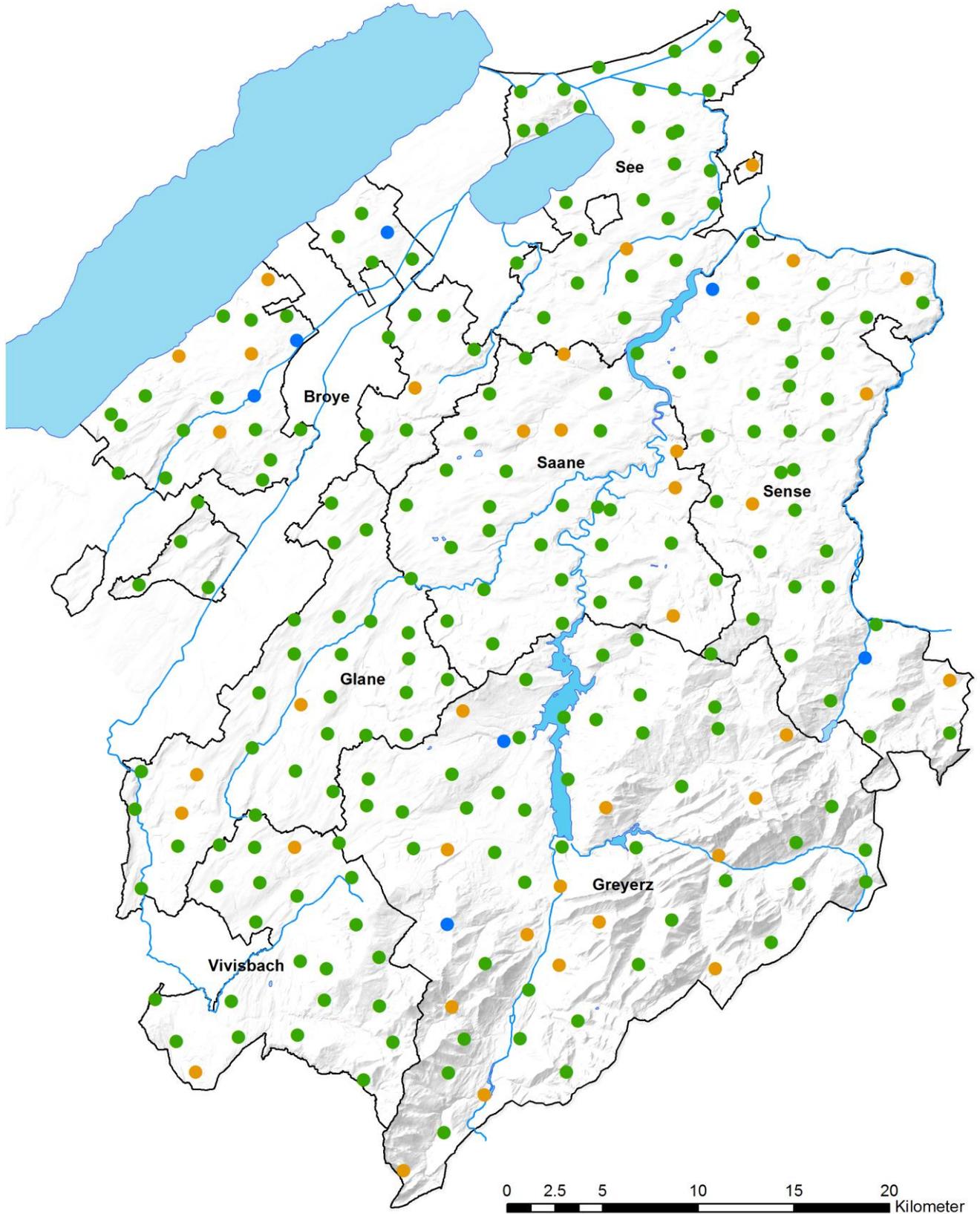
Über ein Drittel der Standorte auf Ackerflächen wird als «genügend» bewertet. Der Anteil der auf «Vorrat» versorgten und «angereicherten» Standorte ist ebenfalls hoch und beträgt 26 resp. 23 %. Rund 30 % der Standorte auf Naturwiesen werden als «genügend» und etwa 40 % als «mässig» eingestuft. Schliesslich gelten über 70 % der Standorte auf Alpweiden als «mässig».

Die Karte 2.2.2-3: Beurteilung des Gehalts an P AAE10 – sechster Zyklus zeigt, dass Böden mit mittelmässigen Gehalten im ganzen Kanton zu finden sind, allerdings hauptsächlich auf den Alpweiden und in minderer Masse auf den Naturwiesen. Im Norden, wo sich die Ackerflächen zur Hauptsache befinden, sind die Standorte mehrheitlich reich oder sehr reich. Betroffen sind der See-, der Broye- und der Saanebezirk.

Entwicklung pro Standort

Die 38 Standorte, die eine signifikante Abnahme des P AAE10 aufweisen, sind im ganzen Kanton verteilt, aber liegen weniger im See- und Vivisbachbezirk (Karte 2.2.2-4: Entwicklung des Gehalts an P AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen). Sie sind folgendermassen aufgeteilt: 17 Ackerflächen, 13 Naturwiesen und 8 Alpweiden.

Sieben Standorte weisen eine signifikante Zunahme des Gehalts an P AAE10 auf, und zwar 2 Ackerflächen, 4 Naturwiesen und 1 Alpweide. Es handelt sich in den meisten Fällen um intensive Weiden in der Nähe von Bauernhöfen oder um stark gedüngte Ackerflächen.



Karte 2.2.2-4: Entwicklung des Gehalts an P AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen

Wichtige Punkte

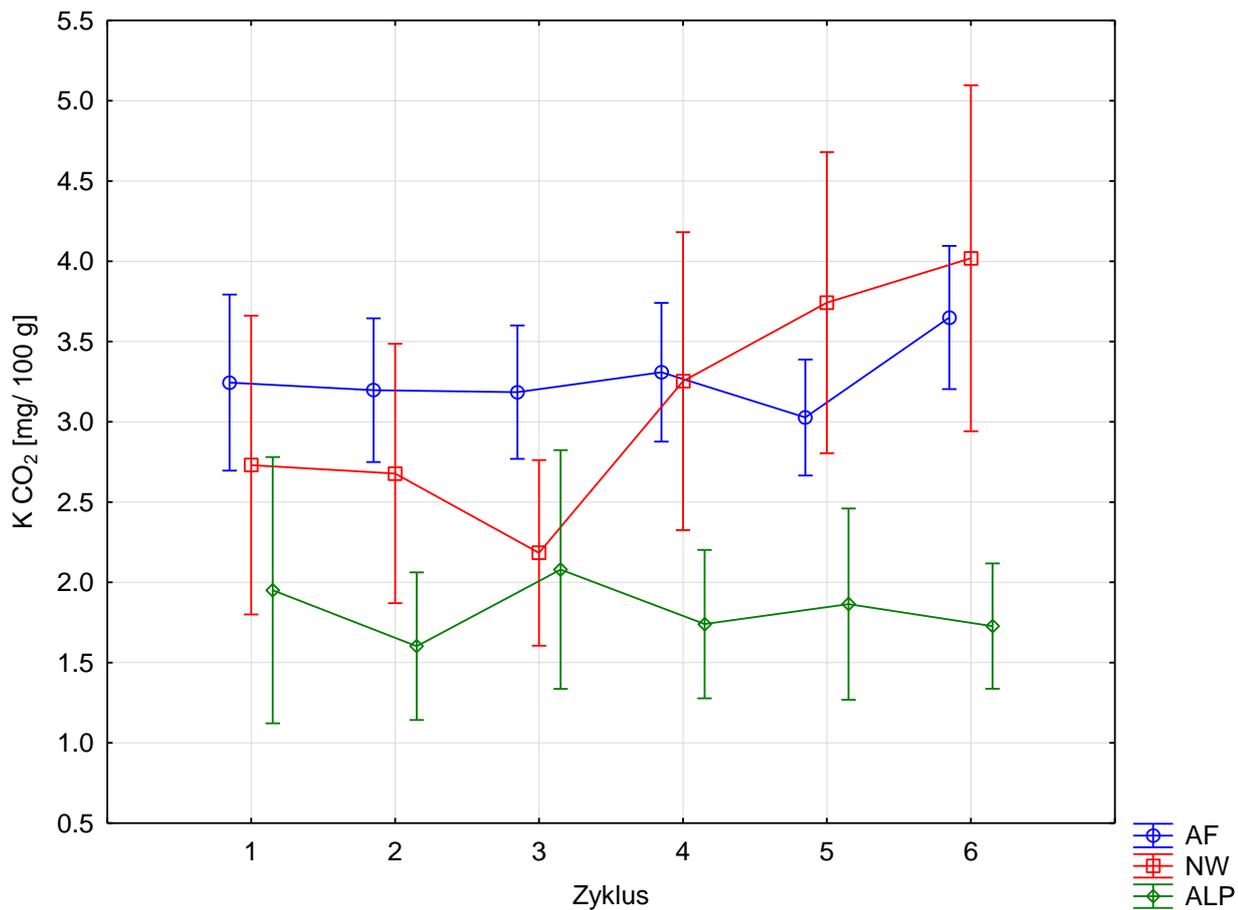
Der Phosphorgehalt der Ackerflächen im Kanton Freiburg hat beim P CO₂ abgenommen, ist aber beim Reserve-Phosphor P AAE10 stabil geblieben. Diese Entwicklung erklärt sich mit der Düngungsreduktion seit der Einführung des ÖLN. Leicht verfügbare Dünger wie phosphathaltige Handelsdünger werden weniger eingesetzt. Dies verursachte ein Rückgang der Menge an leicht verfügbarem Phosphor (P CO₂), hatte aber keine negativen Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, da die Reserven (P AAE10) praktisch unverändert blieben.

Die Einführung des ÖLN verursachte eine Abnahme des Gehalts an P, der für die Pflanzen leicht verfügbar, aber ebenso leicht auswaschbar ist. Dies hatte hingegen keine Auswirkungen auf die Bodenreserven. Somit ist die Entwicklung also positiv, da sie die Qualität des Wassers und Ökosystems fördert, ohne die landwirtschaftlichen Erträge zu mindern.

2.2.2.2 Kalium

CO₂-Extraktion

Der Gehalt an löslichem Kali bleibt auf den Ackerflächen im Verlauf der Zeit ziemlich stabil (Abbildung 2.2.2-5: Allgemeine Entwicklung des mit der CO₂-Methode extrahierten K). Auf den Naturwiesen wird zwischen dem dritten und sechsten Zyklus eine nicht signifikante Zunahme des Durchschnittswerts um 84 % festgestellt. Der Gehalt in den Alpweidenböden ist stabil.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|
| AF | 3.24 a | 3.20 a | 3.18 a | 3.31 a | 3.03 a | 3.65 a | Durchschn. K CO ₂ p= 5 % (logtransform) |
| NW | 2.73 a | 2.68 a | 2.18 a | 3.25 a | 3.74 a | 4.02 a | Durchschn. K CO ₂ p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 1.95 a | 1.60 a | 2.08 a | 1.74 a | 1.86 a | 1.73 a | Durchschn. K CO ₂ p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-5: Allgemeine Entwicklung des mit der CO₂-Methode extrahierten K

Beurteilung gemäss GRUD

Die meisten Standorte werden für die drei Nutzungstypen als «mässig» oder «genügend» eingestuft (Abbildung 2.2.2-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO₂ gemäss Modell GRUD 2017).

Die Anzahl Standorte auf Ackerflächen, die als «Vorrat» und «mässig» bewertet werden, ist seit dem dritten Zyklus ziemlich stabil, doch man stellt eine Zunahme der «genügend» und auf «Vorrat» versorgten Standorte fest. Auf Naturwiesen geht die Anzahl «mässiger» Standorte zurück, während die «angereicherten» Standorte in den letzten vier Zyklen erheblich zunehmen.

Auf den Alpweiden nehmen die «mässigen» Standorte zugunsten der «genügend» versorgten Standorte ab.

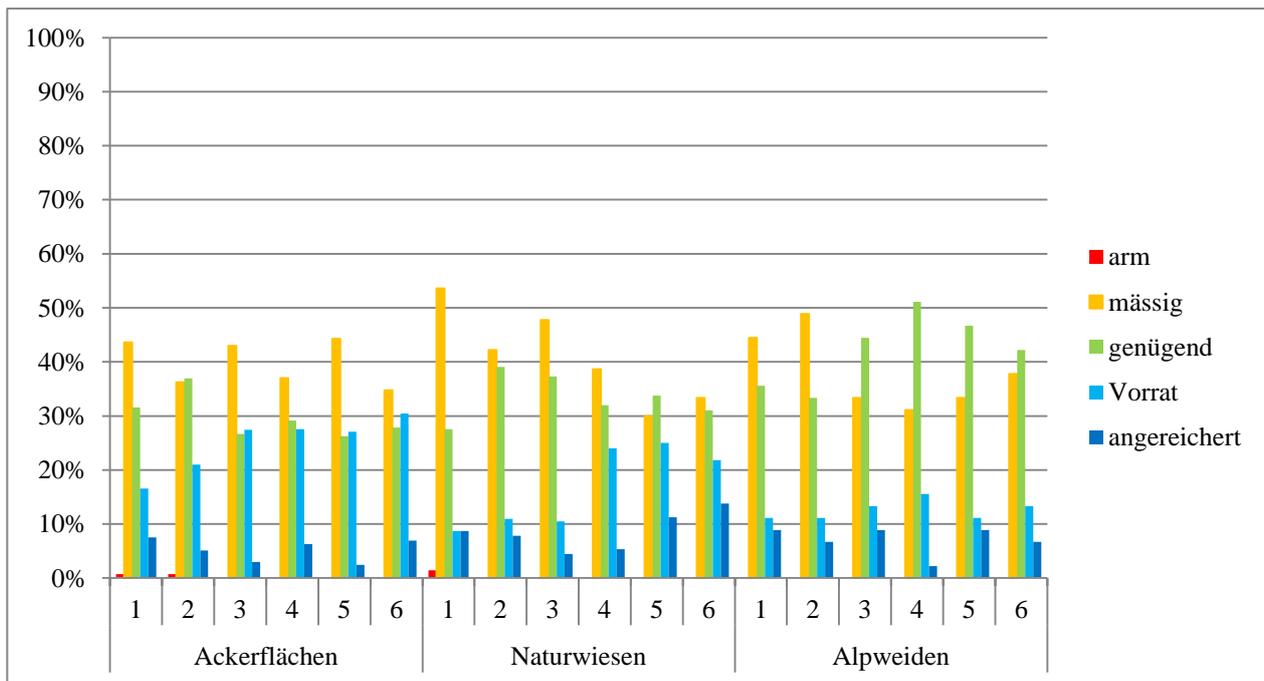
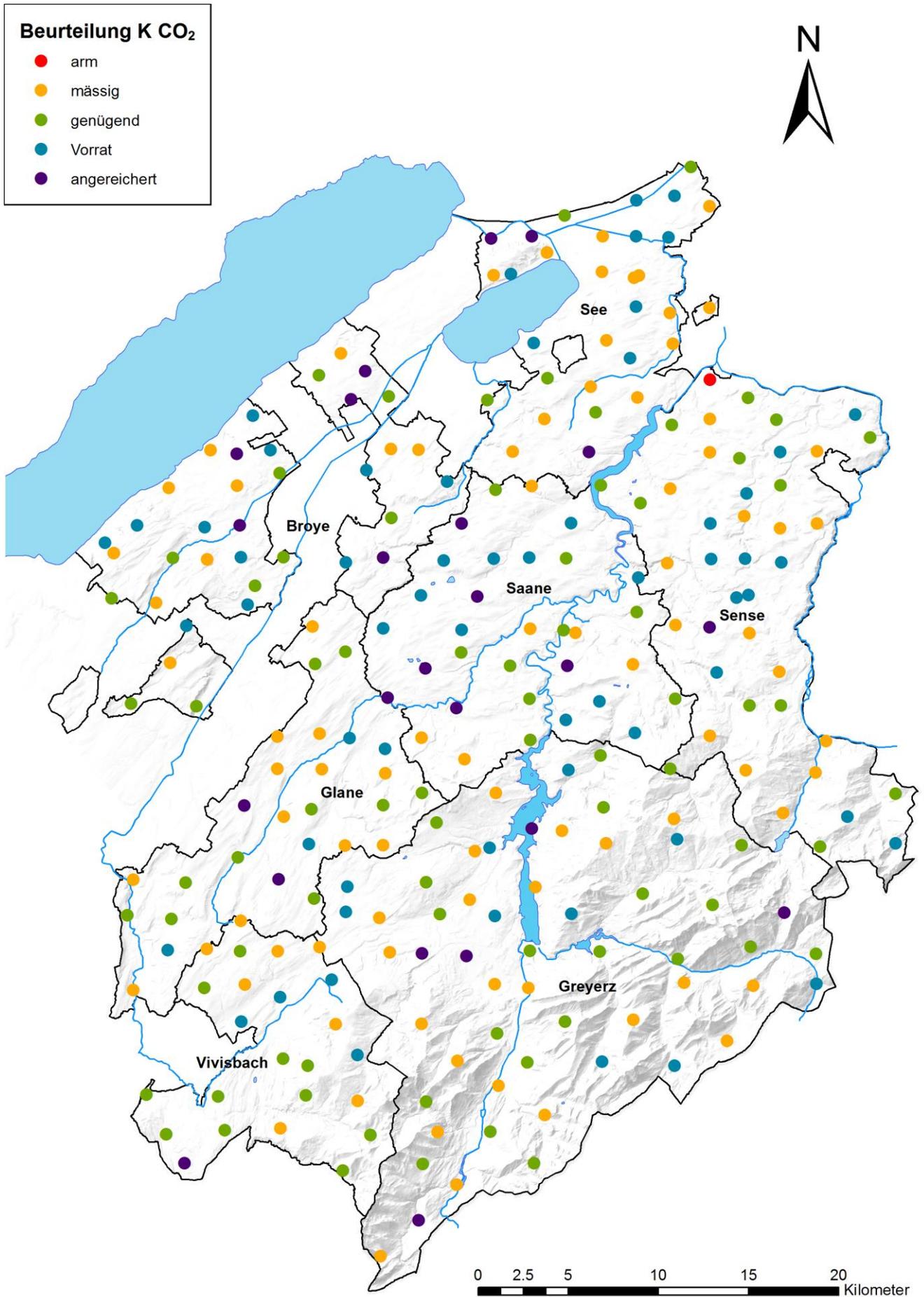


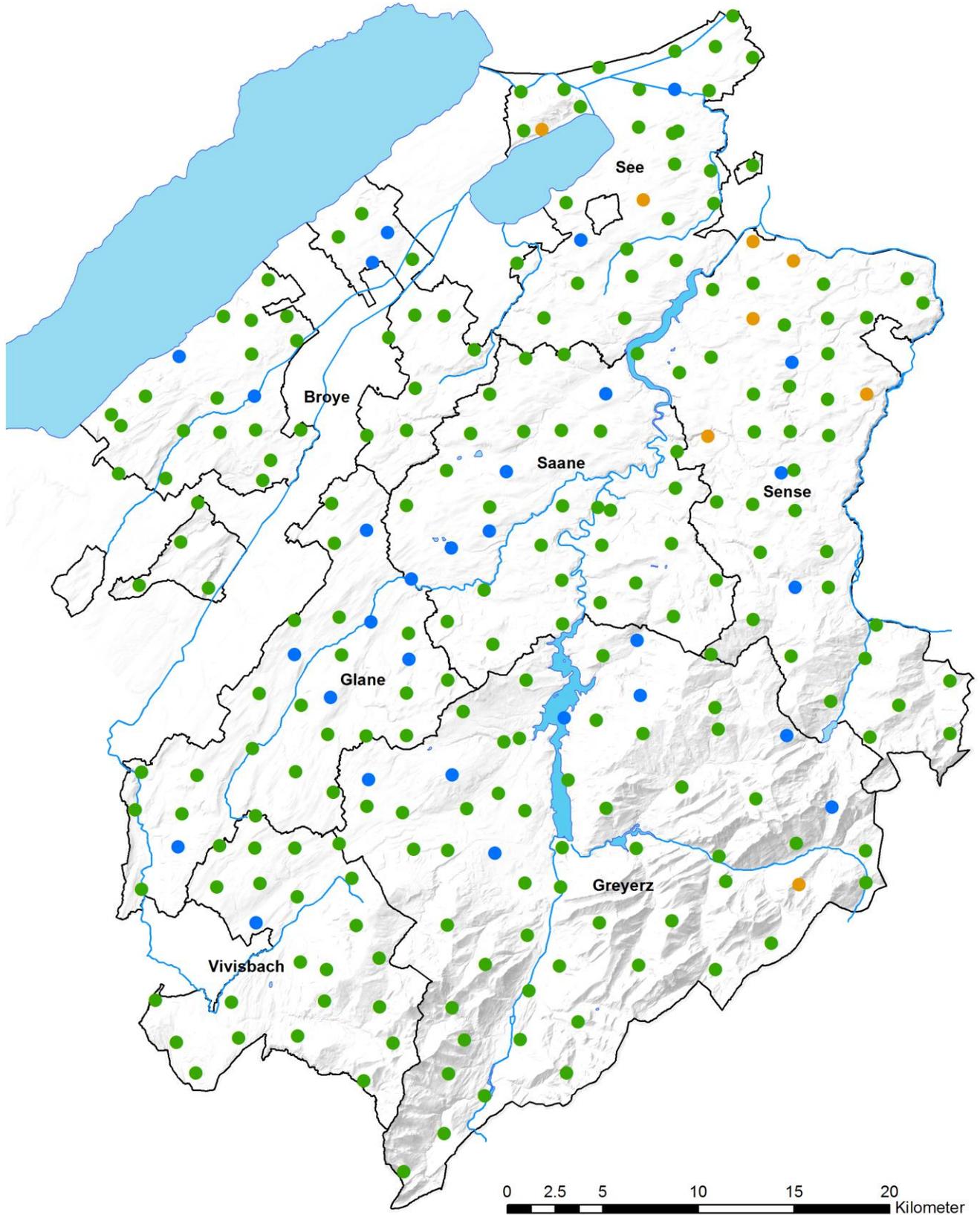
Abbildung 2.2.2-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO₂ gemäss Modell GRUD 2017

Entwicklung pro Standort

Die acht Standorte mit einer signifikanten Abnahme des K CO₂ sind 6 Ackerflächen, 1 Naturwiese und 1 Alpweide (Karte 2.2.2-6: Entwicklung des Gehalts an K CO₂ pro Standort während der sechs Zyklen). Es ist möglich, dass diese Flächen keine organischen Dünger erhalten oder dass die K-Gabe über mineralische Dünger gering oder inexistent ist. An 29 Standorten, davon 11 Ackerflächen, 14 Naturwiesen und 4 Alpweiden, wird eine Zunahme des K CO₂ beobachtet.



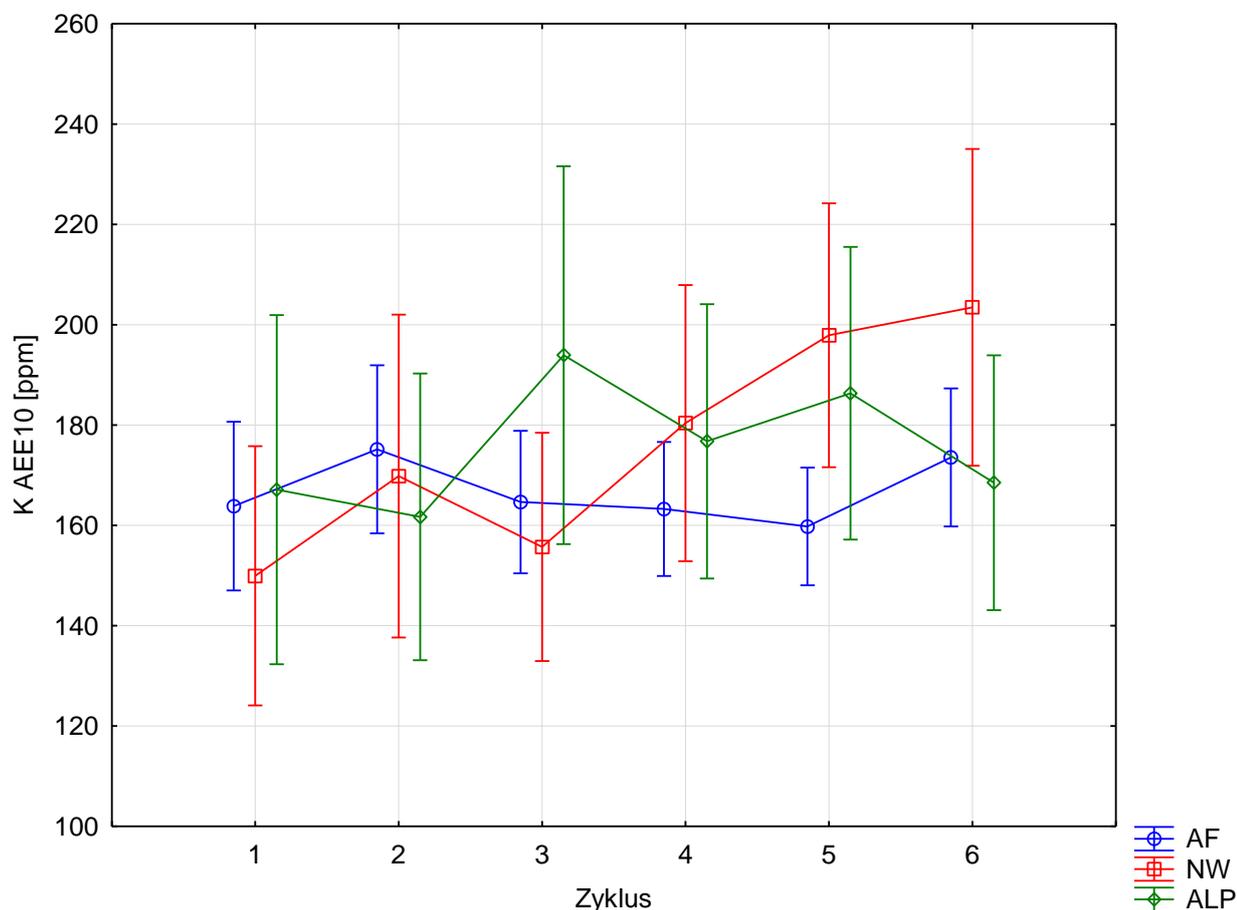
Karte 2.2.2-5: Beurteilung des Gehalts an K CO₂ – sechster Zyklus



Karte 2.2.2-6: Entwicklung des Gehalts an K CO₂ pro Standort während der sechs Zyklen

AAE10-Extraktion

Der Gehalt an Reserve-Kali blieb auf den Ackerflächen und Alpweiden während der sechs Zyklen ziemlich stabil (Abbildung 2.2.2-7: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten K). Auf den Naturwiesen wird zwischen dem dritten und sechsten Zyklus eine signifikante Zunahme des Durchschnittswerts um 30 % festgestellt.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---|
| AF | 163.85 a | 175.16 a | 164.65 a | 163.28 a | 159.79 a | 173.55 a | Durchschn. K AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| NW | 149.95 a | 169.84 ab | 155.72 ab | 180.39 ab | 197.90 b | 203.47 ab | Durchschn. K AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 167.13 a | 161.70 a | 193.94 a | 176.76 a | 186.34 a | 168.51 a | Durchschn. K AAE10 p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-7: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten K

Beurteilung gemäss GRUD

Die Mehrheit der Standorte auf Ackerflächen ist in der Klasse «genügend» eingeteilt (Abbildung 2.2.2-8: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K AAE10 gemäss Modell GRUD 2017). Der Anteil dieser Kategorie nimmt seit dem dritten Zyklus zulasten der Klasse «mässig» zu.

Die Klassen «Vorrat» und «angereichert» nahmen auf den Naturwiesen und Alpweiden zu, doch die Situation stabilisierte sich im letzten Zyklus. Die Anzahl der als «mässig» eingestuft Standorte auf den Alpweiden

stabilisierte sich nach einer konstanten Abnahme bis zum fünften Zyklus. Kein einziger Standort – unabhängig von der Bodennutzung – ist in der Klasse «arm» eingeteilt.

Die Karte 2.2.2-7: Beurteilung des Gehalts an K AAE10 – sechster Zyklus zeigt, dass die auf Vorrat versorgten und angereicherten Böden im ganzen Kanton verteilt sind.

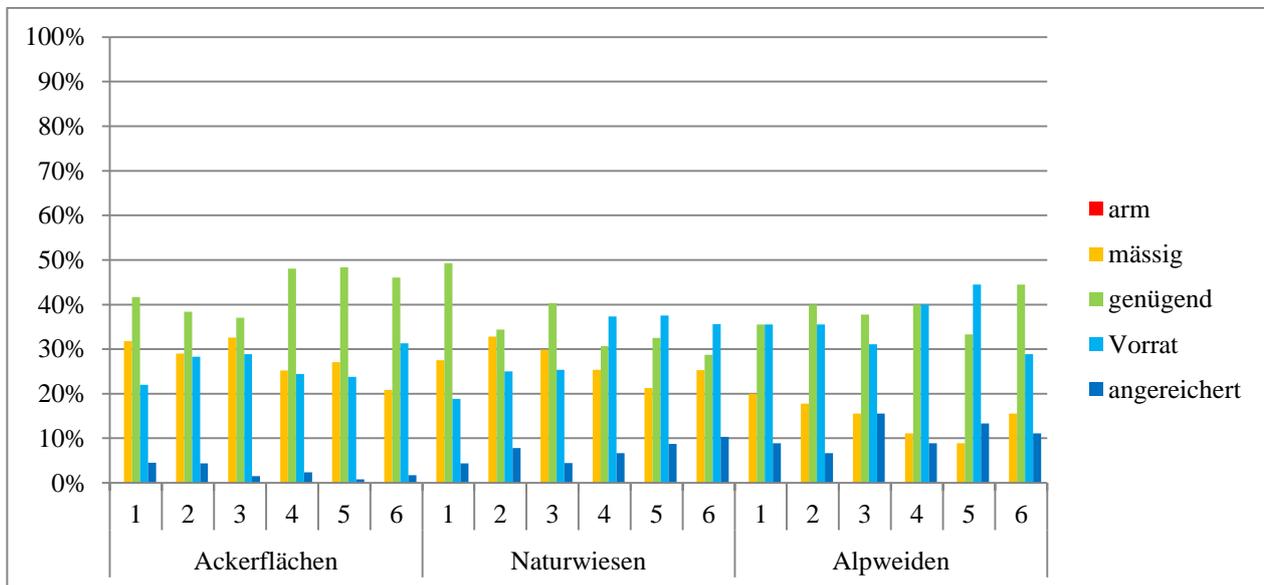


Abbildung 2.2.2-8: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

Entwicklung pro Standort

Unter den 16 Standorten mit einer signifikanten Abnahme des Gehalts an K AAE10 finden sich 11 Ackerflächen, 2 Naturwiesen und 3 Alpweiden (Karte 2.2.2-8: Entwicklung des Gehalts an K AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen). 10 der 30 Standorte, die eine Zunahme dieses Parameters aufweisen, sind Ackerflächen, 17 Naturwiesen und 3 Alpweiden.

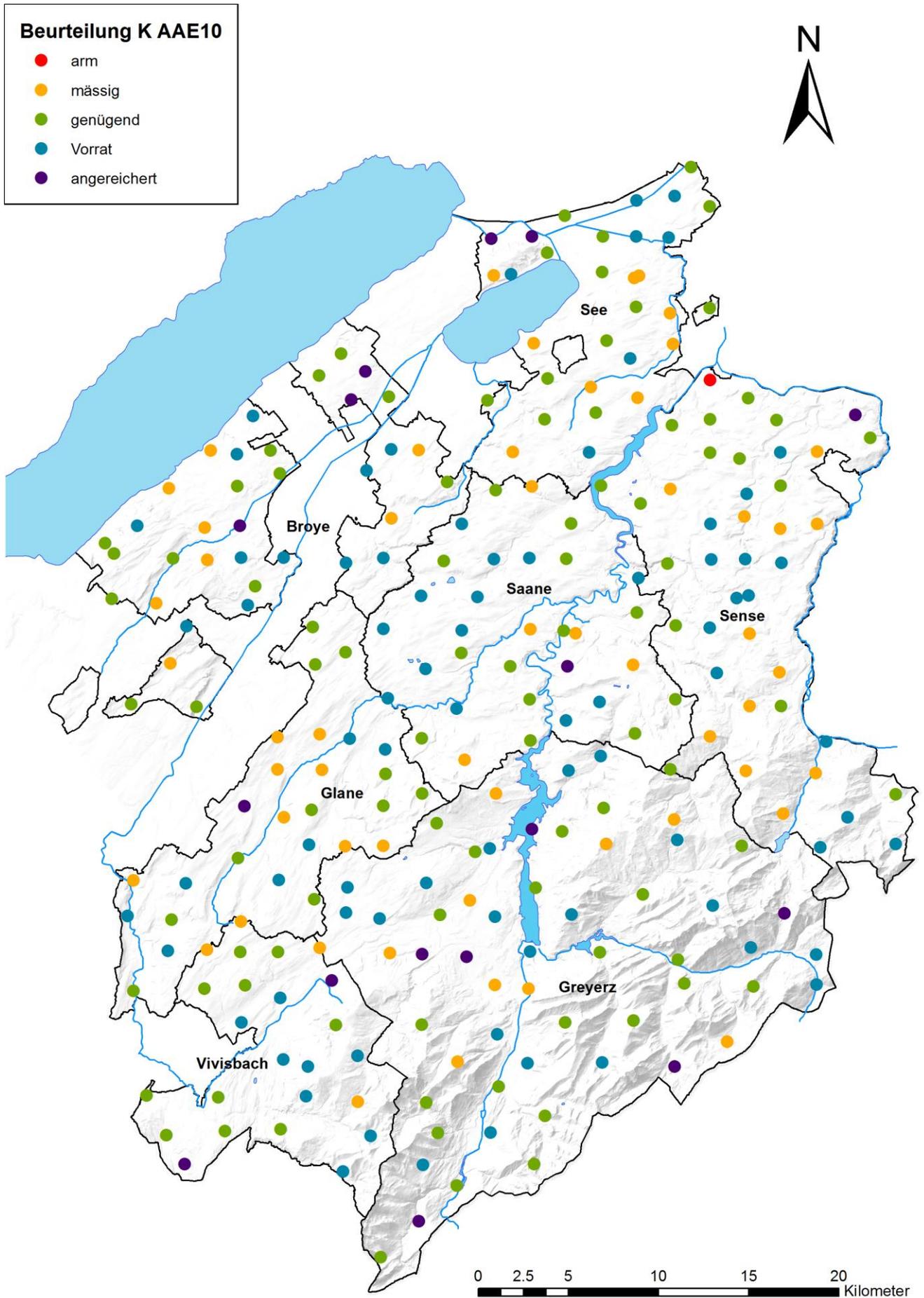
Die Mehrheit der Standorte mit einer Zunahme des Gehalts liegt in den Bezirken Greyerz und Glane, aber erstaunlicherweise auch in der Broye. Zwei der sieben Standorte in der Broye sind Dauerwiesen, zwei der Ackerflächen haben einen grossen Anteil an Kunstwiesen. Diese Entwicklung zeigt, dass es vor allem Wiesen sind, auf denen der K-Gehalt zunimmt, was mit dem Hofdünger der betroffenen Betriebe in Verbindung zu setzen ist.

Wichtige Punkte

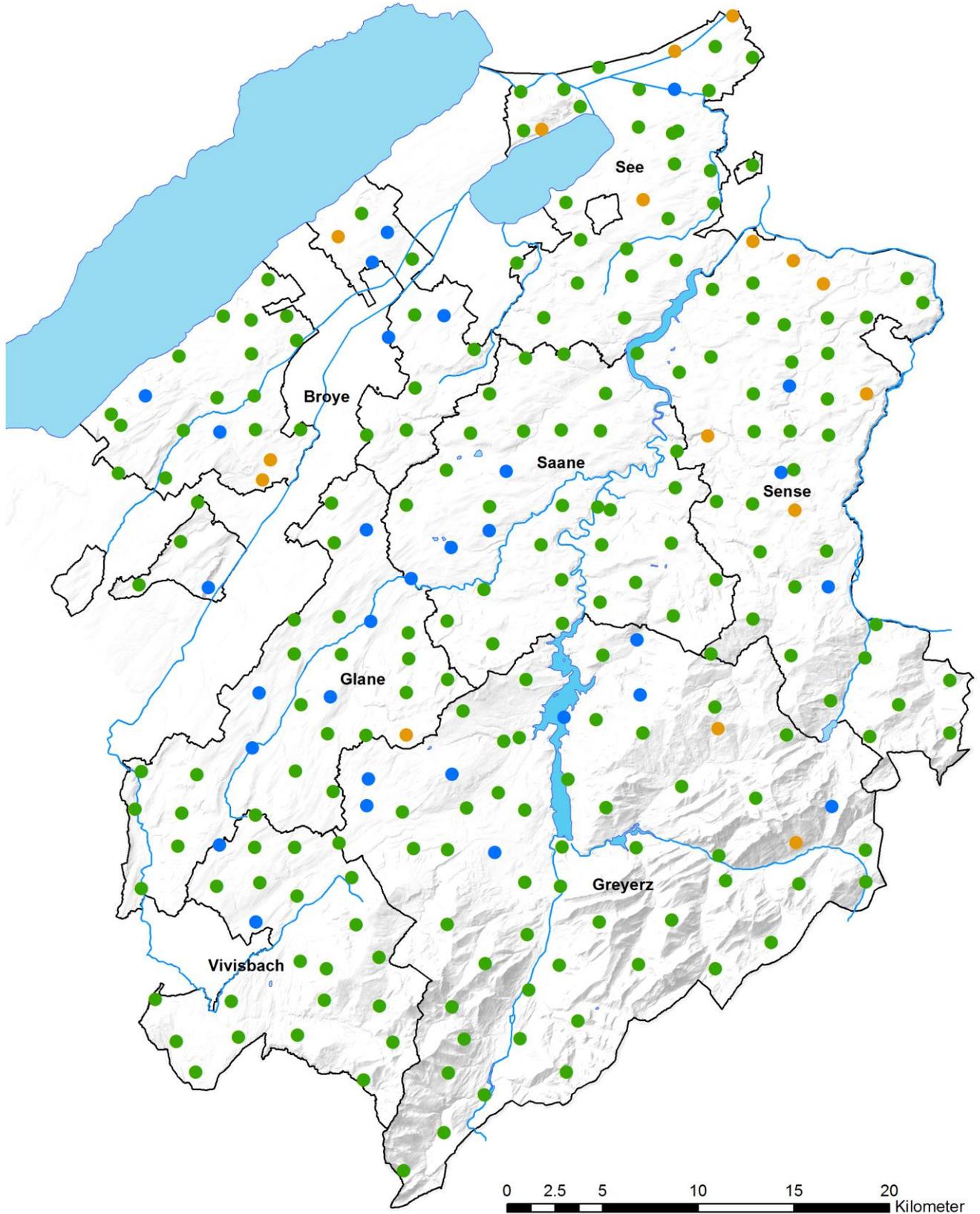
Wir beobachten seit 15 Jahren eine Zunahme des Gehalts an löslichem Kali und an Reserve-Kali in den Böden der Naturwiesen. Eine Ursache für die Anreicherung ist in der Suisse-Bilanz ersichtlich. Diese zeigt klare Kaliüberschüsse für die Mehrheit der Betriebe mit einem grossen Tierbesatz. Zwar ist die Situation bekannt, sie wird aber von den Landwirten wenig berücksichtigt, da Kali für die Umwelt nicht problematisch ist. Es gibt zudem keine gesetzlichen Bestimmungen zur Kaliumbelastung. Die Gülle der Milchkühe ist reich an Kali, enthält doch die Milch nur wenig davon. Da Kali weniger exportiert wird als die anderen Nährstoffe der Milchbetriebe, findet eine Akkumulation von K statt, wenn ein Gleichgewicht für N und P angestrebt wird. Diese Gegebenheit wird durch das K, das mit den Futtermitteln importiert wird, noch verschärft. Eine andere mögliche Ursache für diese Zunahme von K auf den Dauerwiesen besteht darin, dass letztere oft auf schwereren Böden als die Ackerflächen - in der südlichen Kantonshälfte - liegen. In gewissen Formen ist Kalium auswaschbar, sodass es sich eher in den schweren Böden der Dauerwiesen ansammelt als in den oft leichteren Böden der Ackerflächen.

Das häufige Ausbringen von Hofdünger auf Dauerwiesen reichert die Böden mit Kali an. Dies kann das Verhältnis K/Mg aus dem Gleichgewicht bringen und Weidetetanie sowie Fruchtbarkeitsstörungen verursachen.

Agroscope führte eine Studie mit Proben des FRIBO-Netzes durch, um das Gesamtkalium zu analysieren. Gemäss einem Artikel (Blanchet et al., 2017) seien die höchsten Gesamtkaliumwerte des Kantons Freiburg in der Talzone vorhanden. Die höchsten Werte des Reserve-Kaliums und des löslichen Kaliums finden sich in den höheren Zonen des Kantons (Naturwiesen und Alpweiden), dies hauptsächlich aufgrund der Bodennutzung. Die Naturwiesen und Alpweiden weisen hohe Gehalte an K CO₂ und K AAE10 auf, während der Gesamtkaliumgehalt des Bodens und Muttergesteins im Durchschnitt tiefer liegt als im Flachland.



Karte 2.2.2-7: Beurteilung des Gehalts an K AAE10 – sechster Zyklus



Karte 2.2.2-8: Entwicklung des Gehalts an K AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen

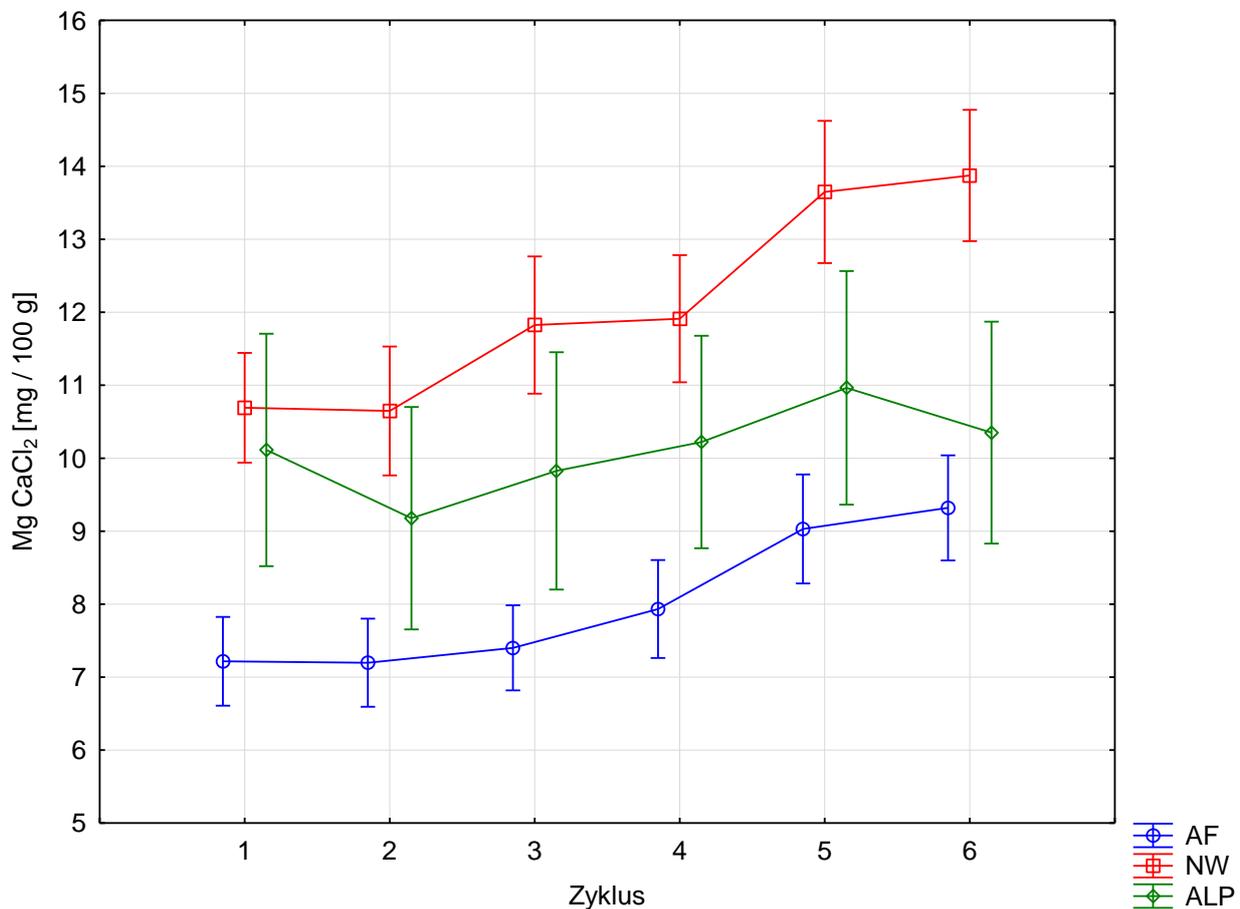
2.2.2.3 Magnesium

Das Mg ist ein wichtiger Nährstoff für die Pflanzen. In Form von Magnesiumsulfat ist er wie Nitrate auswaschbar. Zu grosse Mengen im Boden können sich negativ auf die Fruchtbarkeit einer Parzelle auswirken, und zwar über folgende Mechanismen:

- Antagonismus mit den anderen Kationen, hauptsächlich K und Ca
- Weniger gute Kapazität als Kalzium den Ton zu flocken und die Bodenstruktur zu verbessern. Das Verhältnis Ca : Mg der KAK muss berücksichtigt werden. Tiefe Quotienten Ca : Mg reduzieren die Wasserinfiltration und begünstigen die Erosion (Dontsova und Norton, 2001).
- In einem trockenen Klima wie in Nordafrika, aber auch im Zentralwallis oder in der Region Chablais kann sich das Mg an der Bodenoberfläche konzentrieren und gipshaltige Verkrustungen bilden, sodass sich die Böden nicht mehr für die Landwirtschaft eignen (Biedermann et al., 2014).

CaCl₂-Extraktion

Die Magnesium-Extraktion mit der Methode CaCl₂ (früher Schachtschabel) ist das Äquivalent zur CO₂-Methode. Dabei wird das von den Pflanzen rasch verfügbare Magnesium extrahiert.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|--|
| AF | 7.22 a | 7.20 a | 7.40 a | 7.93 ab | 9.03 bc | 9.32 c | Durchschn. Mg CaCl ₂ p= 5 % (logtransform) |
| NW | 10.69 a | 10.65 a | 11.83 ab | 11.91 ab | 13.65 b | 13.87 b | Durchschn. Mg CaCl ₂ p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 10.11 a | 9.18 a | 9.83 a | 10.22 a | 10.96 a | 10.35 a | Durchschn. Mg CaCl ₂ p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-9: Allgemeine Entwicklung des mit der CaCl₂-Methode extrahierten Mg

Die Durchschnittswerte der Naturwiesen sind höher als diejenigen der Alpweiden, die ihrerseits leicht höher sind als die Werte der Ackerflächen (Abbildung 2.2.2-9: Allgemeine Entwicklung des mit der CaCl_2 -Methode extrahierten Mg). Bei Letzteren wird zwischen dem dritten und sechsten Zyklus eine signifikante Zunahme des Gehalts beobachtet. Eine signifikante Zunahme ist auch bei den Naturwiesen feststellbar, wo die Werte des fünften und sechsten Zyklus signifikant höher sind als diejenigen der anderen Zyklen. Die Standorte im Sömmerungsgebiet weisen keine signifikante Entwicklung auf.

Beurteilung gemäss GRUD

Die meisten Standorte auf Ackerflächen werden als «mässig» oder «genügend» eingestuft. Der Anteil der auf «Vorrat» versorgten Standorte verdoppelte sich im Sömmerungsgebiet zwischen dem vierten und fünften Zyklus (Abbildung 2.2.2-10: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg CaCl_2 gemäss Modell GRUD 2017). Ungeachtet der Bodennutzung finden sich sehr wenige Standorte in den extremen Klassen «arm» und «angereichert». Bei den Naturwiesen verschieben sich die als «genügend» eingestuft Standorte schrittweise in die Kategorie «Vorrat». In jedem Zyklus wechseln einige Standorte auf Ackerflächen von der Klasse «mässig» zur Klasse «genügend». Der Gehalt an löslichem Mg nimmt demnach in diesen Böden zu.

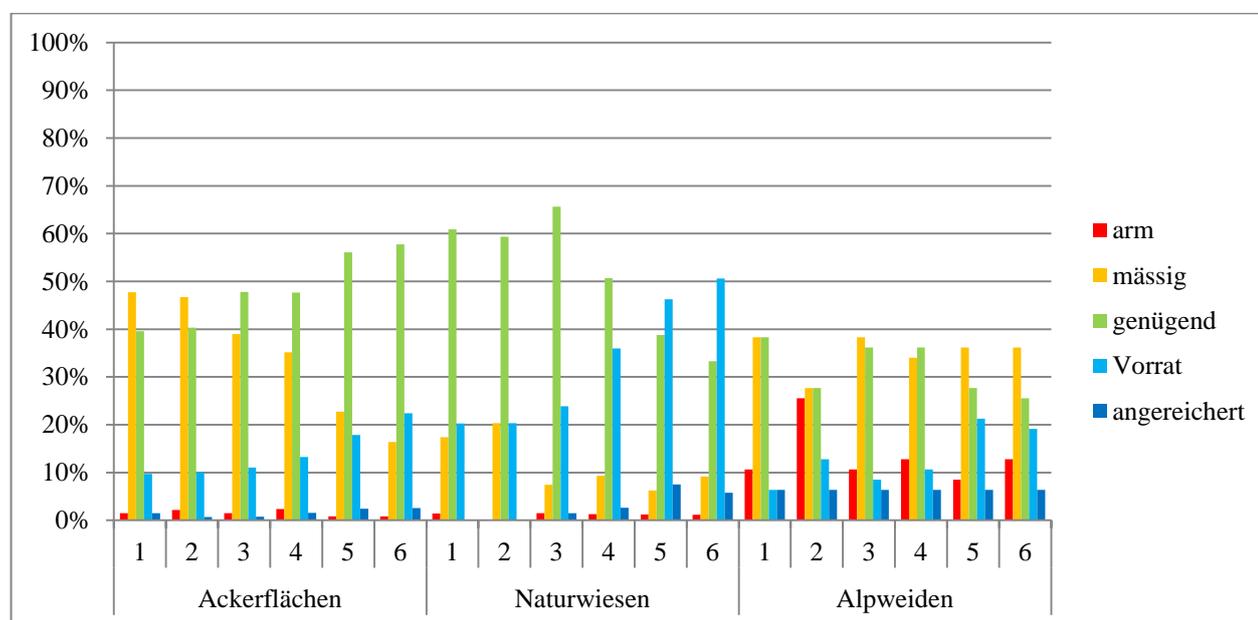
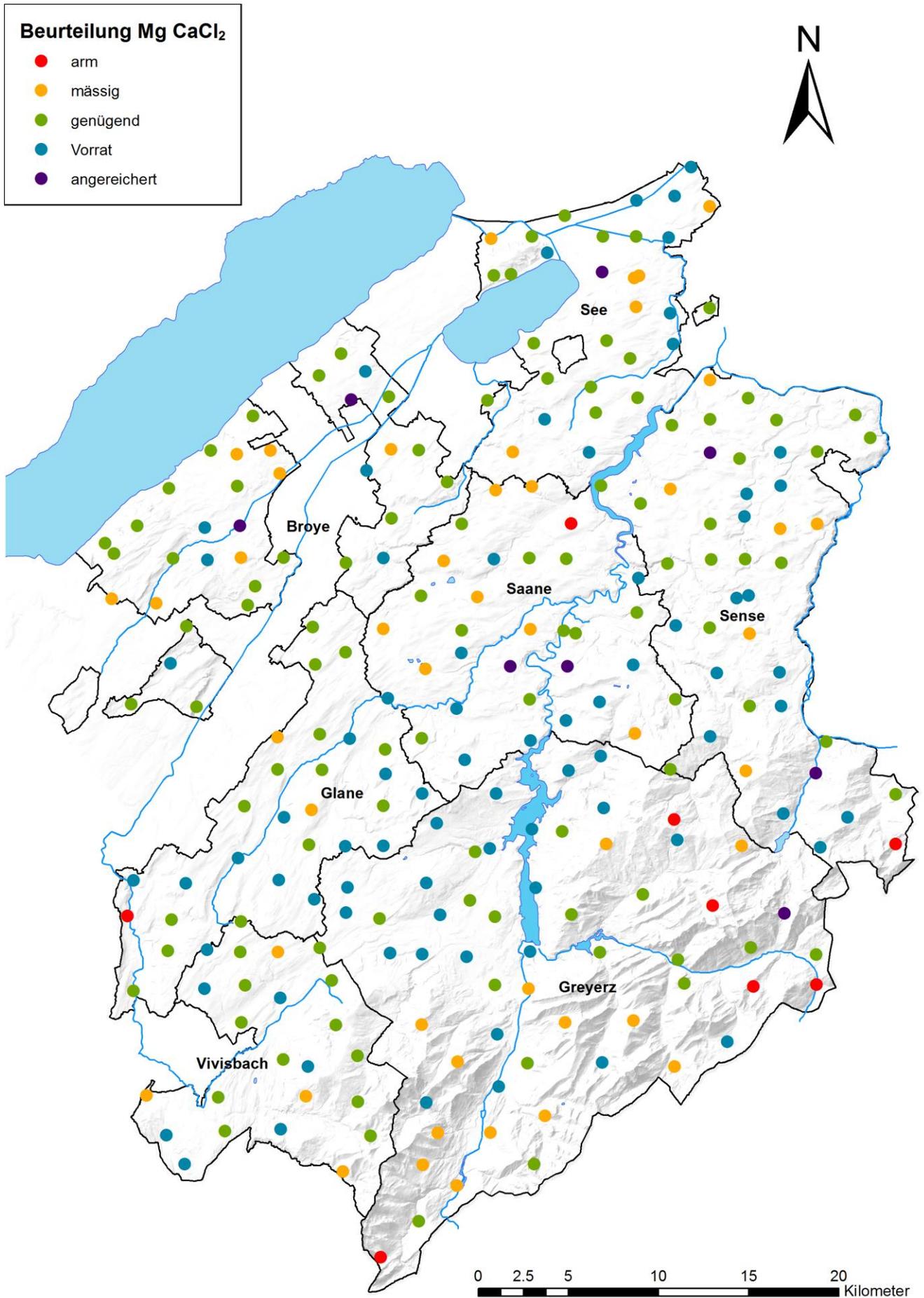


Abbildung 2.2.2-10: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg CaCl_2 gemäss Modell GRUD 2017

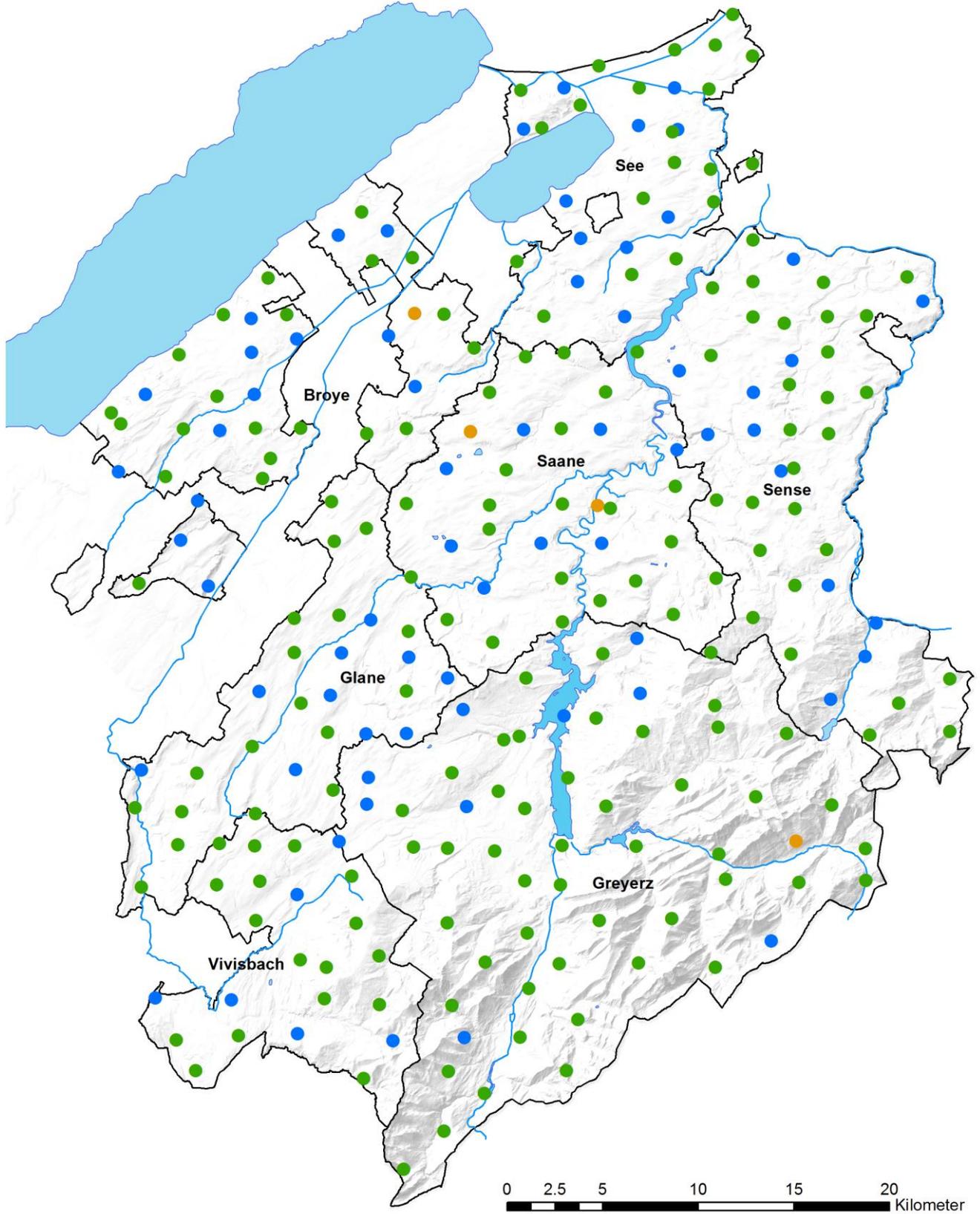
Die Karte 2.2.2-9: Beurteilung des Gehalts an Mg CaCl_2 – sechster Zyklus zeigt, dass vor allem die Parzellen östlich der Glane als auf «Vorrat» mit Mg CaCl_2 versorgt eingestuft werden. Dies erklärt sich damit, dass die Böden einen grösseren Tonanteil besitzen und dadurch weniger Mg auswaschen und dass in diesen Milchproduktionszonen mehr Hofdünger ausgebracht wird.

Entwicklung pro Standort

Die Karte 2.2.2-10: Entwicklung des Gehalts an Mg CaCl_2 pro Standort während der sechs Zyklen zeigt 4 Standorte, die eine Abnahme des Mg CaCl_2 verzeichnen, und 70 Standorte mit einer Zunahme in den letzten sechs Zyklen. Unter den 4 Standorten mit einem Rückgang finden sich 2 Ackerflächen, 1 Alpweide und 1 Naturwiese. Die 70 Standorte mit zunehmenden Werten sind folgendermassen aufgeteilt: 35 Ackerflächen, 29 Naturwiesen und 6 Alpweiden. Die starke Zunahme von Mg CaCl_2 auf den Ackerflächen zeigt das gestiegene Bewusstsein für die Bedeutung dieses Elements.



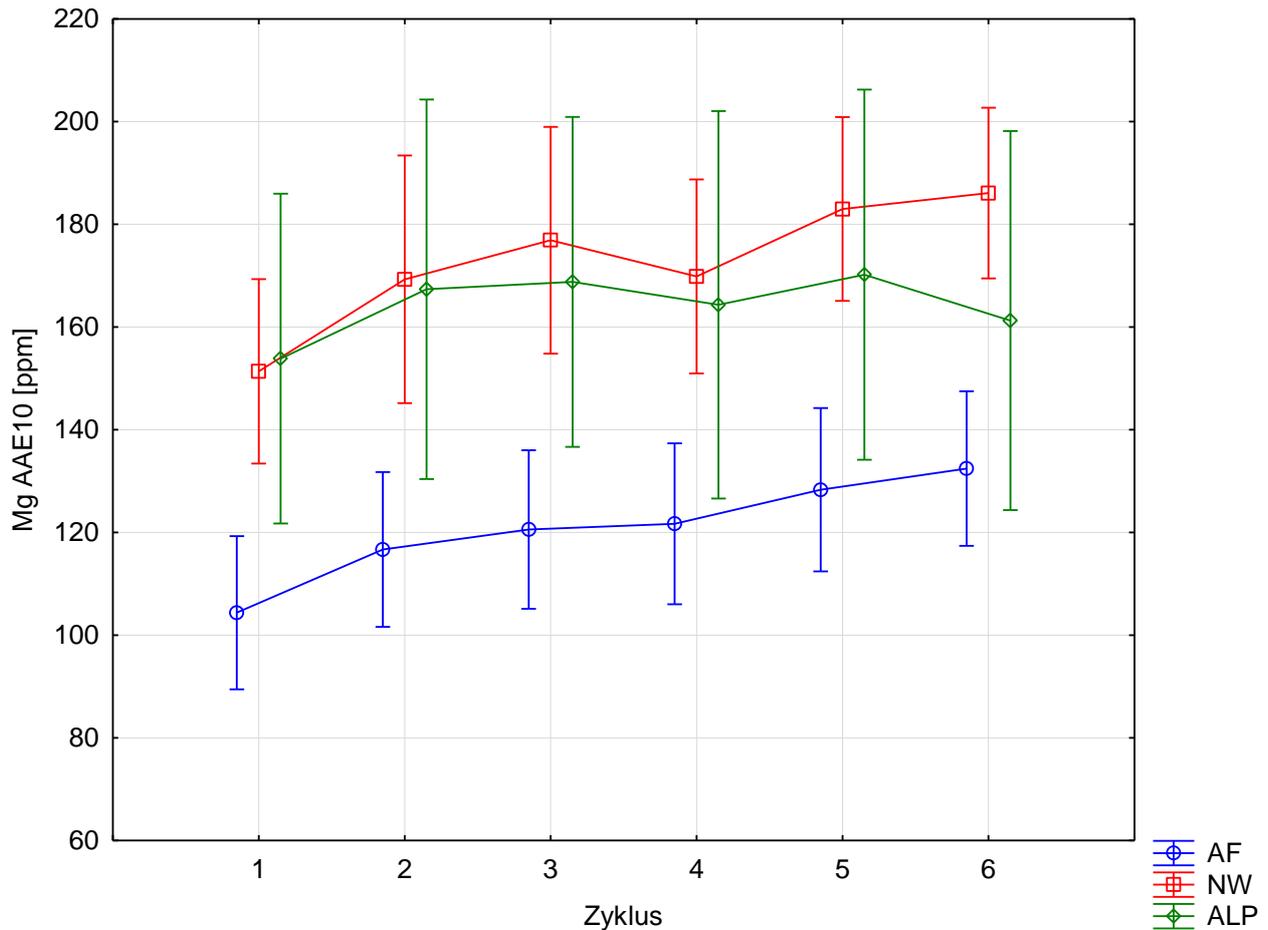
Karte 2.2.2-9: Beurteilung des Gehalts an Mg CaCl₂ – sechster Zyklus



Karte 2.2.2-10: Entwicklung des Gehalts an Mg CaCl₂ pro Standort während der sechs Zyklen

AAE10-Extraktion

Die höchsten Gehalte an Reserve-Mg finden sich auf den Naturwiesen und Alpweiden (Abbildung 2.2.2-11: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Mg), wohingegen die Ackerflächen die tiefsten Gehalte aufweisen. Die Bodenbeschaffenheit erklärt diese Tendenz, da die schweren Böden der Wiesen und Alpweiden die Kationen besser zurückhalten als leichte Böden und so Verluste durch Auswaschung verhindern. Da der Gehalt an organischer Substanz zudem tiefer ist, wird die natürliche Bereitstellung von Mg auf den Ackerflächen eingeschränkt. Der Gehalt an Reserve-Mg der Ackerflächen und Naturwiesen nimmt zwischen den Zyklen signifikant und kontinuierlich zu.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--|
| AF | 104.36 a | 116.68 ab | 120.58 b | 121.67 b | 128.31 b | 132.43 b | Durchschn. Mg AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| NW | 151.38 a | 169.29 ab | 176.90 ab | 169.84 ab | 182.99 b | 186.08 b | Durchschn. Mg AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 153.85 a | 167.36 a | 168.79 a | 164.33 a | 170.19 a | 161.26 a | Durchschn. Mg AAE10 p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-11: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Mg

Beurteilung gemäss GRUD

Die Hälfte der Standorte auf Ackerflächen und Alpweiden werden für diesen Parameter als «mässig» eingestuft (Abbildung 2.2.2-12: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg AAE10 gemäss Modell GRUD 2017). Die Situation auf den Alpweiden ist ziemlich stabil, während der Anteil der «mässigen» Standorte auf Ackerflächen zugunsten der Klasse «genügend» tendenziell abnimmt. Die grosse Mehrheit der Naturwiesen weist «genügende» Gehalte an Mg AAE10 auf. Die Karte 2.2.2-11: Beurteilung des Gehalts an Mg AAE10 – sechster Zyklus zeigt, dass die meisten auf «Vorrat» und «angereichert» versorgten Standorte im südwestlichen Viertel des Kantons liegen, zwischen den Bezirken Vivisbach, Glane und Greyerz.

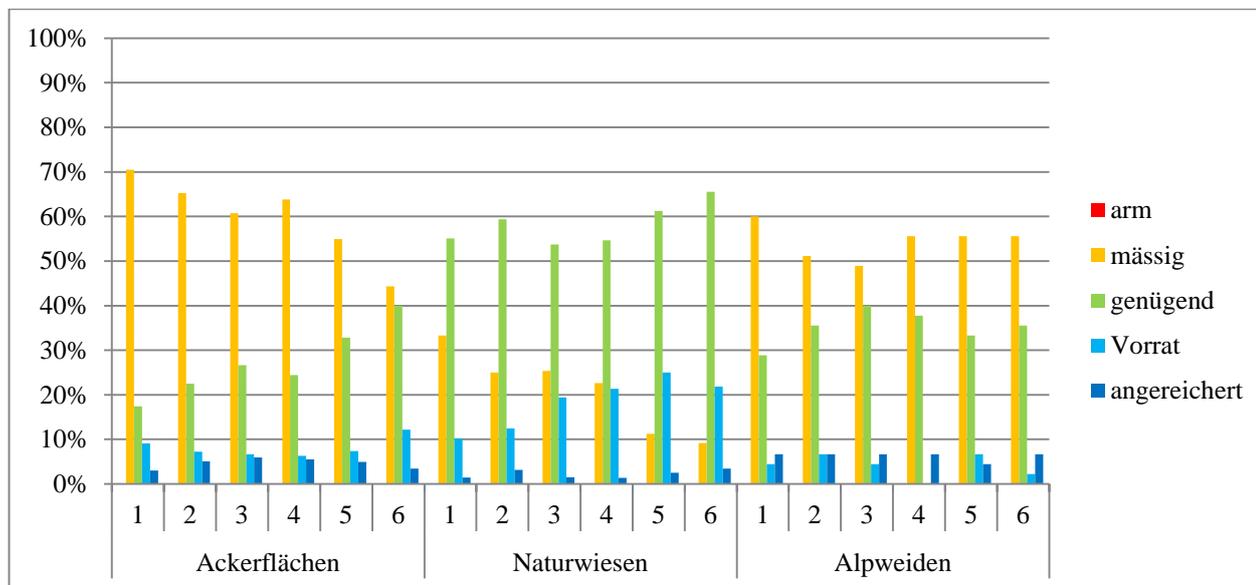


Abbildung 2.2.2-12: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mg AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

Entwicklung pro Standort

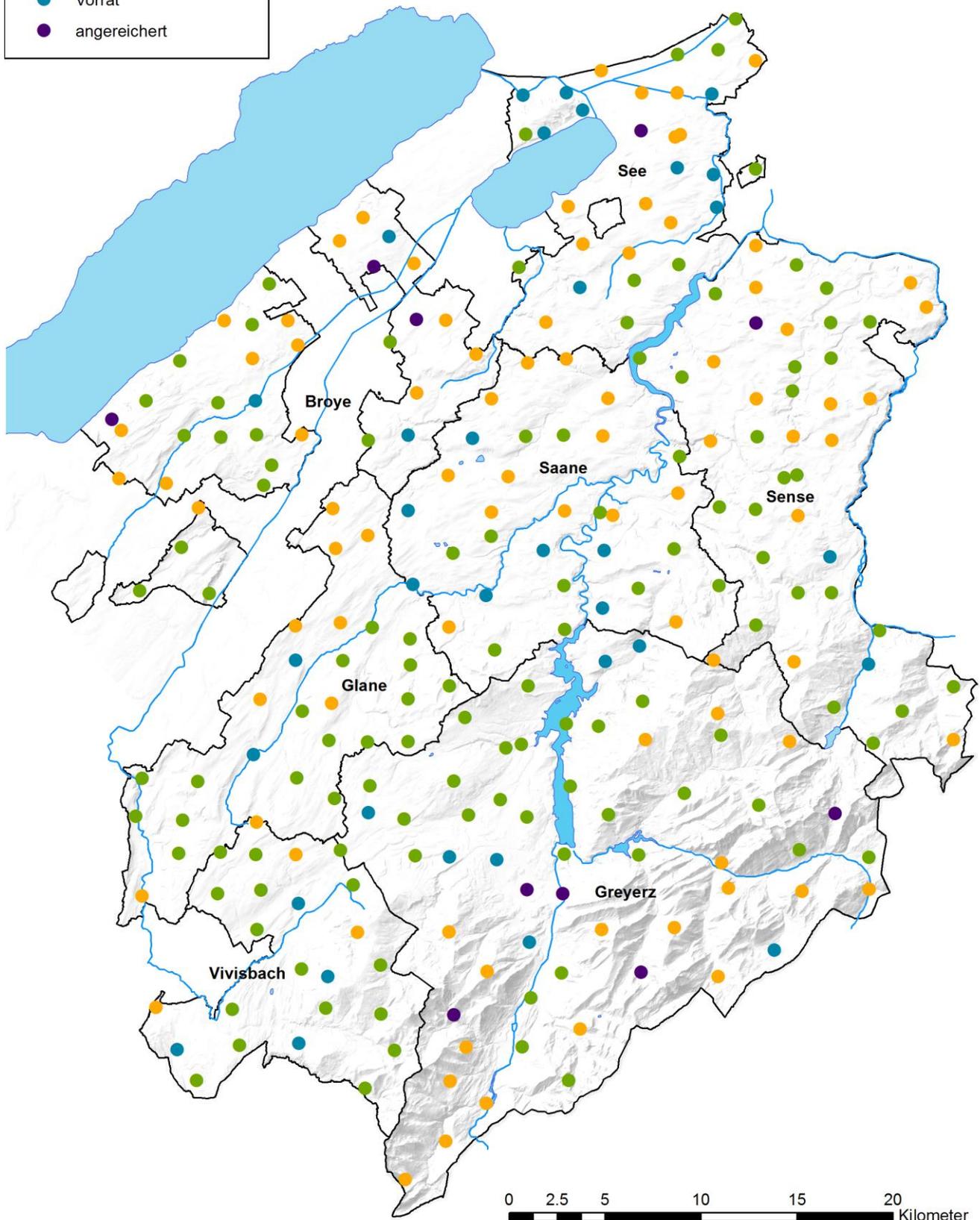
Die Karte 2.2.2-12: Entwicklung des Gehalts an Mg AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen zeigt, dass der Gehalt an Mg AAE10 an 3 Standorten auf Alpweiden zurückging und an 54 Standorten (5 Alpweiden, 23 Naturwiesen und 26 Ackerflächen) zunahm.

Wichtige Punkte

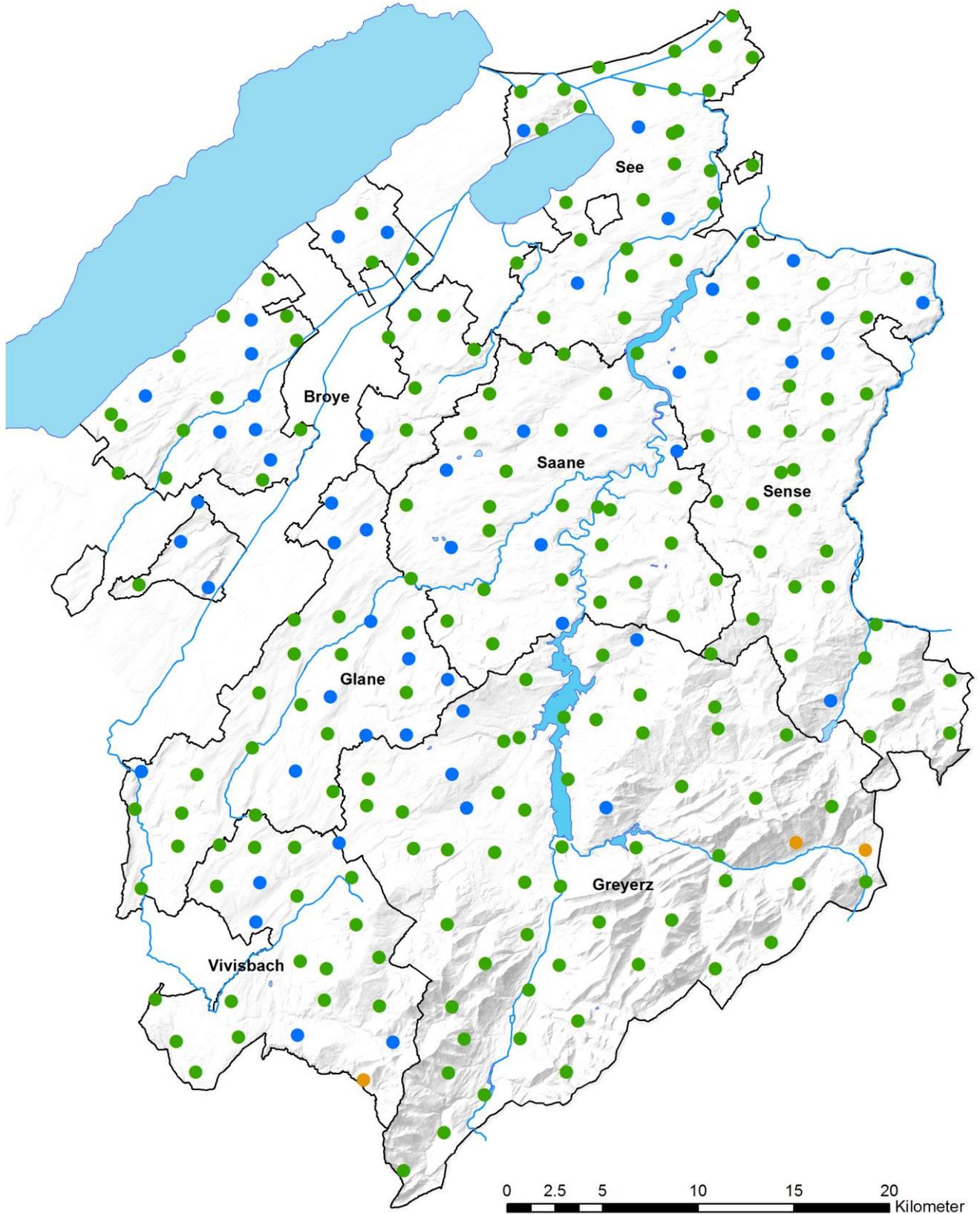
Es wird eine Zunahme des löslichen Magnesiums und des Reserve-Magnesiums auf den Ackerflächen und Naturwiesen im Kanton Freiburg festgestellt. Diese Zunahme erklärt sich mit der Verwendung von mineralischen Düngern, Kalkprodukten mit Mg und organischen Düngern. Im Zusammenhang mit der eher mässigen Versorgungsstufe der Böden und der Zunahme des Kaligehalts ist diese Entwicklung positiv.

Da der Kalziumgehalt in den Böden des Kantons relativ stabil ist (Abbildung 2.2.2-13: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Ca), muss jedoch darauf geachtet werden, dass kein grosses Ungleichgewicht zwischen beiden Kationen entsteht. Dies könnte Kalziumblockaden verursachen und die Struktur und Infiltrationskapazität des Bodens verschlechtern.

Gemäss einer Agroscope-Studie (Frau et al. submitted) wird zwar der Gehalt an Gesamtmagnesium im Boden vor allem von der Beschaffenheit des Muttergesteins und vom Bodentyp beeinflusst, doch das verfügbare Magnesium hängt in erster Linie von der Bodennutzung ab. Das Ausbringen von Hofdünger und das Weiden erhöhen die Mg-Menge, die für die Pflanzen verfügbar ist, signifikant. Auf den in Dauerwiesen umgewandelten Ackerflächen wurde eine starke Tendenz zur Zunahme des verfügbaren Mg beobachtet.



Karte 2.2.2-11: Beurteilung des Gehalts an Mg AAE10 – sechster Zyklus

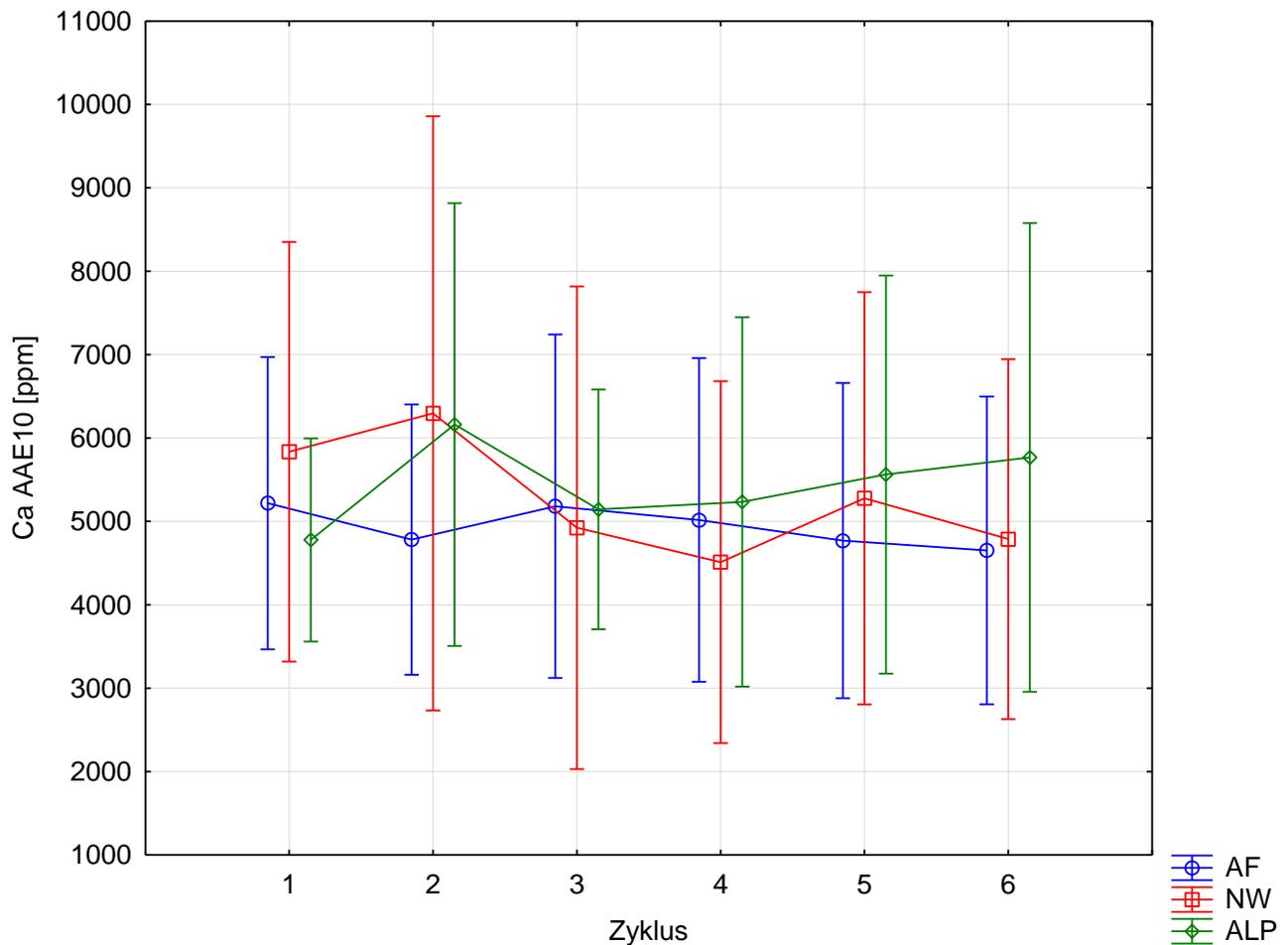


Karte 2.2.2-12: Entwicklung des Gehalts an Mg AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.2.4 Kalzium

Kalzium spielt eine entscheidende Rolle im Boden. Indem sie sich an die Ton-Humus-Kolloide anlagern, verursachen die Ca^{++} -Kationen deren Flockung, was dem Boden eine stabilere Struktur verleiht. Diese Kationen sind auch unerlässliche Nährstoffe für ein gutes Pflanzenwachstum.

Mit ungelöschtem (CaO) oder gelöschtem Kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kann eine Korrekturkalkung vorgenommen werden. Produkte mit Kalziumkarbonat (CaCO_3) dienen der Unterhaltskalkung. Das Ca wurde nur mit der AAE10-Methode extrahiert.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| AF | 5218.87 a | 4781.88 a | 5181.41 a | 5017.20 a | 4770.30 a | 4652.34 a | Durchschn. Ca AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| NW | 5836.09 a | 6296.58 a | 4924.07 a | 4511.91 a | 5277.55 a | 4788.00 a | Durchschn. Ca AAE10 p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 4776.91 a | 6162.82 a | 5145.18 a | 5234.22 a | 5562.56 a | 5767.31 a | Durchschn. Ca AAE10 p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.2-13: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Ca

Die Ca-Analysen zeigen keine signifikante Entwicklung (Abbildung 2.2.2-13: Allgemeine Entwicklung des mit der AAE10-Methode extrahierten Ca). Allgemein weisen die Alpweiden den höchsten Ca-Gehalt auf, gefolgt von den Naturwiesen und den Ackerflächen, wobei die Durchschnittswerte dieser Bodennutzungstypen nahe beieinander liegen. Die Böden der Alpweiden und Dauerwiesen im Süden des Kantons setzen sich teilweise aus Kalkgestein der Voralpen zusammen, was ihren hohen Kalziumgehalt erklärt.

Beurteilung gemäss GRUD

Die Karte 2.2.2-13: Beurteilung des Gehalts an Ca AAE10 – sechster Zyklus zeigt klar, dass die Standorte, die am wenigsten Kalzium enthalten, im Norden des Kantons liegen. Die Ackerflächen sind mehrheitlich «mässig» oder «genügend» versorgt (Abbildung 2.2.2-14: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Ca AAE10 gemäss Modell GRUD 2017). Über zwei Drittel der Standorte auf Naturwiesen und Alpweiden sind «genügend» eingestuft. Es befinden sich nur wenige Standorte in den Versorgungsklassen «Vorrat» und «angereichert», und dies unabhängig von der Bodennutzung. Der Anteil, der als «arm» eingestuft Böden, nahm nach dem ersten Zyklus stark ab. Die Verbreitung der Kalkung ist eine mögliche Erklärung dafür.

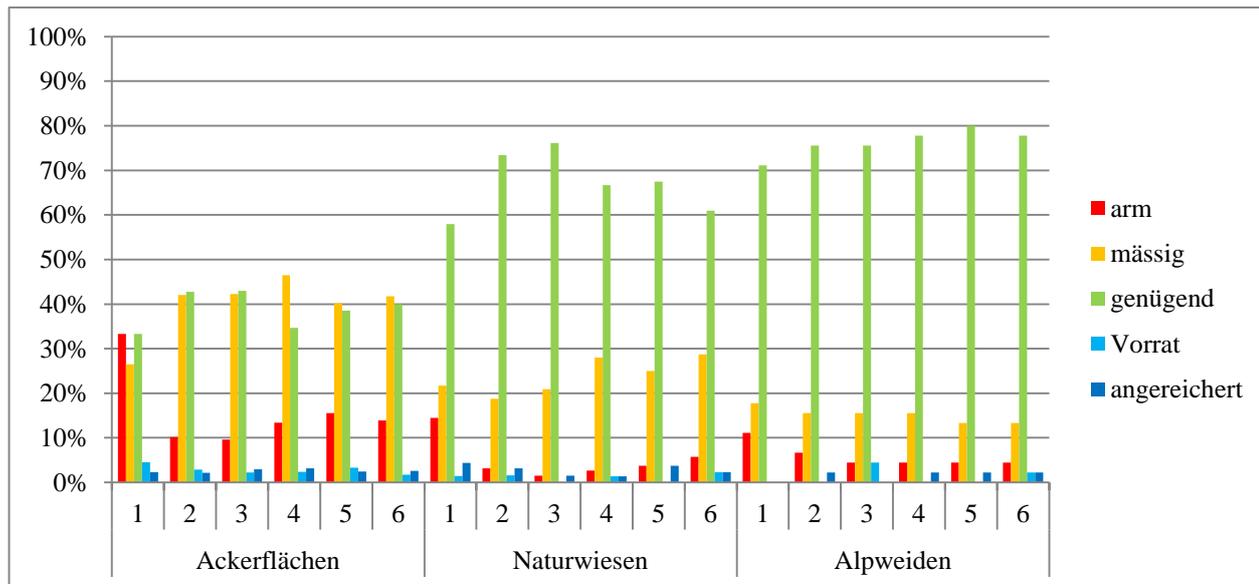


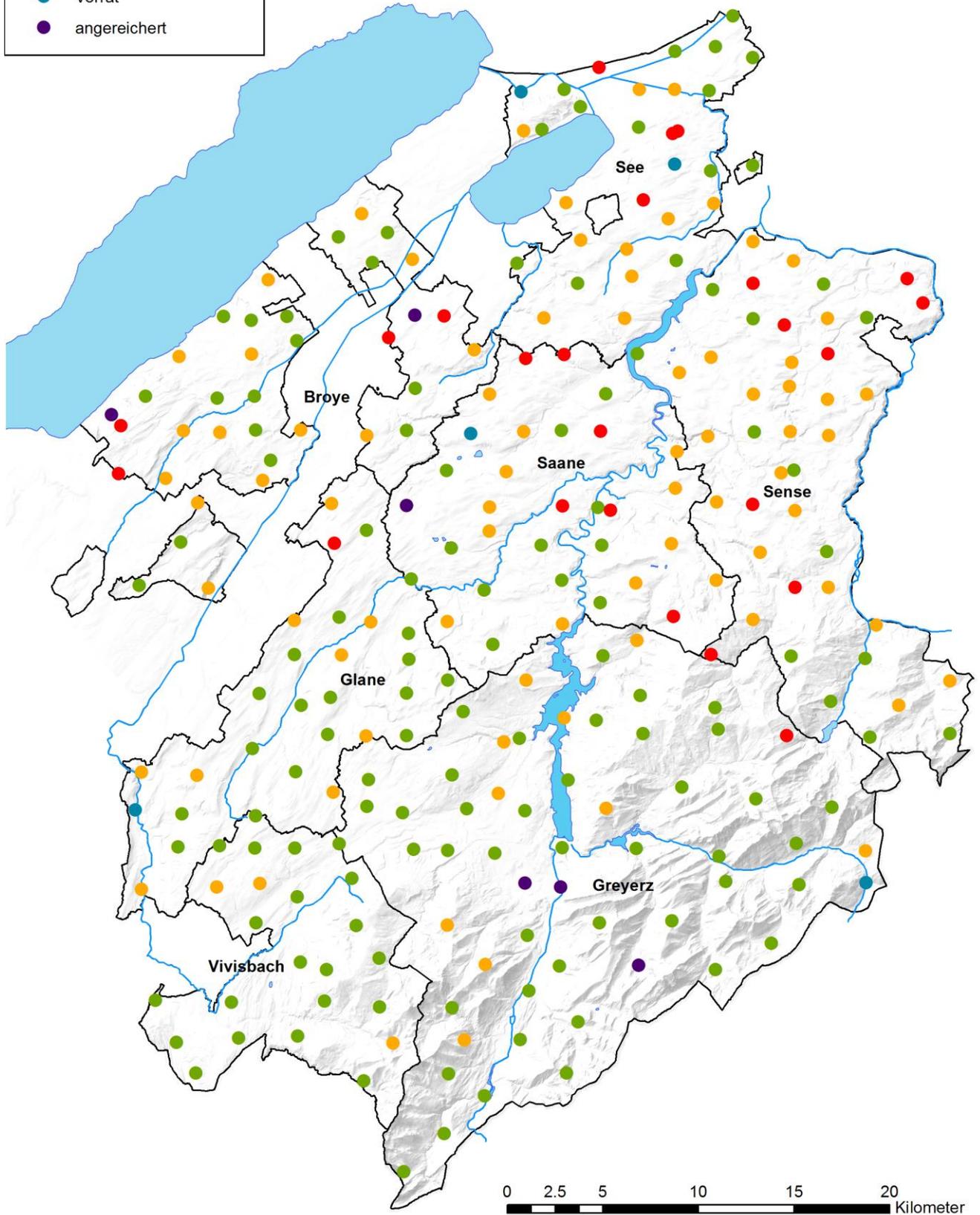
Abbildung 2.2.2-14: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Ca AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

Entwicklung pro Standort

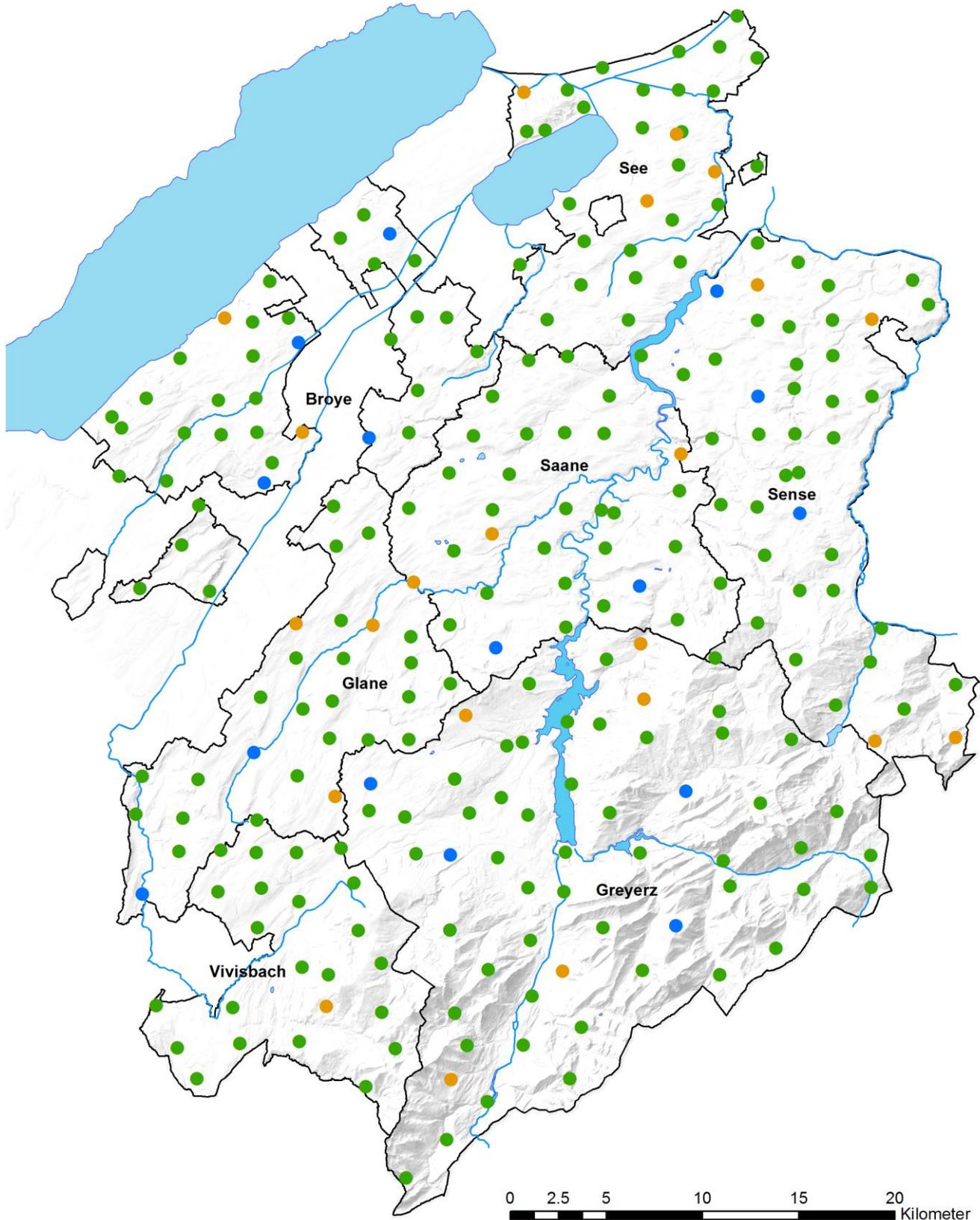
22 Standorte weisen eine signifikante Abnahme der Ca-Gehalte auf, während 15 Standorte eine signifikante Zunahme zeigen.

9 der 22 Standorte mit einer signifikanten Abnahme sind Ackerflächen, 8 Naturwiesen und 5 Alpweiden. An 19 dieser Standorte blieb der pH stabil, wogegen er an 3 Standorten signifikant abnahm.

Unter den 15 Standorten, die eine signifikante Zunahme aufweisen, finden sich 9 Ackerflächen, 5 Naturwiesen und 1 Alpweide. Der pH nahm an 6 dieser Standorte zu, während er an den anderen stabil blieb. Dies lässt darauf schliessen, dass die Zunahme der Ca-Gehalte sehr wahrscheinlich auf Kalkung zurückzuführen ist.



Karte 2.2.2-13: Beurteilung des Gehalts an Ca AAE10 – sechster Zyklus



Karte 2.2.2-14: Entwicklung des Gehalts an Ca AAE10 pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.3 Spurenelemente

2.2.3.1 Bor

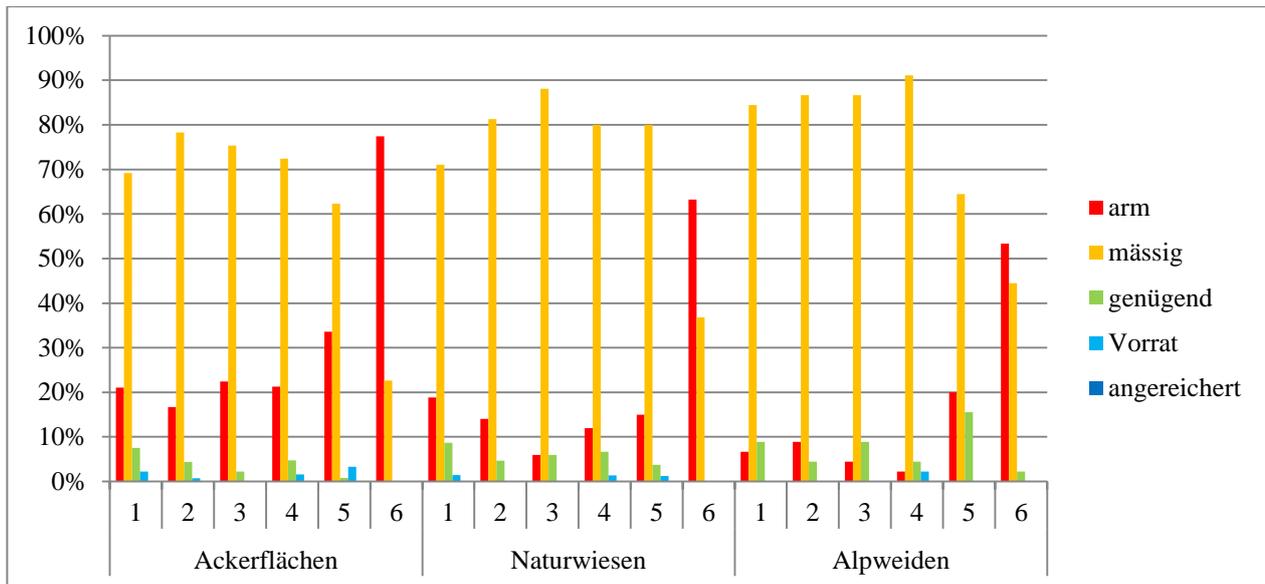


Abbildung 2.2.3-1: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des mit der Warmwassermethode extrahierten B gemäss Modell GRUD 2017

Die im Kanton bereits tiefen Bor-Gehalte scheinen zwischen dem 5. und 6. Zyklus deutlich abgenommen zu haben. Dies ist aber sehr wahrscheinlich auf den Wechsel des Analysegeräts des Labors zurückzuführen, sodass keine Schlussfolgerungen über die Entwicklung des Bors gezogen werden können. Es ist jedoch belegt, dass im Kanton wenig Bor vorkommt. Die anspruchsvollen Kulturen (Zuckerrüben, Sellerie, Raps, Sonnenblumen, Reben, Kern- und Steinobst) müssen folglich entsprechend dem Resultat der Bodenanalysen ausreichend mit Bor versorgt werden. Das im Kanton beobachtete Niveau ist für die anderen Kulturen und die Weiden unproblematisch.

2.2.3.2 Eisen

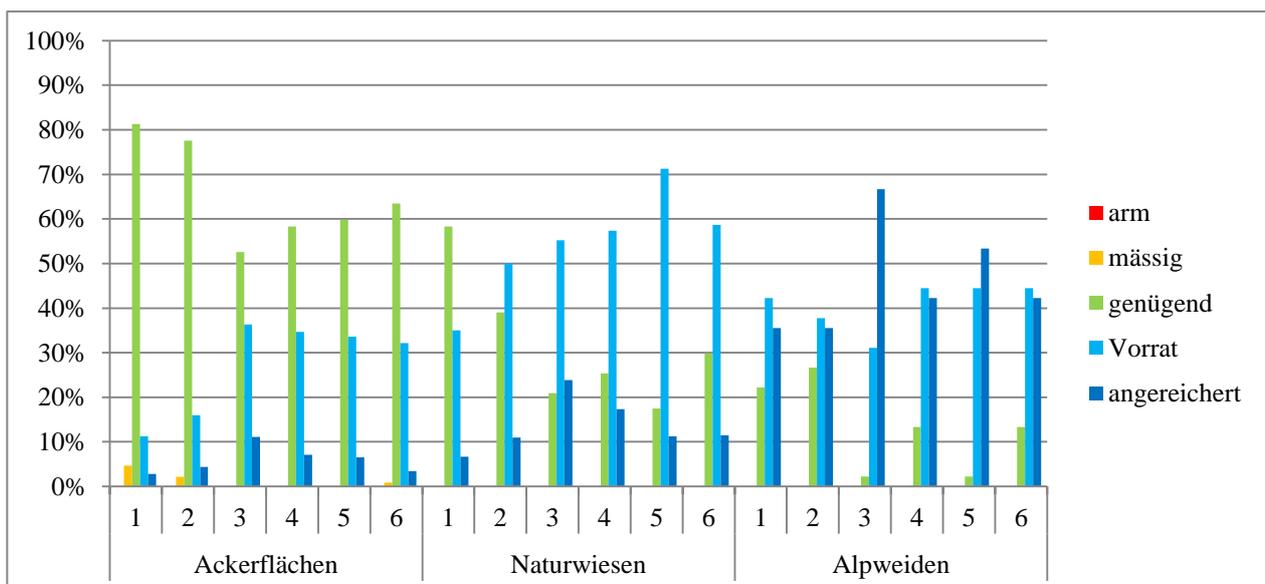


Abbildung 2.2.3-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Fe AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

Die Eisengehalte sind im Kanton vorrätig bis angereichert. Von den 250 Standorten weist nur einer – eine Ackerfläche – eine mässige Versorgung mit Eisen auf. Die Böden der Alpweiden enthalten am meisten Eisen.

2.2.3.3 Mangan

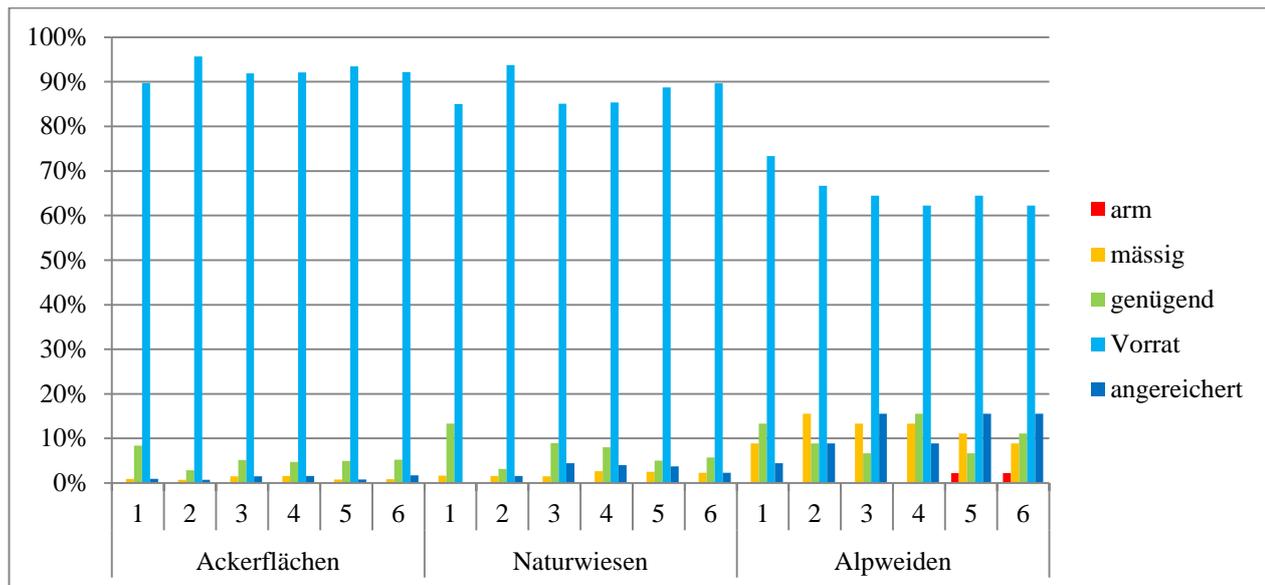


Abbildung 2.2.3-3: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Mn AAE10 gemäss Modell GRUD 2017

Die Mangan-Gehalte sind im Kanton sehr hoch, werden doch 90 % der Ackerflächen und Naturwiesen gemäss Modell GRUD 2017 als auf «Vorrat» versorgt bewertet. Nur einer von 250 Standorten – eine Alpweide – besitzt einen als «arm» bewerteten Mangangehalt.

2.2.4 Schwermetalle

Die Analyse der Schwermetalle wurde in das FRIBO-Programm aufgenommen, um die Belastung der landwirtschaftlichen Böden im Kanton mit anorganischen Schadstoffen zu messen. Es gilt hervorzuheben, dass wir nicht verseuchte Zonen gesucht haben. Es ging darum, ein möglichst objektives Bild des durchschnittlichen Verschmutzungsgrads der Böden zu erhalten, die einer diffusen Verunreinigung mit Schwermetallen ausgesetzt sind.

Alle Standorte wurden gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998) auf Schwermetalle untersucht. Der Gehalt an Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Zink (Zn) wird seit dem Aufbau des FRIBO im Jahr 1987 gemessen und derjenige an Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) seit 1989.

Für die Interpretation der Schwermetallgehalte wurde eine einfache Methode gewählt, die auf den in der VBBo definierten Richt-, Prüf- und Sanierungswerten fusst (Tabelle 2.4–1). Da die Resultate der Bodenanalyse wegen der Beprobung nur begrenzte Genauigkeit aufweisen, ist eine strenge Interpretation nicht möglich; sie soll lediglich Anhaltspunkte liefern.

Bei Überschreitung des Richtwertes im Horizont 0–20 cm vergleichen wir das Resultat mit dem Gehalt im Horizont 60–90 cm. Ist der Wert in der Tiefe ebenfalls hoch, kann auf eine Verschmutzung natürlichen (geologischen) Ursprungs geschlossen werden. Wenn dieser Wert jedoch tiefer ist, kann eine anthropogene Verschmutzung angenommen werden. Diese Methode eignet sich für die meisten Schwermetalle, aber weniger für Blei und Cadmium (Baize, 1997). Diese beiden Metalle kommen im humushaltigen Horizont oft in grösseren Mengen vor als im tieferen Horizont. In gewissen Fällen können sich tiefergehende Analysen als erforderlich erweisen.

| Schadstoffe | Cadmium | Kobalt | Chrom | Kupfer | Nickel | Blei | Zink |
|----------------|---------|-----------------|-------|------------------|--------|------|------|
| Richtwert | 0.8 | 25 ¹ | 50 | 40 | 50 | 50 | 150 |
| Prüfwert | 2 | | | 150 ² | | 200 | |
| Sanierungswert | 30 | | | 1000 | | 2000 | 2000 |

Tabelle 2.2.4-1: Richt-, Prüf- und Sanierungswerte der wichtigsten Schwermetalle gemäss VBBo in mg/kg Trockensubstanz des Bodens (Gesamtgehalte landwirtschaftlicher Böden)

¹Aufgehoben seit 1998

²Der Prüfwert beträgt 150 ppm für Futtermittelproduktionszonen (Dauerwiesen)

2.2.4.1 Kobalt, Chrom und Nickel

Auf die Grafiken und Karten zu Kobalt, Chrom und Nickel wurde verzichtet, damit wesentliche Inhalte Vorzug geniessen. Auf Kobalt wurde verzichtet, da der Richtwert aus der Liste der VBBo gestrichen wurde, weil dieser Wert in der Schweiz – und im Kanton Freiburg – praktisch nie erreicht wurde.

Beim Chrom überschritten bloss vier Standorte den Richtwert. Zwei davon sind Alpweiden mit Chrom geogenen Ursprungs. Die beiden anderen Standorte, eine Dauerwiese und eine Ackerfläche, weisen eine leichte Überschreitung des Richtwertes auf, wobei die Chromkonzentration stabil ist.

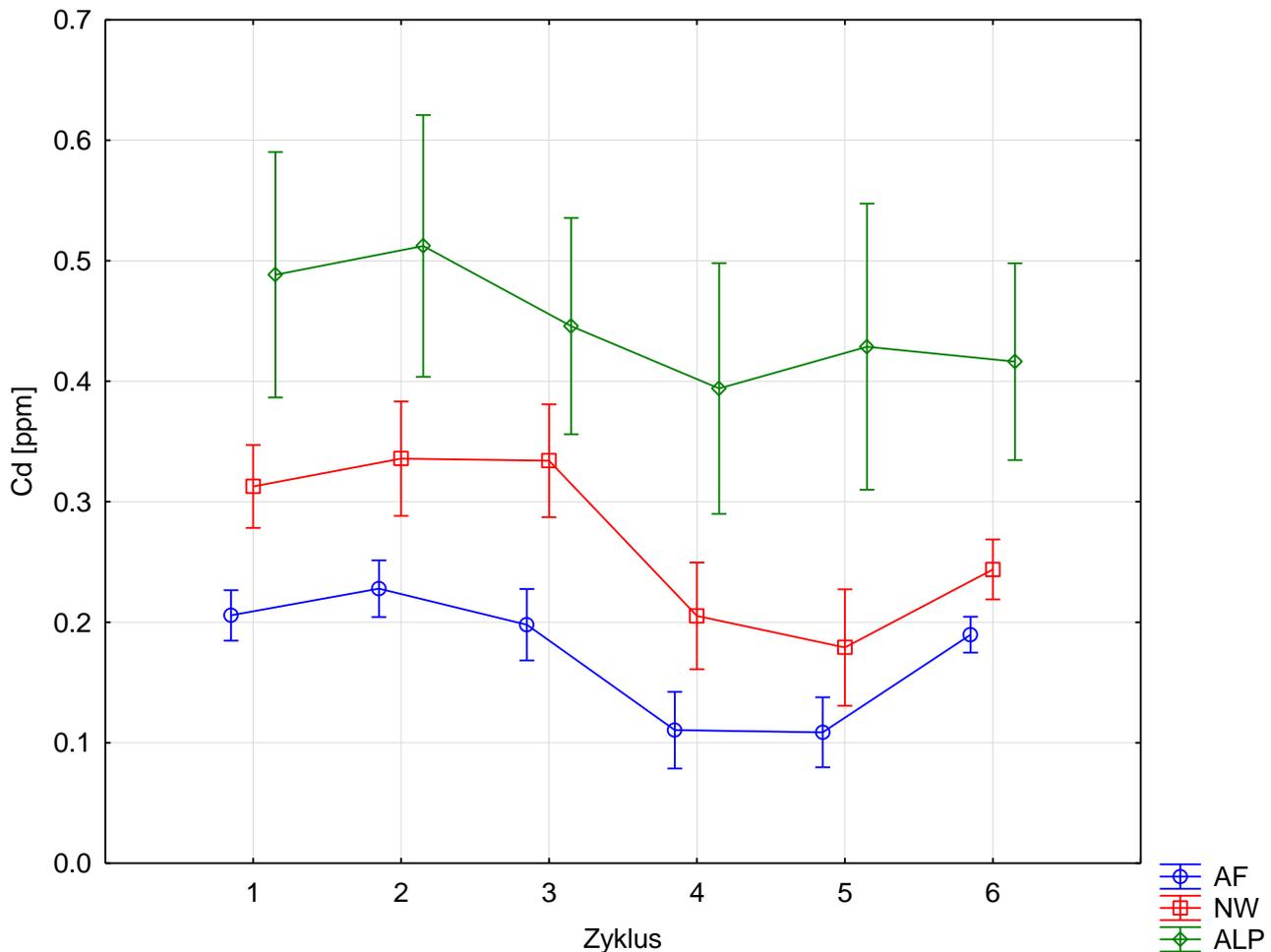
Beim Nickel werden vier Überschreitungen des Richtwertes registriert, wobei die betroffenen Standorte Nickel geogenen Ursprungs enthalten. Die Nickelkonzentration blieb im Verlauf der Zeit stabil.

Die Konzentrationen dieser drei Schwermetalle variierten in den letzten zwei Zyklen nur sehr wenig und die Karten im 5. FRIBO-Bericht (Rossier et al., 2012) entsprechen immer noch der heutigen Situation. Die vollständigen Statistiken pro Bodennutzungstyp und Zyklus sind für diese Schwermetalle im Anhang verfügbar.

2.2.4.2 Cadmium

Cadmium ist eines der seltenen chemischen Elemente, dem keine bekannte Funktion im Stoffwechsel der Tiere zukommt. Es stammt aus der Industrie, insbesondere aus Akkus, und findet sich manchmal in grossen Mengen auf Deponien. Cadmium gilt als relativ mobil und leicht biologisch verfügbar. Es kann von den Pflanzen aufgenommen werden und in der Nahrungskette konzentriert vorkommen. Cadmium ersetzt in diesem Fall das Kalzium und verursacht auch in sehr kleinen Dosen erhebliche Knochen-, Nieren- und Leberschäden.

Der Gesamtgehalt an Cd des Bodens wird wie bei allen anderen Schwermetallen nach Extraktion mit Salpetersäure (HNO₃) gemessen. Der Richtwert liegt bei 0.8 mg Cd/kg Boden.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| AF | 0.21 a | 0.23 a | 0.20 a | 0.11 a | 0.11 a | 0.19 a | Durchschn. Cd p= 5 % (logtransform) |
| NW | 0.31 a | 0.34 a | 0.33 a | 0.21 a | 0.18 a | 0.24 a | Durchschn. Cd p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 0.49 a | 0.51 a | 0.45 a | 0.39 a | 0.43 a | 0.42 a | Durchschn. Cd p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.4-1: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Cd

Der höchste Cd-Gehalt findet sich in den Alpweidenböden. Der geogene Ursprung wurde in einer Beprobungskampagne in 30–60 und 60–90 cm Tiefe sowie einer Diplomarbeit an der Universität Lausanne (Doffey, 1997) aufgezeigt. Die Werte auf Naturwiesen und Ackerflächen nahmen ab dem 4. Zyklus ab, sehr wahrscheinlich infolge der Reduktion der atmosphärischen Ablagerungen und des Ausbringungsstops für Klärschlamm in der landwirtschaftlichen Zone (Rossier et al., 2012). Die Zunahme der Cd-Gehalte im 6. Zyklus ist nur ein analytisches Artefakt: Das mit den Analysen betraute Labor schaffte ein präziseres Detektionsgerät an. Zahlreiche Werte, die früher unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen und willkürlich auf 0 ppm gesetzt wurden, können jetzt präzise quantifiziert werden. Die Abnahme der Standardabweichung im letzten Zyklus bestätigt dies.

Beurteilung gemäss Richtwert

Die vier Standorte mit einer Zunahme des Richtwerts sind alles Alpweiden. Der geogene Ursprung ist erwiesen.

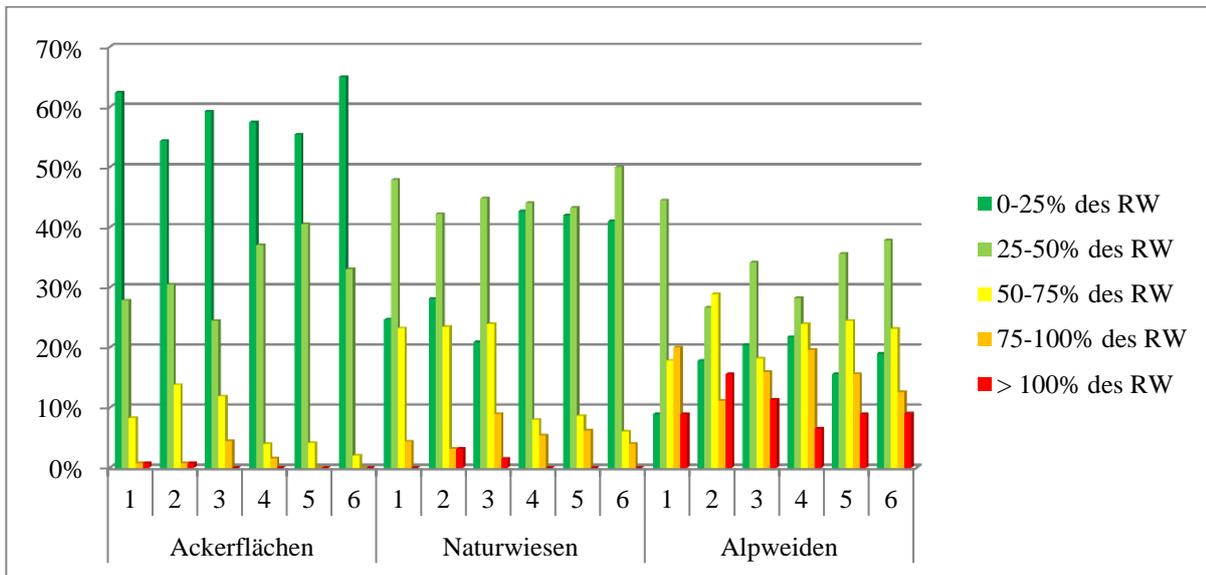
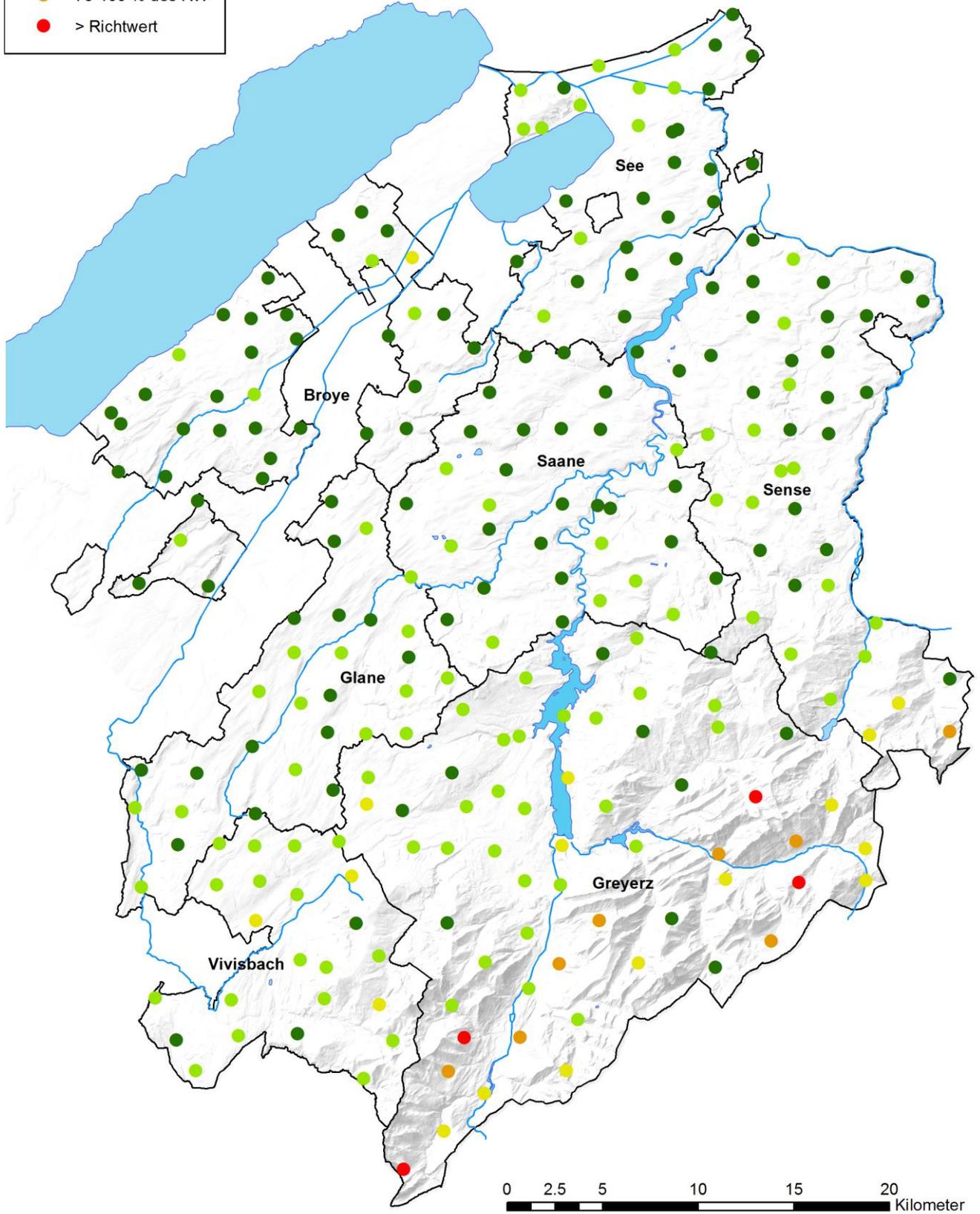
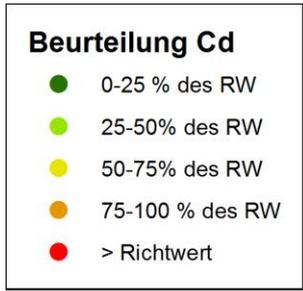


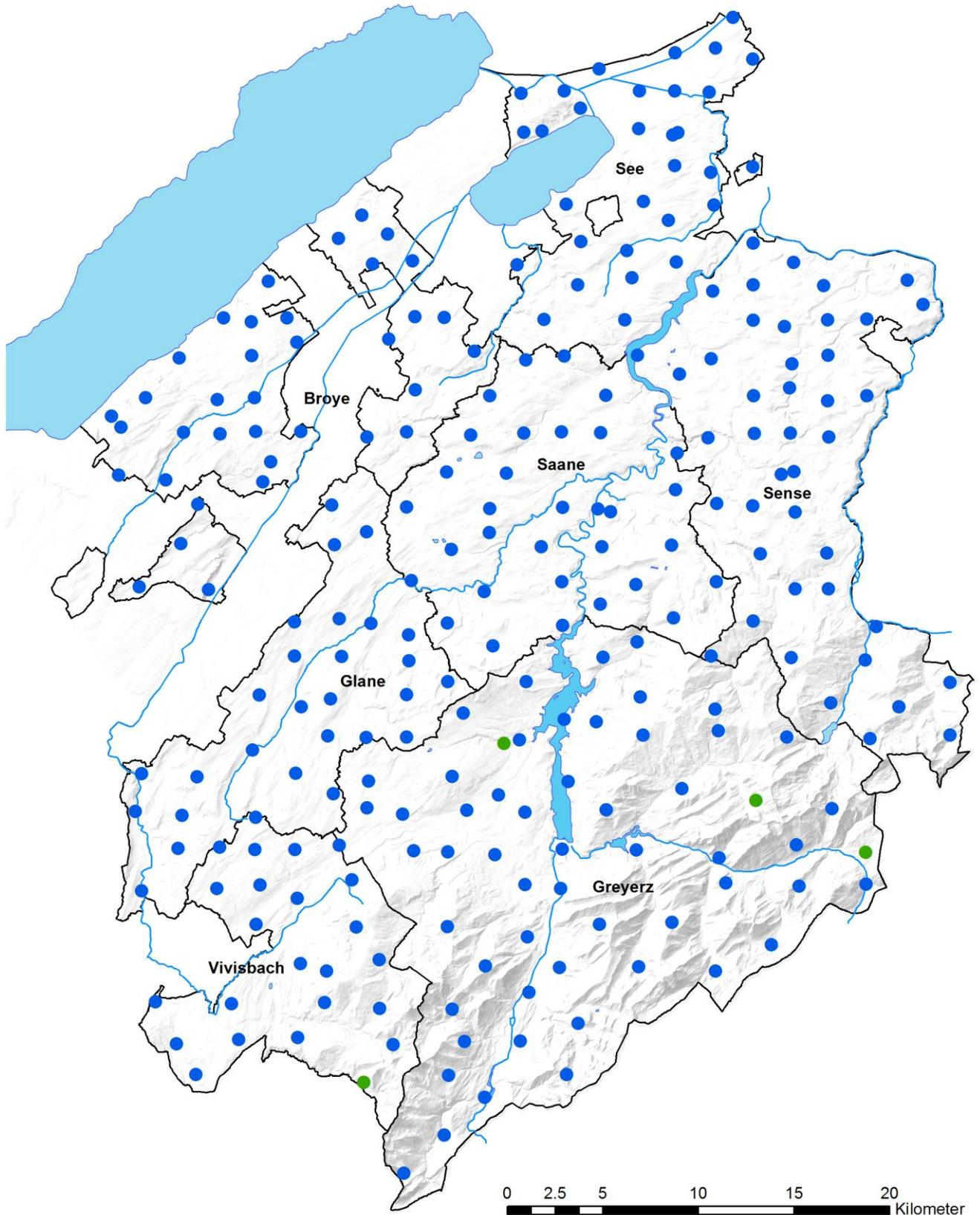
Abbildung 2.2.4-2: Verteilung der Standorte gemäss Cd-Richtwert

Entwicklung pro Standort

4 Standorte weisen eine signifikante Abnahme des Cd-Gehalts aus: 1 Naturwiese und 3 Alpweiden.



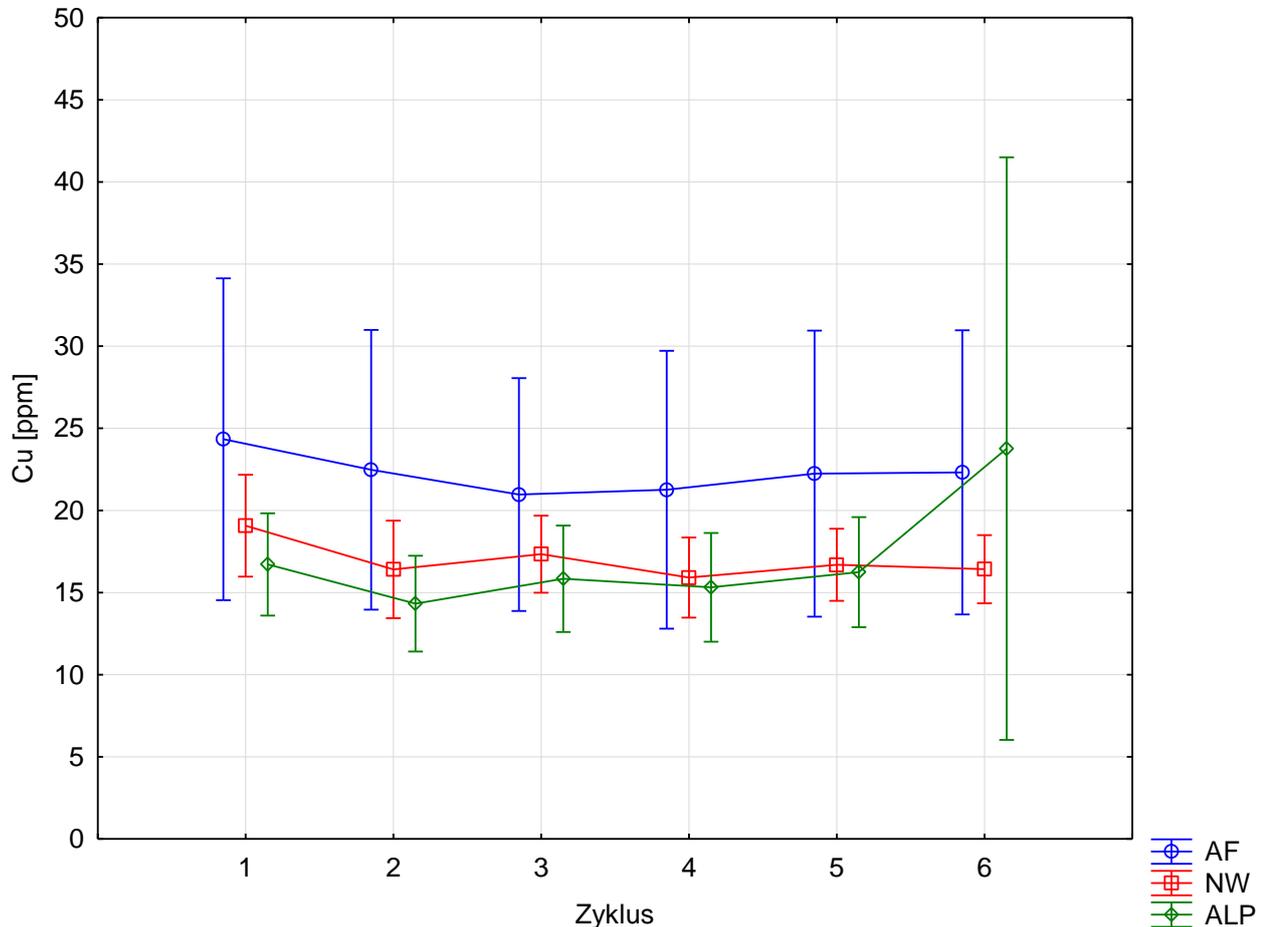
Karte 2.2.4-1: Beurteilung des Gehalts an Cd – sechster Zyklus



Karte 2.2.4-2: Entwicklung des Gehalts an Cd pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.4.3 Kupfer

Kupfer gilt als wenig mobil, ausser in extrem sauren oder vergleyten Böden. In sehr tonarmen, sandigen oder schluffigen Kulturböden können massive Gaben an der Oberfläche (Fungizidbehandlungen) in die Tiefe migrieren (Baize, 1997). Es ist ein wichtiges Spurenelement für Mensch und Tier. In zu hoher Konzentration kann es für Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen giftig sein (Reutimann, 2006). Der Richtwert liegt bei 40 mg Cu/kg Boden.

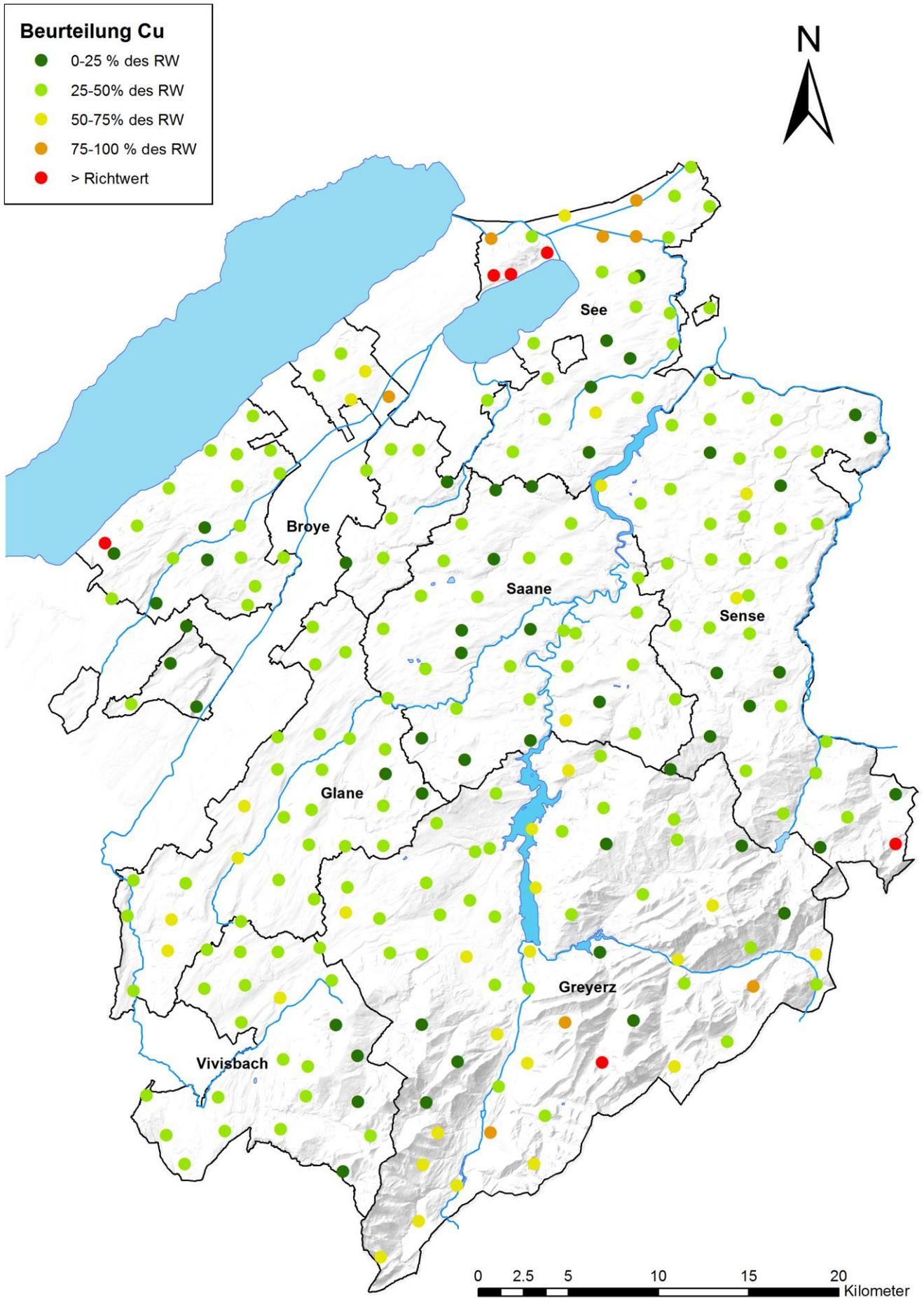


| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| AF | 24.34 a | 22.48 a | 20.97 a | 21.26 a | 22.25 a | 22.32 a | Durchschn. Cu p= 5 % (logtransform) |
| NW | 19.07 a | 16.41 a | 17.34 a | 15.91 a | 16.69 a | 16.42 a | Durchschn. Cu p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 16.71 a | 14.33 a | 15.84 a | 15.32 a | 16.24 a | 23.76 a | Durchschn. Cu p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.4-3: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Cu

Während der sechs Zyklen ist keine signifikante Entwicklung des Cu-Gehalts zu verzeichnen.

Die Ackerflächen und Alpweiden enthalten den höchsten Durchschnittsgehalt an Cu. Im sechsten Zyklus nahm der Durchschnittswert auf den Alpweiden um rund 8 ppm zu. Die Erklärung dafür ist eine Alpweide, deren Kupferkonzentration sich ohne bekannten Grund verzehnfachte (Karte 2.2.4-4: Entwicklung des Gehalts an Cu pro Standort während der sechs Zyklen).



Karte 2.2.4-3: Beurteilung des Gehalts an Cu – sechster Zyklus

Die wichtigsten Eintragsquellen von Cu sind kupferhaltige Pflanzenschutzmittel in den Spezialkulturen sowie Klärschlamm und Hofdünger. Gemäss Keller & al. (2005) wurden die grössten Kupfereinträge auf Betrieben mit den grössten Tierbesatz pro LN gemessen. Sie rühren hauptsächlich von der Verwendung kupferhaltiger Zusatzstoffe in der Tierfütterung – insbesondere Schweinefütterung – her.

In den Empfehlungen des Gelben Buchs (Agroscope, 2004) wurden die Kupfergaben in Form von Zusatzstoffen für Mast- und Zuchtschweine gegenüber der älteren Ausgabe von 1993 um rund 20 % reduziert. Die Futtermittelverkäufer haben die Umweltaspekte in ihren Rezepturen vielleicht auch berücksichtigt und den Cu-Gehalt im Kraftfutter gesenkt.

Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) stellt eine Zunahme des Cu-Gehalts auf den intensiv bewirtschafteten Weidestandorten in ihrem Beobachtungsnetz fest [Gubler et al., 2015]. Diese Beobachtung kann im FRIBO-Netz nicht bestätigt werden. Wie auf der Karte 2.2.4-4: Entwicklung des Gehalts an Cu pro Standort während der sechs Zyklen ersichtlich, zeigt nur ein Standort auf einer Dauerwiese eine signifikante Zunahme des Kupfergehalts.

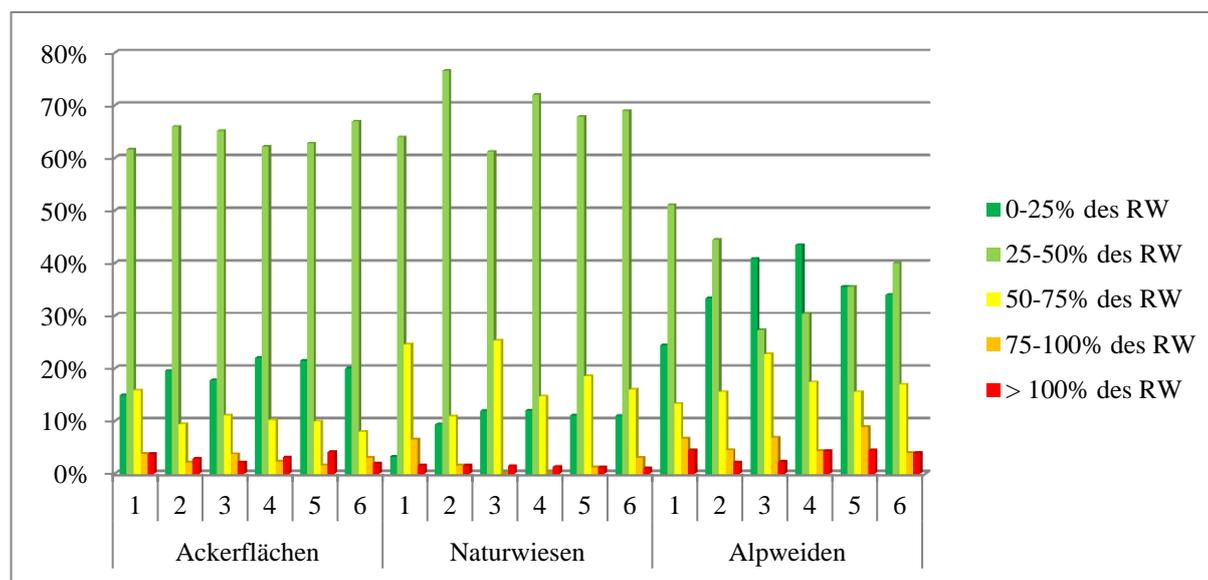


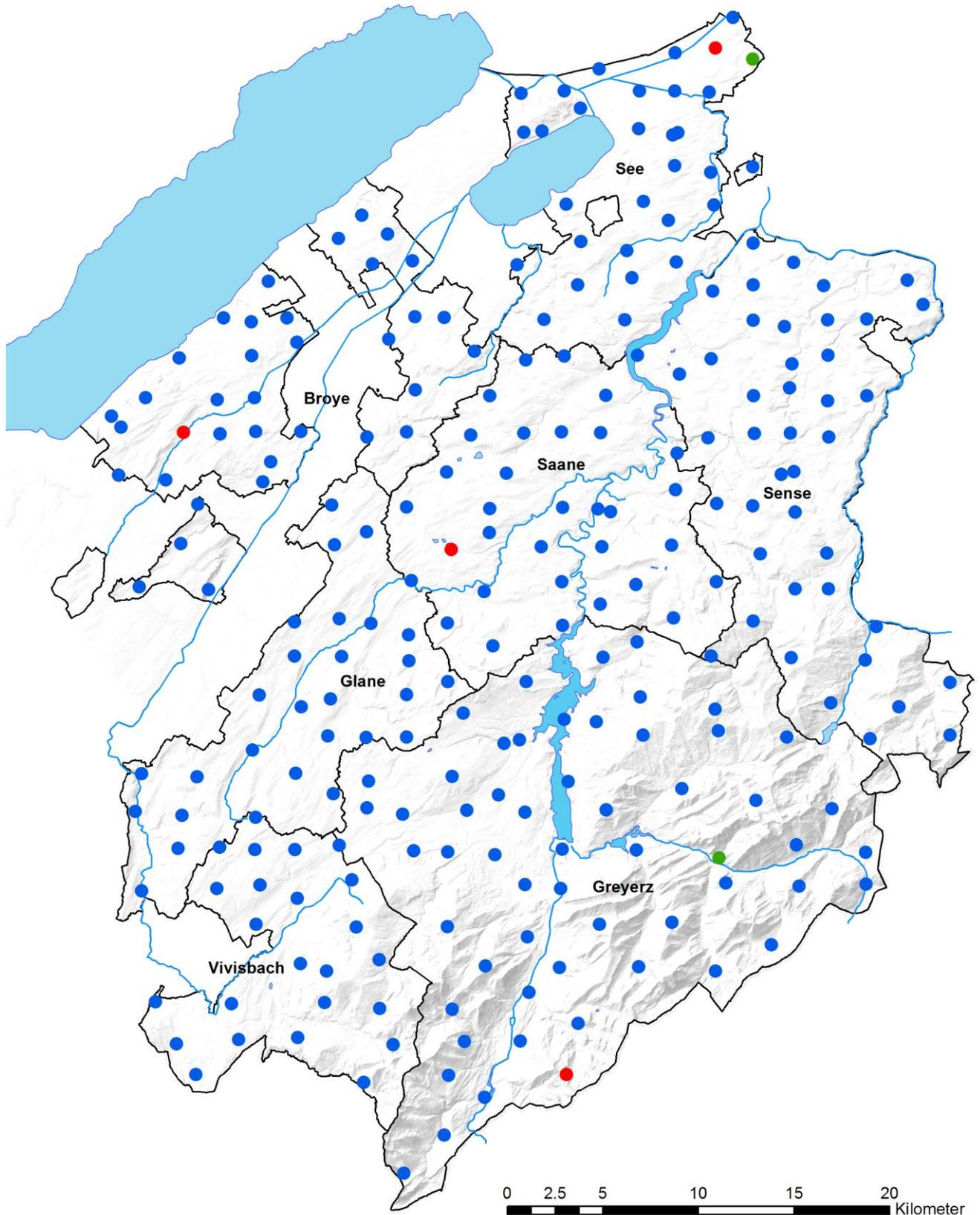
Abbildung 2.2.4-4: Verteilung der Standorte gemäss Richtwert des Cu

Beurteilung gemäss Richtwert

Im sechsten Zyklus ergaben sich an 6 Standorten Gehalte, die über dem Richtwert lagen (Karte 2.2.4-3: Beurteilung des Gehalts an Cu – sechster Zyklus). 3 Standorte wurden im ersten FRIBO-Bericht bereits erfasst und beschrieben (Juliern & Morand, 1995). Es sind dies drei Rebberge. Eine Alpweide weist leicht höhere Gehalte als der Richtwert auf, wobei der Ursprung als geogen identifiziert wurde. Eine andere Alpweide weist Gehalte von 400 ppm auf – sehr wahrscheinlich infolge einer fahrlässigen Verschmutzung. Ein Standort auf einer Dauerwiese ist ein ehemaliger Obstgarten, der bestimmt mit Kupfer behandelt wurde. Es ist interessant festzustellen, dass die Gehalte der Rebberge zwar höher sind als der Prüfwert (150 ppm), aber nicht mehr zunehmen.

Entwicklung pro Standort

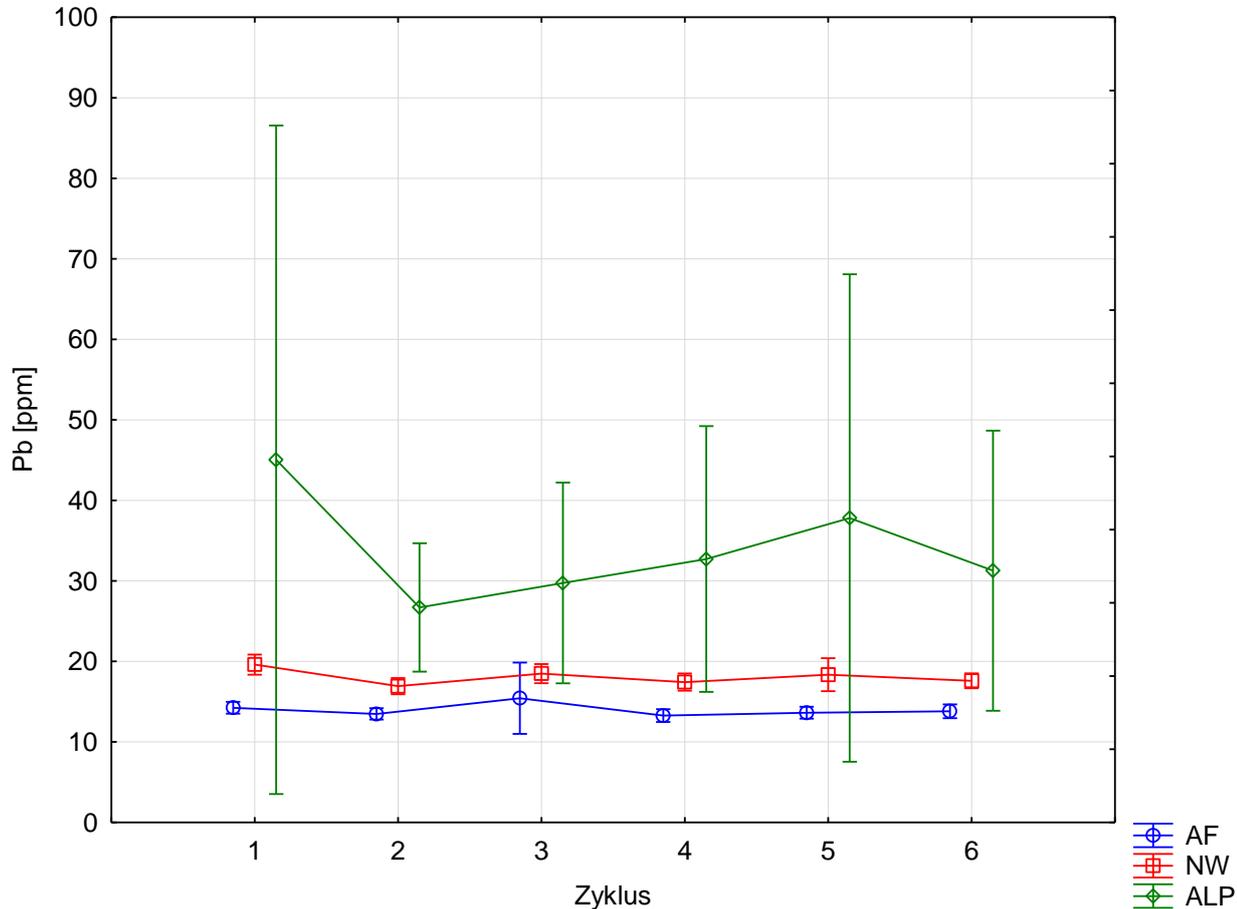
2 Standorte weisen eine signifikante Abnahme des Cu-Gehalts auf (Karte 2.2.4-4: Entwicklung des Gehalts an Cu pro Standort während der sechs Zyklen). Es handelt sich um 1 Ackerfläche mit einer Fruchtfolge von Acker- und Gemüsebau und um 1 Dauerwiese. 4 Standorte weisen eine Erhöhung der Cu-Gehalte auf: 1 Gemüsebaufläche, 1 Parzelle mit viel Kartoffeln und manchmal Gemüse in der Fruchtfolge, 1 Dauerwiese und 1 Alpweide. Letztere liegt in der Nähe der Alphütte, und eine wilde Freisetzung einer kupferhaltigen Lösung zum Beispiel zur Behandlung der Rinderklauen ist eine Hypothese. Ausser auf der Alpweide sind die erwähnten Gehalte gering.



Karte 2.2.4-4: Entwicklung des Gehalts an Cu pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.4.4 Blei

Blei ist der Schadstoff, der im Boden am wenigsten mobil ist, und zwar etwa 100-mal weniger als Cadmium (Baize, 1997). Wegen seiner grossen Affinität zur organischen Substanz sammelt es sich an der Bodenoberfläche an, wenn die Pb-Quelle anthropogen ist. Aufgrund seiner starken Adsorption migriert Blei zudem nicht leicht in die oberirdischen Pflanzenteile. Der Richtwert liegt bei 50 mg Pb/kg Boden.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| AF | 14.24 a | 13.48 a | 15.42 a | 13.28 a | 13.63 a | 13.82 a | Durchschn. Pb p= 5 % (logtransform) |
| NW | 19.60 a | 16.93 b | 18.48 ab | 17.43 ab | 18.35 ab | 17.58 ab | Durchschn. Pb p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 45.05 a | 26.70 a | 29.74 a | 32.72 a | 37.81 a | 31.27 a | Durchschn. Pb p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.4-5: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Pb

Die Alpweiden weisen die höchsten durchschnittlichen Bleigehalte auf und die Ackerflächen die tiefsten (Abbildung 2.2.4-5: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Pb). Der hohe Durchschnittswert bei den Alpweiden ist teilweise auf einen verschmutzten Standort zurückzuführen, dessen Gehalt über dem Prüfwert liegt (200 ppm). Im Übrigen sind die hohen Gehalte einiger Alpweiden geogenen Ursprungs und wurden im ersten FRIBO-Bericht (Julien et Morand, 1995) erklärt. Es wurde keine signifikante Entwicklung der durchschnittlichen Gehalte auf den Ackerflächen und Alpweiden verzeichnet. Eine signifikante Abnahme an den Standorten auf Naturwiesen wurde hingegen zwischen dem 1. und 2. Zyklus beobachtet. Auf den Ackerflächen und Alpweiden wurde ebenfalls eine Abnahme festgestellt, die allerdings nicht signifikant ist. Dies liegt sehr wahrscheinlich an der systematischen Einführung des bleifreien Benzins ab Anfang der 1990er-Jahre.

Die Bleigehalte stehen im Zusammenhang mit der Körnung – statistisch aufgezeigt durch Baize (1997) –, was die höheren Gehalte im Süden des Kantons erklärt.

Die atmosphärischen Ablagerungen sind verantwortlich für 70% der Bleieinträge auf den Parzellen (Keller & al., 2005). Diese nahmen von 1990 bis 2005 signifikant, um 80 %, ab (Thöni & al., 2008). Nebst dem bleihaltigen Benzin stellten die Klärschlämme, die auf den landwirtschaftlichen Parzellen ausgebracht wurden, eine mögliche Schadstoffquelle dar. Das Ausbringen ist seit 2008 verboten.

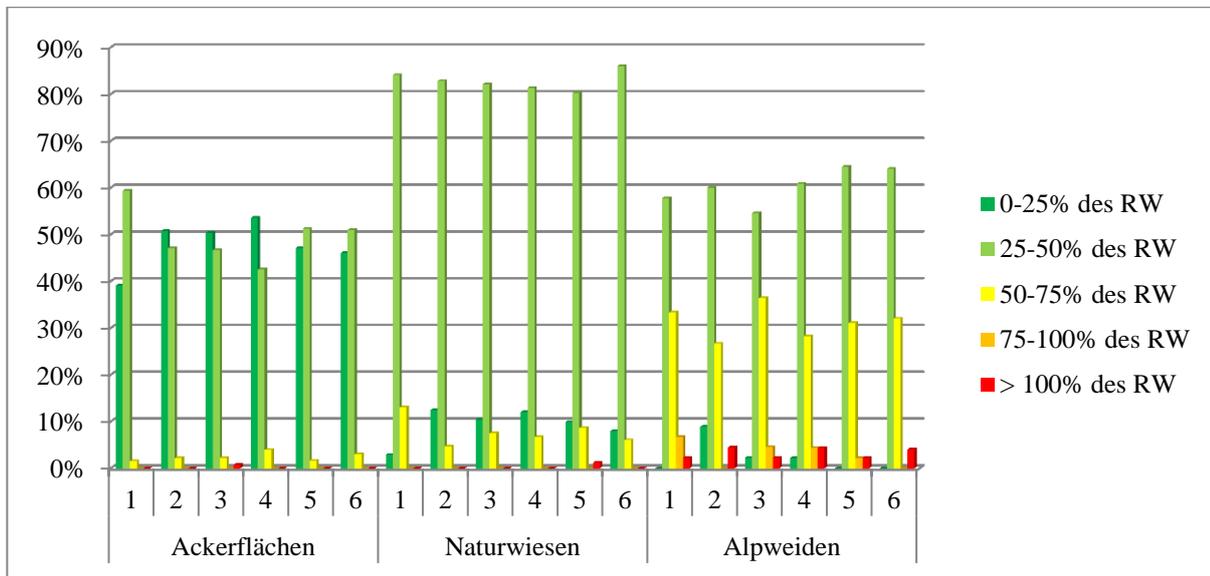


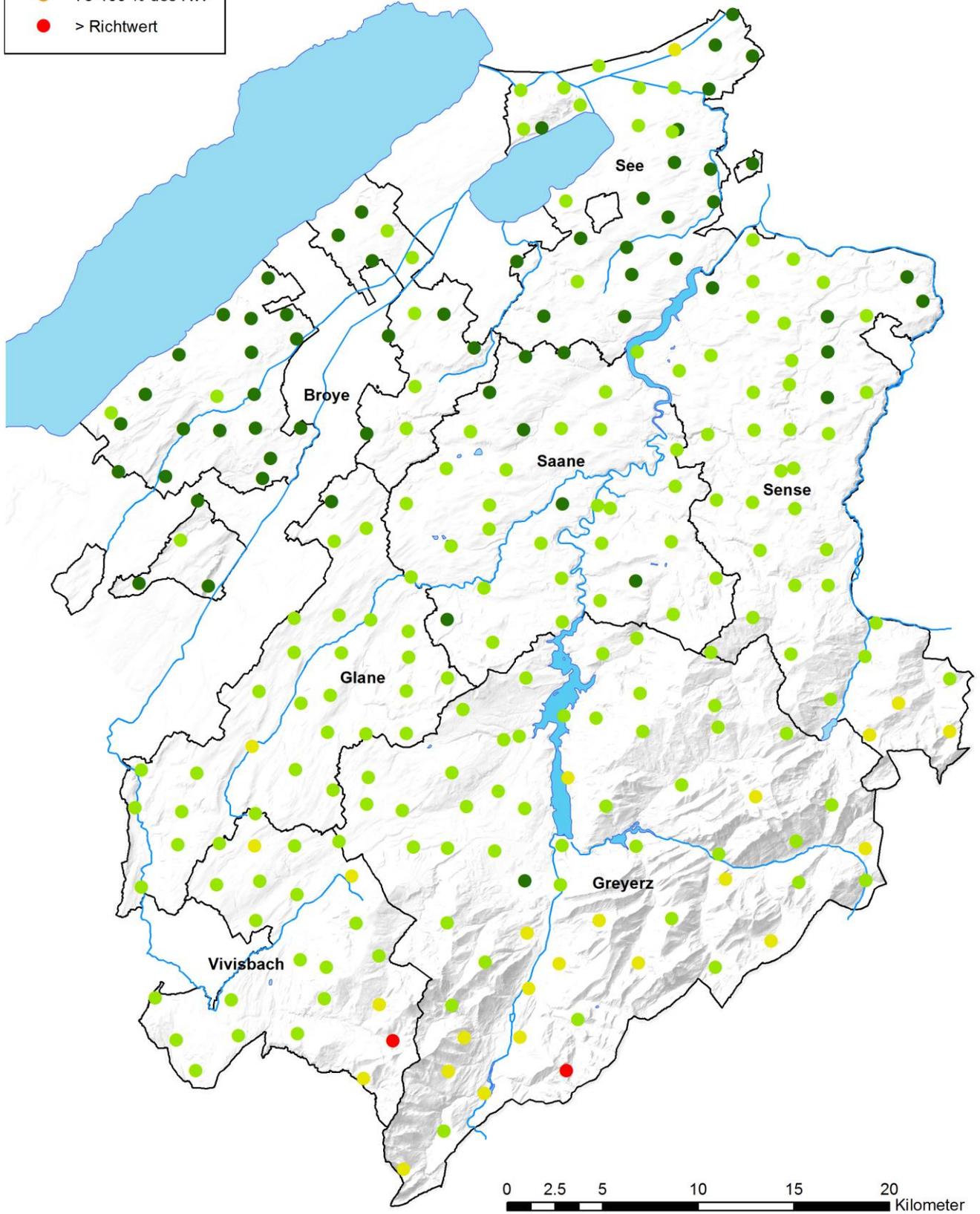
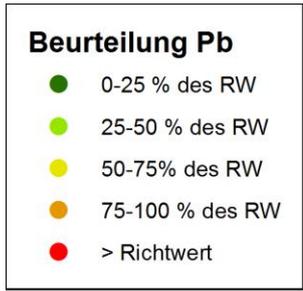
Abbildung 2.2.4-6: Verteilung der Standorte gemäss Richtwert des Pb

Beurteilung gemäss Richtwert

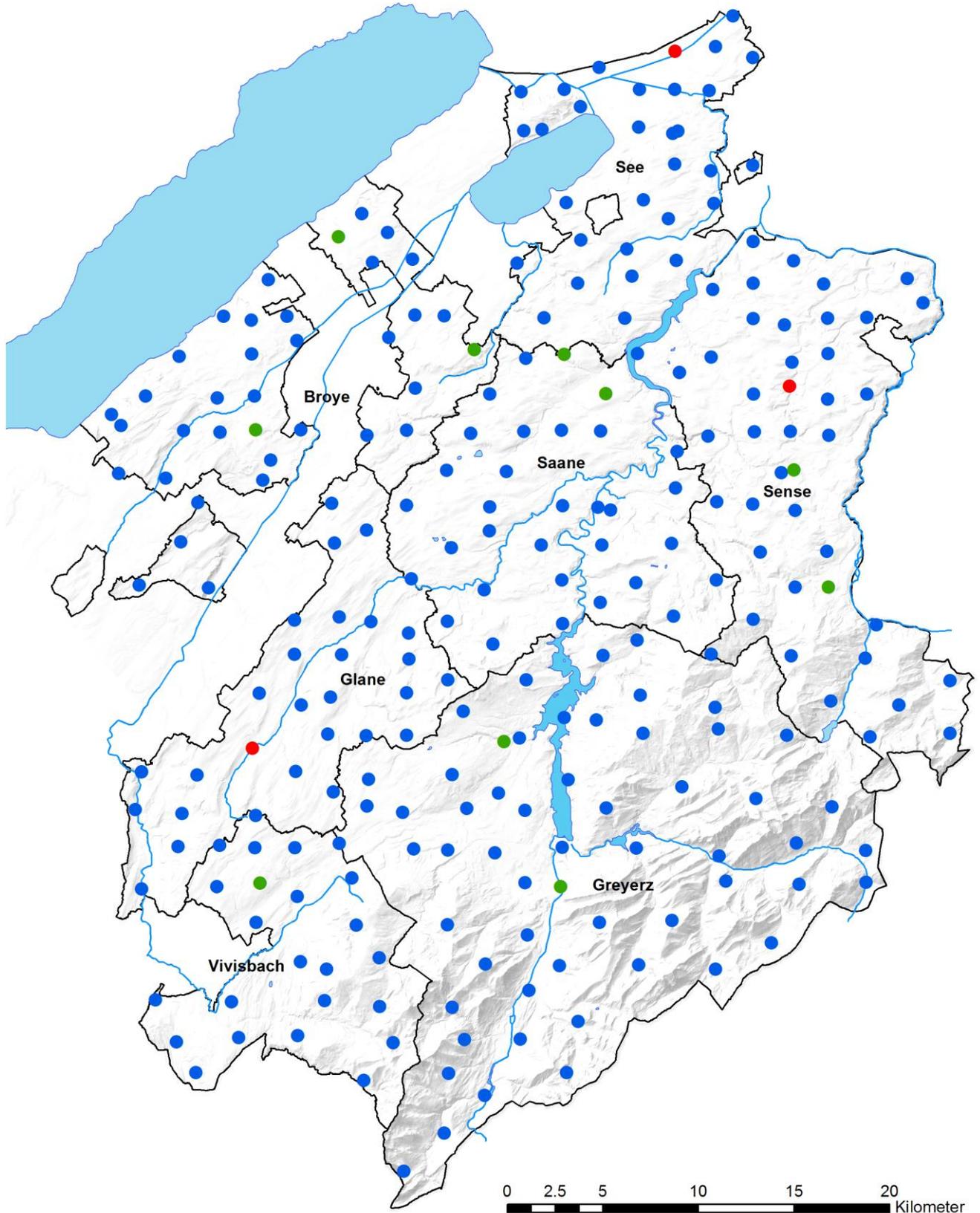
Im sechsten Erhebungszyklus wiesen zwei Standorte auf Alpweiden höhere Gehalte als der Richtwert auf (Karte 2.2.4-5: Beurteilung des Gehalts an Pb – sechster Zyklus). Einer dieser Standorte ist ein ehemaliger Schiessplatz der Armee, der bereits bei der ersten Erhebung verzeichnet wurde. Der Gehalt der anderen Alpweide lag bei der letzten Probenahme plötzlich und unerklärbar höher. Die Bohrungspunkte können von einem Zyklus zum anderen um einige Zentimeter abweichen, und es genügt, einmal mit einer Metallfraktion in Kontakt zu kommen, um den Wert der Probe erheblich zu verändern.

Entwicklung pro Standort

Die Karte 2.2.4-6: Entwicklung des Gehalts an Pb pro Standort während der sechs Zyklen zeigt, dass 10 Standorte eine signifikante Abnahme des Pb-Gehaltes verzeichnen. 5 davon sind Ackerflächen und 5 Naturwiesen. Die 3 Standorte mit einer Zunahme sind 2 Ackerflächen und 1 Naturwiese. Auf einer Ackerfläche wurde in den 1990er-Jahren gekalkter Schlamm ausgebracht. Die andere Ackerfläche, eine Gemüsebauparzelle mit schwarzer Erde, wurde seit 2012 nicht mehr gepflügt. Der Pflugverzicht verursachte möglicherweise eine Pb-Akkumulation in den oberen Bodenschichten. Für die Dauerwiese wird keine Hypothese aufgestellt. Alle diese Variationen sind gering und schwer zu erklären. Es kann sich um räumliche oder analytische Variabilität handeln, aber es gibt keine allgemeine Tendenz, da sich die Durchschnitte nicht signifikant veränderten.



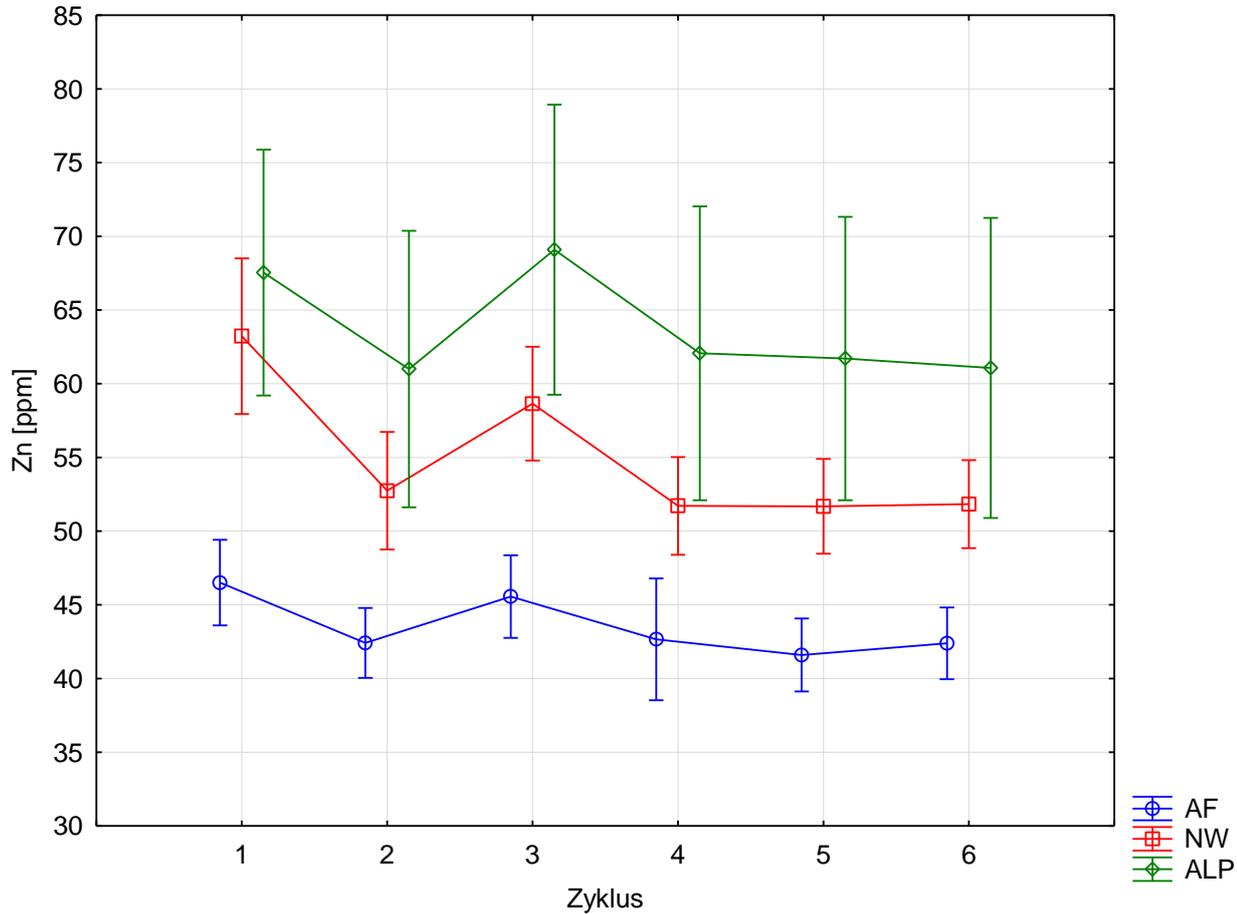
Karte 2.2.4-5: Beurteilung des Gehalts an Pb – sechster Zyklus



Karte 2.2.4-6: Entwicklung des Gehalts an Pb pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.4.5 Zink

Die Zinkzufuhr über die Luft wird in Schweizer Studien belegt (Meyer, 1991; Desaulles & Studer, 1993) und variiert zwischen 80 und 500 g/ha/Jahr. Zn ist eines der mobilsten Schwermetalle im Boden, wird aber von der organischen Substanz und den mineralischen Bestandteilen des Bodens leicht adsorbiert. Dies führt zu einer Zn-Akkumulation in den Oberflächenschichten (Loué, 1986). Der Richtwert beträgt 150 mg Zn/kg Boden.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|--|
| AF | 46.51 a | 42.41 a | 45.56 a | 42.66 a | 41.60 a | 42.39 a | Durchschn. Zn p= 5 % (logtransform) |
| NW | 63.23 a | 52.74 b | 58.65 ab | 51.71 b | 51.68 b | 51.83 b | Durchschn. Zn p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 67.54 a | 60.99 a | 69.09 a | 62.06 a | 61.71 a | 61.07 a | Durchschn. Zn p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.4-7: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Zn

Die Abbildung 2.2.4-7: Allgemeine Entwicklung des mit Salpetersäure extrahierten Zn zeigt, dass die Alpweiden am meisten Zn enthalten und die Ackerflächen am wenigsten.

Die Alpweiden und Ackerflächen verzeichnen keine signifikante Entwicklung. Auf den Naturwiesen ist der Zinkgehalt im 2., 4., 5. und 6. Zyklus signifikant tiefer als im 1. Zyklus. Die Tatsache, dass der durchschnittliche Zn-Gehalt im 1. und 3. Zyklus bei allen drei Bodennutzungstypen höher ist, lässt auf atmosphärische Ablagerungen oder auf ein analytisches Problem schliessen.

Die Zn-Mengen aus atmosphärischem Eintrag nahmen zwischen 1990 und 2005 um ca. 16 % ab (Thöni & al., 2008) und zwischen 2005 und 2010 um 32 % (BAFU, 2013). Die anderen Eintragsquellen sind Pflanzenschutzmittel, Klärschlämme, Reifenabnutzung im Strassenverkehr, Verbrennungsanlagen und metallverarbeitende Betriebe, aber vor allem auch Hofdünger (Keller & al., 2005). Wie Cu finden sich viele zinkreiche Zusatzstoffe im Tierfutter, und auch die Herdengrösse beeinflusst die Zink-Menge, die auf der Betriebsfläche ausgebracht wird.

In den Empfehlungen des Gelben Buchs (Agroscope, 2005) wurden die Zn-Gaben in Form von Zusatzstoffen in der Schweinefütterung von 20 auf 30 % reduziert gegenüber der Ausgabe von 1993.

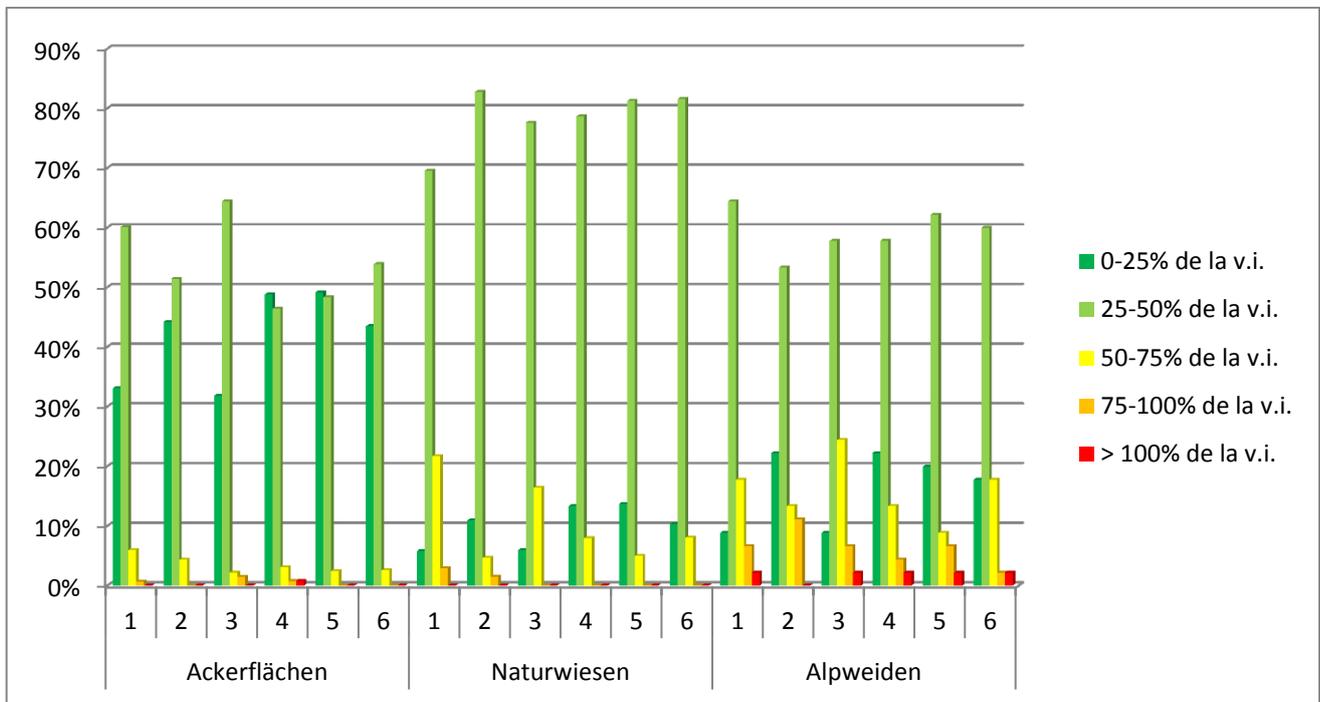


Abbildung 2.2.4-8: Verteilung der Standorte aufgrund des Richtwertes des Zn

Beurteilung aufgrund des Richtwertes

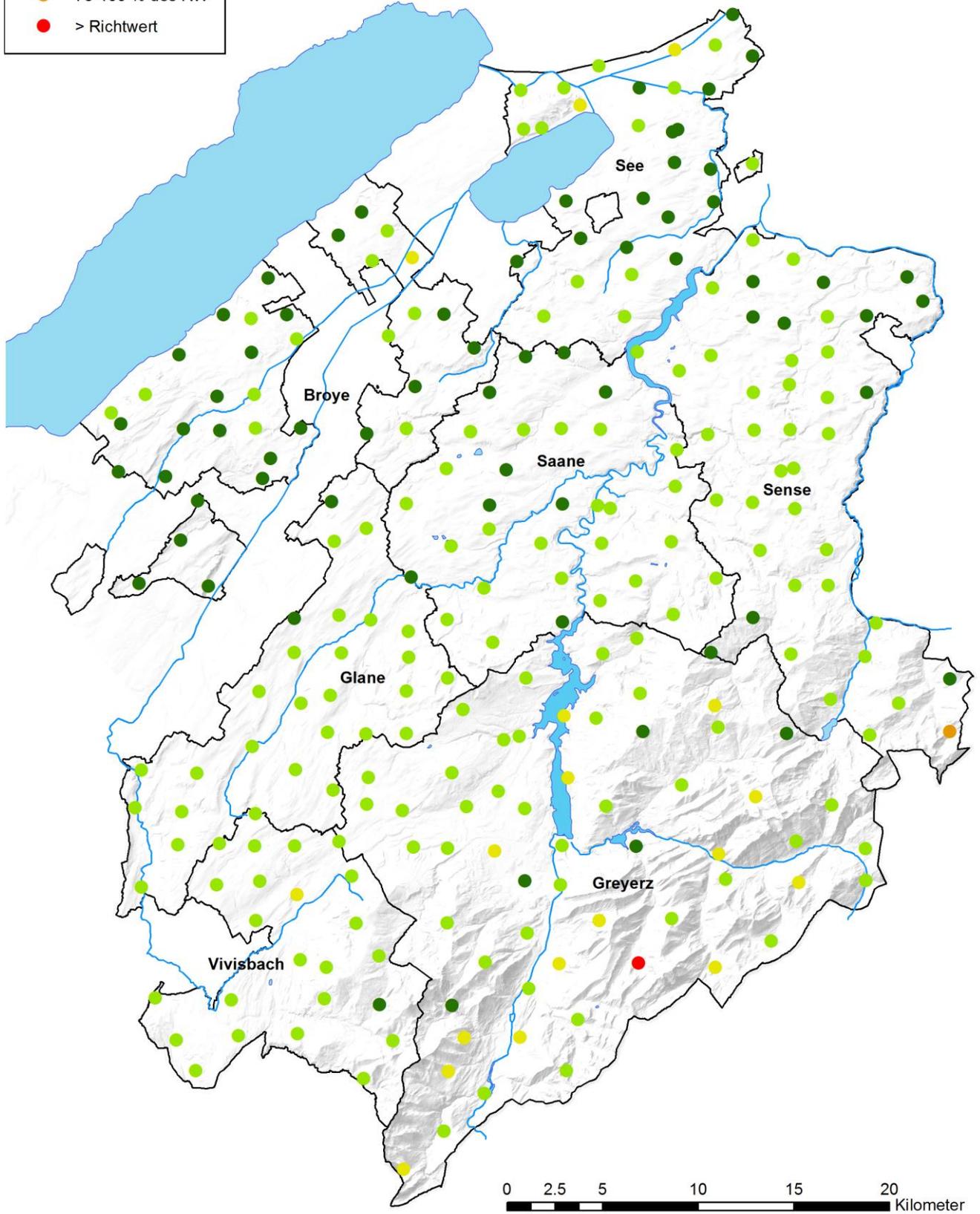
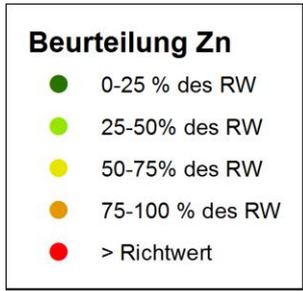
Die Karte 2.2.4-7: Beurteilung des Gehalts an Zn – sechster Zyklus zeigt, dass ein Standort Gehalte aufweist, die den Richtwert übersteigen. Es handelt sich um eine Alpweide. Eine andere Alpweide weist ebenfalls hohe Zn-Gehalte auf (75–100 % des Richtwertes). Die Ursache der Überschreitung des Richtwertes ist nicht geogen, und die Zn- und Cu-Gehalte dieses Standortes nahmen im letzten Zyklus zu.

Der Zn-Gehalt der Mehrheit der Dauerwiesen und Alpweiden liegt zwischen 25 und 50 % des Richtwertes. Bei 97 % der Ackerflächen ist der Gehalt tiefer als die Hälfte des Richtwertes.

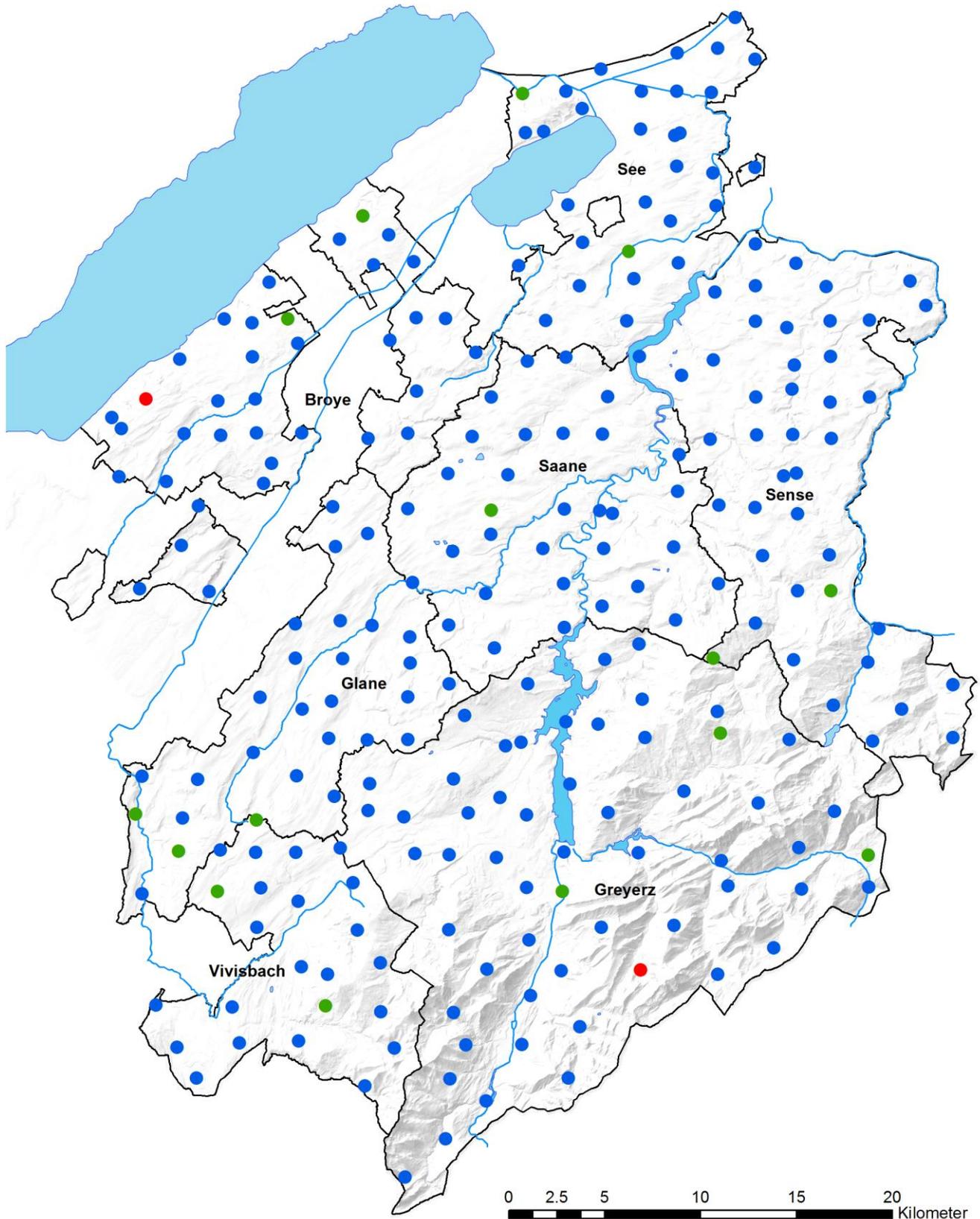
Entwicklung pro Standort

15 Standorte weisen eine signifikante Abnahme des Zn-Gehaltes auf (Karte 2.2.4-8: Entwicklung des Gehalts an Zn pro Standort während der sechs Zyklen). 9 dieser Standorte sind Ackerflächen, 2 Naturwiesen und 4 Alpweiden. Gemäss Keller & al. (2005) ist eine negative Zn-Bilanz auf Betrieben, die wenig oder gar keinen Hofdünger ausbringen, möglich. Man kann also davon ausgehen, dass eine Reduktion oder Aufgabe der organischen Düngung zur Gehaltsverminderung auf den betroffenen Parzellen geführt hat. In Sömmerungszonen kann dies einer Reduktion des Tierbesatzes entsprechen.

Ein Standort auf einer Ackerfläche im Broyebezirk weist eine signifikante Zunahme des Zn-Gehalts von 36 auf 40 ppm innerhalb von 30 Jahren auf. Der betroffene Betrieb züchtet intensiv Schweine. Für den Standort auf einer Alpweide, dessen Zn-Gehalt plötzlich zunahm, ist es schwierig eine Erklärung zu finden. Der hohe Gehalt an organischer Substanz könnte auf eine analytische Unsicherheit schliessen lassen.



Karte 2.2.4-7: Beurteilung des Gehalts an Zn – sechster Zyklus



Karte 2.2.4-8: Entwicklung des Gehalts an Zn pro Standort während der sechs Zyklen

2.2.5 Biologische Parameter

Die biologischen Analysen sind eine notwendige Ergänzung der physikalisch-chemischen Analysen, um den Gesundheitszustand der Böden zu ermitteln. Die Bodenbiologie ist unerlässlich, um die Bodenfruchtbarkeit langfristig aufrecht zu erhalten. Ein dauerhaft fruchtbarer Boden muss klimatische Veränderungen und – bis zu einem bestimmten Punkt – gewisse menschliche Tätigkeiten, die für ihn schädlich sind, ertragen können. Ein lebendiger und widerstandsfähiger Boden ist demnach die Voraussetzung.

Die mikrobielle Aktivität ist entscheidend, um Substanz- und Energieflüsse in den Bodenökosystemen zu kanalisieren und zu regulieren. Die Mikrobenpopulationen speichern in einem ausgeglichenen Boden mineralische Elemente in den oberen Horizonten, so sind diese vor der Auswaschung geschützt und können den Pflanzen vollständig zurückgegeben werden. Mikroorganismen haben entscheidenden Einfluss auf die Bodenstruktur, die Bildung von Huminstoffen und auf Wasser- und Gasaustausch, indem sie Umwandlungsprozesse in Substanzen anregen und mechanisch auf diese einwirken. Angesichts ihrer Wirkung auf die Umwelt sind diese Organismen sehr wichtig für die Fruchtbarkeit und Produktivität der landwirtschaftlichen Böden.

Die Bodenmikroorganismen reagieren sehr sensibel auf Umweltstörungen – ob natürlichen oder menschlichen Ursprungs. Daher sind gewisse Parameter des mikrobiellen Lebens wie die Biomasse sowie ihre Qualität und Vitalität gute Indikatoren für die Gesundheit des Bodensystems.

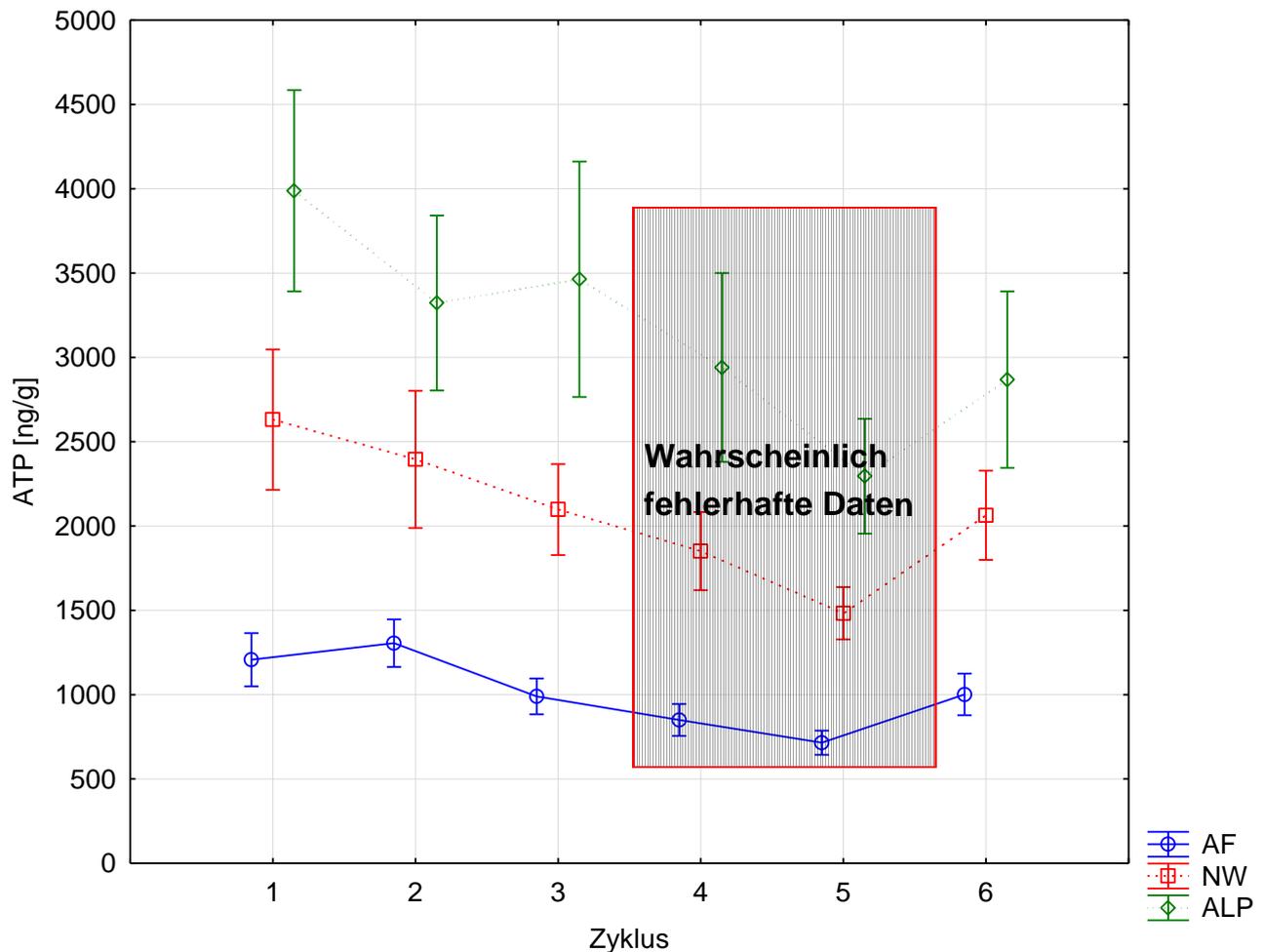
Im vorliegenden Bericht analysieren wir die Entwicklung der zwei wichtigsten Variablen, die im FRIBO-Bericht über die Entwicklung der biologischen Parameter (Rossier & Dessureault-Rompré, 2003) beschrieben wurden: die Biomasse ATP und die Mineralisierung von organischem Kohlenstoff nach Maire (1984).

Es gibt nur wenige Daten über die biologischen Bodenanalysen in der Schweiz und im Ausland, und es gibt noch weniger Erfahrungen über die Eignung dieser Messungen zur langfristigen Bodenbeobachtung. Die biologischen Messungen, die in den letzten 30 Jahren im Rahmen von FRIBO getätigt wurden, sind demnach sehr wertvoll und lehrreich.

2.2.5.1 Biomasse ATP

Adenosintriphosphat (ATP) ist in allen lebenden Zellen enthalten. Da dieses Molekül beim Tod der Zellen hydrolysiert wird, ist es ein guter Marker für lebende Organismen. Es dient der Übermittlung und Speicherung von Energie bei den meisten biochemischen Reaktionen. Somit ist dieses Molekül ein Indikator für die Energiemenge, die von den Bodenmikroorganismen gespeichert wurde, was die Ermittlung der Gesamtmasse der lebenden Mikroorganismen pro Bodeneinheit ermöglicht. Die Biomasse ATP ist positiv mit dem Ton- und Humusgehalt der Böden korreliert.

Vorbemerkung: Im letzten FRIBO-Bericht wurde eine Abnahme der Biomasse der Mikroorganismen bei allen Bodennutzungsarten erwähnt. Nach der Übernahme der ATP- und CO₂-Analyseverfahren durch das Labor *Sol-Conseil* im Jahr 2012 kann festgestellt werden, dass die ATP-Werte im sechsten Zyklus wieder zugenommen haben. Der Durchschnittswert für Ackerflächen und Naturwiesen liegt wieder auf dem Niveau des 3. Zyklus und derjenige für Alpweiden auf dem Niveau des 4. Zyklus. Dies zeigt, dass die Resultate des 4. und 5. Zyklus sehr wahrscheinlich mit analytischen Fehlern behaftet waren. Eine mögliche Ursache könnte die sehr kurze Haltbarkeit der Enzyme sein, die für die ATP-Extraktion verwendet werden: Mangelnde Strenge in dieser Hinsicht kann zu einer Unterbeurteilung der Messgrößen führen.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---|
| AF | 1188.90 ab | 1282.00 a | 977.52 bc | 837.95 cd | 702.86 d | 1001.60 bc | Durchschn. ATP p= 5 % (logtransform) |
| NW | 2631.00 a | 2395.10 ab | 2097.50 ab | 1851.00 bc | 1475.60 c | 2063.60 ab | Durchschn. ATP p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 3888.20 a | 3195.90 ab | 3270.50 ab | 2641.70 bc | 2200.20 c | 2868.10 bc | Durchschn. ATP p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.5-1: Allgemeine Entwicklung der Biomasse ATP

Die Ackerflächen weisen im Vergleich zu den Dauerwiesen und Alpweiden eine geringere mikrobielle Flora auf (Abbildung 2.2.5-1: Allgemeine Entwicklung der Biomasse ATP). Wie bereits von Rossier & Dessureault-Rompré (2003) in ihrem Bericht über die biologischen Parameter erwähnt, erklären sich diese Unterschiede der Böden mit den Gehalten an organischem Material und der Nutzung als Anbauflächen. Die Böden der Ackerflächen werden intensiv bearbeitet, und die Wurzelbiomasse fluktuiert erheblich, was die natürliche Aktivität der Mikroorganismen beeinträchtigt. Die Wiesenböden sind viel stabiler, da der Humus und demzufolge die mikrobielle Biomasse ständig erneuert werden.

Eine signifikante Abnahme zwischen dem ersten und sechsten Zyklus wird nur auf den Alpweiden registriert. Dies zeigt, dass die Biomasse der Mikroorganismen in dieser Bodennutzungstyp doch zurückgegangen ist. Da diese Flächen sehr extensiv bewirtschaftet werden und Belastungen und Düngeelementen nur wenig ausgesetzt sind, ist die

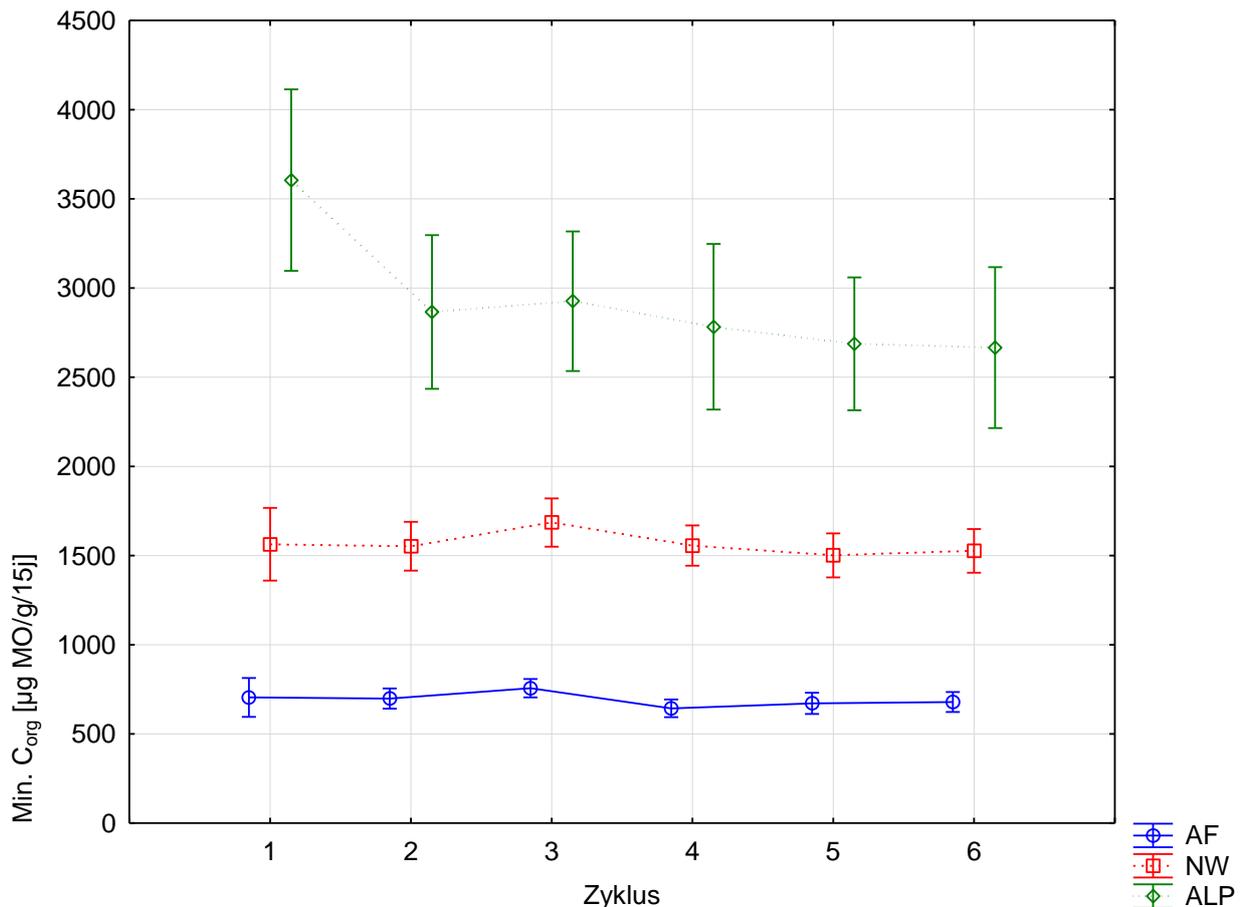
wahrscheinlichste Hypothese, dass es sich um eine Auswirkung des Klimawandels handelt. Eine andere mögliche Ursache wäre die Drainage von gewissen Torfgebieten, doch dabei würden auch die Gehalte an organischem Material zurückgehen. Ein solcher Rückgang wurde nur auf einer Alpweide festgestellt.

Bei den Standorten auf Naturwiesen und Ackerflächen scheint es wahrscheinlich, dass die gemessenen ATP-Werte zwischen dem 1. und 3. Zyklus abnahmen und danach stabil blieben. Es ist jedoch schwierig, zurzeit irgendwelche Schlussfolgerungen zu ziehen.

Angesichts der Ungewissheiten bezüglich der Genauigkeit der ATP-Messgrößen im 4. und 5. Zyklus wurden die statistischen Werkzeuge, die üblicherweise für die Erarbeitung der Karten und Grafiken des FRIBO-Berichts benutzt werden, für diese Daten nicht angewendet.

2.2.5.2 Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs

Die Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs ermöglicht eine Schätzung der Menge an organischem Material, die während der Inkubation mineralisiert wurde (Einwirkung der Biomasse während der Inkubationszeit). Es handelt sich um die Summe des CO₂ – umgewandelt in organischem Material – das während der 15 Inkubationstage ausgestossen wurde. Dieser Wert fasst die drei Messungen der Atmungsaktivität zusammen, die im Bericht über die biologischen Parameter analysiert wurden (Rossier & Dessureault-Rompré, 2003). Ein guter Mineralisierungswert des organischen Kohlenstoffes ist sehr wichtig, damit Hofdünger, Erntereste und Zwischenbegrünungen rasch abgebaut und die für das Pflanzenwachstum erforderlichen Nährstoffe verfügbar gemacht werden.



| | Zyklus 1 | Zyklus 2 | Zyklus 3 | Zyklus 4 | Zyklus 5 | Zyklus 6 | |
|-----|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---|
| AF | 704.76 ab | 698.09 ab | 756.44 a | 643.54 b | 671.53 ab | 678.93 ab | Durchschn. Min. C _{org} p= 5 % (logtransform) |
| NW | 1563.50 a | 1552.70 a | 1685.10 a | 1566.30 a | 1501.20 a | 1526.50 a | Durchschn. Min. C _{org} p= 5 % (logtransform) |
| ALP | 3604.90 a | 2865.40 ab | 2962.20 ab | 2782.80 b | 2687.40 b | 2661.10 b | Durchschn. Min. C _{org} p= 5 % (logtransform) |

Abbildung 2.2.5-2: Allgemeine Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs

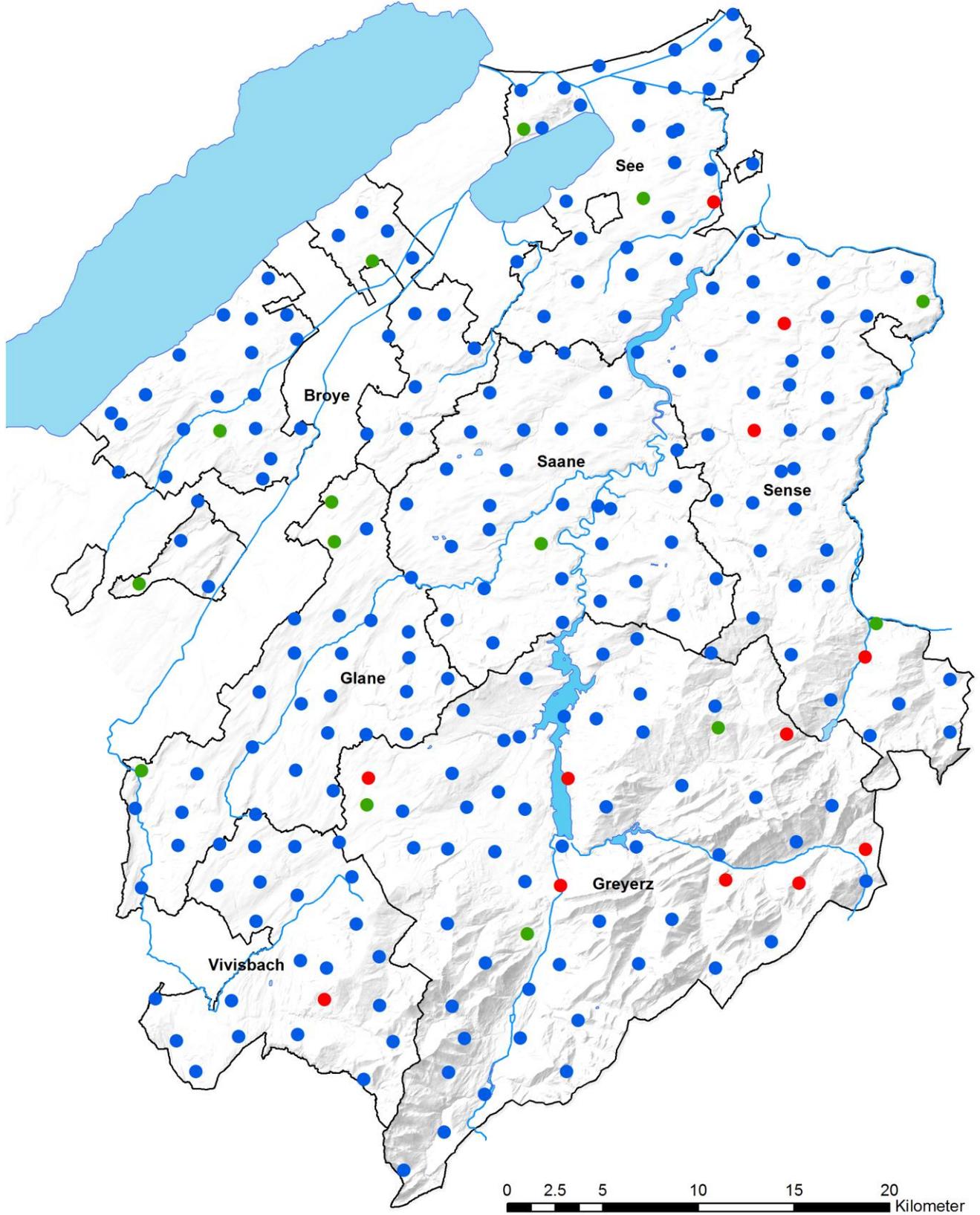
Die Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs durch die mikrobielle Biomasse hängt von der Bodennutzung ab (Abbildung 2.2.5-2: Allgemeine Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs). Eine mengenmässig grössere mikrobielle Biomasse kann während einer Dauer von 15 Tagen potenziell grössere Mengen an organischem Material pro Gramm Boden mineralisieren. Böden auf Dauerwiesen und Alpweiden zeichnen sich demnach durch ein grösseres Mineralisierungspotenzial aus, da sie einerseits im Durchschnitt grössere Humus- und Tongehalte aufweisen und sich andererseits das dauerhafte Vorhandensein der Wiese auf diesen Böden auswirkt.

Die Alpweiden verzeichneten im 4. Zyklus eine signifikante Abnahme der Mineralisierungswerte des organischen Kohlenstoffs und blieben danach stabil. Die Werte der Dauerwiesen waren stabil, während auf den Ackerflächen ein signifikanter Rückgang gefolgt von einer Zunahme im 4. Zyklus beobachtet wurde.

Entwicklung pro Standort

5 Ackerflächen, 1 Naturwiese und 6 Alpweiden verzeichnen eine signifikante Abnahme des Mineralisierungswerts des organischen Kohlenstoffs. Die Ursachen sind unterschiedlich: 4 Alpweiden sind hydromorph und weisen eine Zunahme des Gehalts an organischem Material und einen Rückgang des pH-Wertes auf, was Anzeichen für eine Entwicklung in Richtung Flachmoor sind. 2 Dauerwiesen wurden in Ackerflächen umgewandelt. Bei den anderen Standorten sind die Ursachen weniger klar.

14 Standorte weisen eine signifikante Zunahme dieses Parameters auf. Es sind dies 4 Ackerflächen, 9 Naturwiesen und 1 Alpweide. Vier dieser Wiesen wurden vorher als Ackerflächen genutzt, was die festgestellte Zunahme erklärt. Bei den Ackerflächen handelt es sich vor allem um Standorte, auf welchen der Anteil der Kunstwiesen in der Fruchtfolge zunahm; dies ist bei drei dieser Standorte der Fall.



Karte 2.2.5-1: Entwicklung der Mineralisierung des organischen Kohlenstoffs während der sechs Zyklen

3 Städtische Böden

3.1 Methodik

3.1.1 Geschichte des Netzes

Das Amt für Umwelt (AfU) hat das Landwirtschaftliche Institut Grangeneuve (LIG) mit der Verwaltung des Beobachtungsnetzes für städtische Böden beauftragt. Die Hauptziele dieses Netzes bestehen darin, Informationen zur Art und zum Zustand der Böden an sensiblen Standorten (öffentliche Parkanlagen, Spielplätze und Familiengärten) zu beschaffen sowie allgemein die diffuse Verschmutzung in den Agglomerationen im Kanton Freiburg zu analysieren und die zeitliche Entwicklung zu beobachten. Dieses Netz ergänzt das landwirtschaftliche FRIBO-Netz, da die Resultate des letzteren nicht auf das städtische Gebiet übertragen werden können.

Die Erhebungen begannen 2004 für den 1. Zyklus, 2007 für den 2. Zyklus und 2012 für den 3. Zyklus. Wir stellen hier die Resultate der drei Zyklen vor. Die Kriterien für die Auswahl der städtischen Standorte wurden im vierten FRIBO-Bericht beschrieben [Rossier et al., 2007].

3.1.2 Statistische Datenanalyse

Wie bei den Daten des landwirtschaftlichen FRIBO-Netzes wurde der HSD- oder [Tukey-Test](#) angewendet, um signifikante Entwicklungen der analysierten Parameter pro Bodennutzungstyp auszuwerten. Bei keinem der Standorte innerhalb der gleichen Bodennutzungstyp ist jedoch eine signifikante Entwicklung zwischen den Zyklen erkennbar.

Bezüglich der Entwicklung der Parameter pro Standort verfügen wir angesichts des Fehlens von Wiederholungen für den gleichen Standort und Zyklus und der Tatsache, dass bisher nur drei zeitliche Wiederholungen stattfanden, über kein statistisches Indiz für eine fundierte Einschätzung der Signifikanz der Resultate. Das nächste Kapitel stützt sich deshalb nur auf deskriptive Statistik d. h. auf Box-Plots und Häufigkeitstabellen. Es zeichnen sich aufgrund dieser Indikatoren einige Tendenzen ab, doch wegen der mangelnden Signifikanz muss die Entwicklung der beobachteten Parameter sehr vorsichtig beurteilt werden.

3.1.2.1 Box-Plots

Box-Plots (Abbildung 3.1.2-1: Beispiel eines Box-Plots) ermöglichen eine rasche Visualisierung und Schätzung der Verteilung der Werte in einer Datengruppe. Der **Medianwert** oder Zentralwert teilt alle beobachteten (und nach Grösse geordneten) Werte in zwei gleichgrosse Hälften. Eine Hälfte enthält die Werte oberhalb des Medianwertes und die andere die Werte, die darunter liegen. Im Gegensatz zum Durchschnitt, eine andere Messgrösse des Mittelwertes, wird der Medianwert von atypischen (extremen) Werten nicht beeinflusst. Der Medianwert wird mit einem kleinen Quadrat dargestellt.

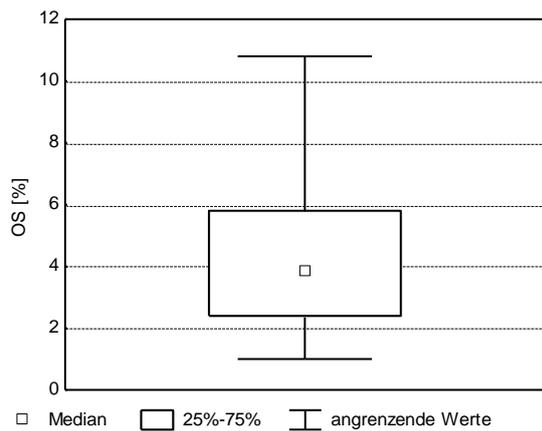


Abbildung 3.1.2-1: Beispiel eines Box-Plots

Die **Box 25 %–75 %** stellt die Beobachtungen zwischen dem tieferen und dem höheren Quartil dar. In einer statistischen Verteilung entspricht der Wert des tieferen Quartils (25 % der Daten) dem unteren Strich der Box und der Wert des oberen Quartils (75 % der Daten) dem oberen Strich der Box.

Die Box wird auf beiden Seiten von Linien genannt «Antennen» oder «Whiskers» abgegrenzt. Die beiden Antennen grenzen die **angrenzenden Werte** ab. Ihre Länge (angrenzende Werte) nach Tukey wird gemäss folgender Formel abgegrenzt:

Untere Extremität: $\text{unteres Quartil} - 1.5 \star \text{Interquartilabstand}$

Obere Extremität: $\text{oberes Quartil} + 1.5 \star \text{Interquartilabstand}$

Die Werte jenseits der angrenzenden Werte heissen extreme, atypische, ausserordentliche Werte oder Ausreisser. Im vorliegenden Bericht werden die atypischen Werte mit Kreisen und die Extremwerte mit Sternchen bezeichnet. Bei einer normalen Streuung sollte der von der Box und den Antennen abgegrenzte Bereich 99.3 % der Daten enthalten. Es sollten demnach nur 0.7 % atypische Werte vorkommen.

Wenn keine atypischen Werte vorkommen, erstrecken sich die Antennen bis zum unteren oder oberen Wert der Streuung.

3.1.2.2 Häufigkeitstabellen

Nachfolgend werden identische Häufigkeitstabellen wie im landwirtschaftlichen Teil des FRIBO-Berichts präsentiert. Für Phosphor und Kalium erfolgt die Aufteilung der Fruchtbarkeitsklassen gemäss GRUD (Sinaj et Richner, 2017). Der Verschmutzungsgrad mit Schwermetallen wird in Prozent zum Richtwert ausgedrückt (VBBö, 1998).

3.1.3 Beschreibung der Standorte

Die 53 Standorte verteilen sich auf die Gemeinden Freiburg, Givisiez, Villars-sur-Glâne, Marly, Granges-Paccot, Romont, Morat, Estavayer-le-Lac, Châtel-St-Denis, Flamatt und Bulle und werden nachfolgend nach Typ klassiert.

Die unten stehenden Tabellen zeigen die Verteilung der Standorte nach Gemeinde, Nutzung und Typ. Die Karte 3.1.3-1: Lage und Nutzung der städtischen FRIBO-Standorte stellt alle Standorte im Kanton Freiburg nach Nutzungsart dar und zeigt die Grenzen der sieben Distrikte des Kantons.

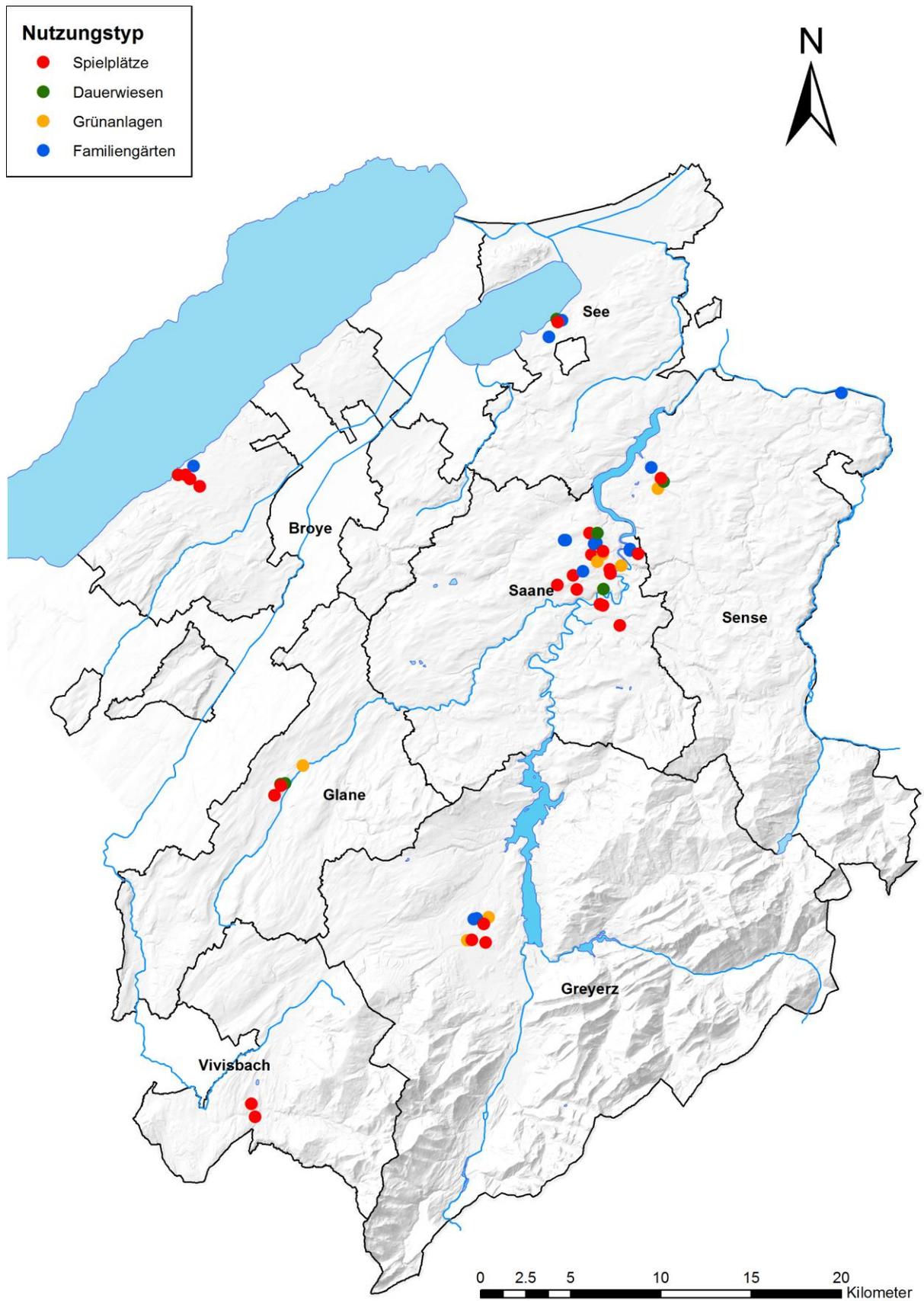
Tabelle 2: Verteilung der Standorte nach Agglomeration

| Agglomeration | Anzahl Standorte |
|-----------------------|------------------|
| Freiburg und Umgebung | 25 |
| Bulle | 7 |
| Estavayer-le-Lac | 3 |
| Murten | 4 |
| Romont | 5 |
| Châtel-St-Denis | 2 |
| Düdingen | 4 |
| Flamatt | 1 |
| Total | 51 |

Tabelle 3: Verteilung der Standorte nach Nutzung

| Nutzung | Anzahl Standorte |
|----------------|------------------|
| Spielplätze | 24 |
| Familiengärten | 14 |
| Grünanlagen | 6 |
| Dauerwiesen | 7 |
| Total | 51 |

Im Vergleich zum letzten Zyklus sind zwei Änderungen zu verzeichnen: Ein Familiengarten in Estavayer-le-Lac ist verwildert und heute teilweise von Wald überwachsen. 2013 wurde keine Beprobung gemacht. Auf einer Grünanlage in der Stadt Bulle weiden seit 2014 Schafe. Wir betrachten sie demnach als Dauerwiese. Dazu kommt ein Spielplatz in Estavayer-le-Lac, auf welchem 2015 aus unbekanntem Gründen keine Beprobung stattfand. Die Beprobung findet in den nächsten Zyklen wieder statt. Detaillierte Informationen zu diesen Standorten finden sich im Inventarbericht für den städtischen Teil des FRIBO-Netzes (Poget & al., 2004).



Karte 3.1.3-1: Lage und Nutzung der städtischen FRIBO-Standorte

3.2 Resultate

Wir präsentieren im vorliegenden Kapitel nur die signifikantesten und problematischsten Elemente bezüglich Gesundheit und Umwelt. Die Durschnitte werden pro Zyklus berechnet. Zyklus 1 erstreckt sich über die Jahre 2004 bis 2006, Zyklus 2 über die Jahre 2007 bis 2011 und Zyklus 3 über die Jahre 2012 bis 2016.

3.2.1 Phosphor

Phosphor ist ein wichtiger Nährstoff für das Pflanzenwachstum, kann aber ökologische Probleme auslösen, wenn er in sehr grossen Mengen ausgebracht wird. Phosphor ist zwar wenig auswaschbar, doch grosse Mengen in der obersten Bodenschicht (erste Zentimeter) können durch Abfluss oder Erosion in den Oberflächengewässern enden, was meistens deren Eutrophierung verursacht. Personen, die nicht in der Landwirtschaft tätig sind, kennen die Düngungsnormen oft nicht.

3.2.1.1 CO₂-Extraktion

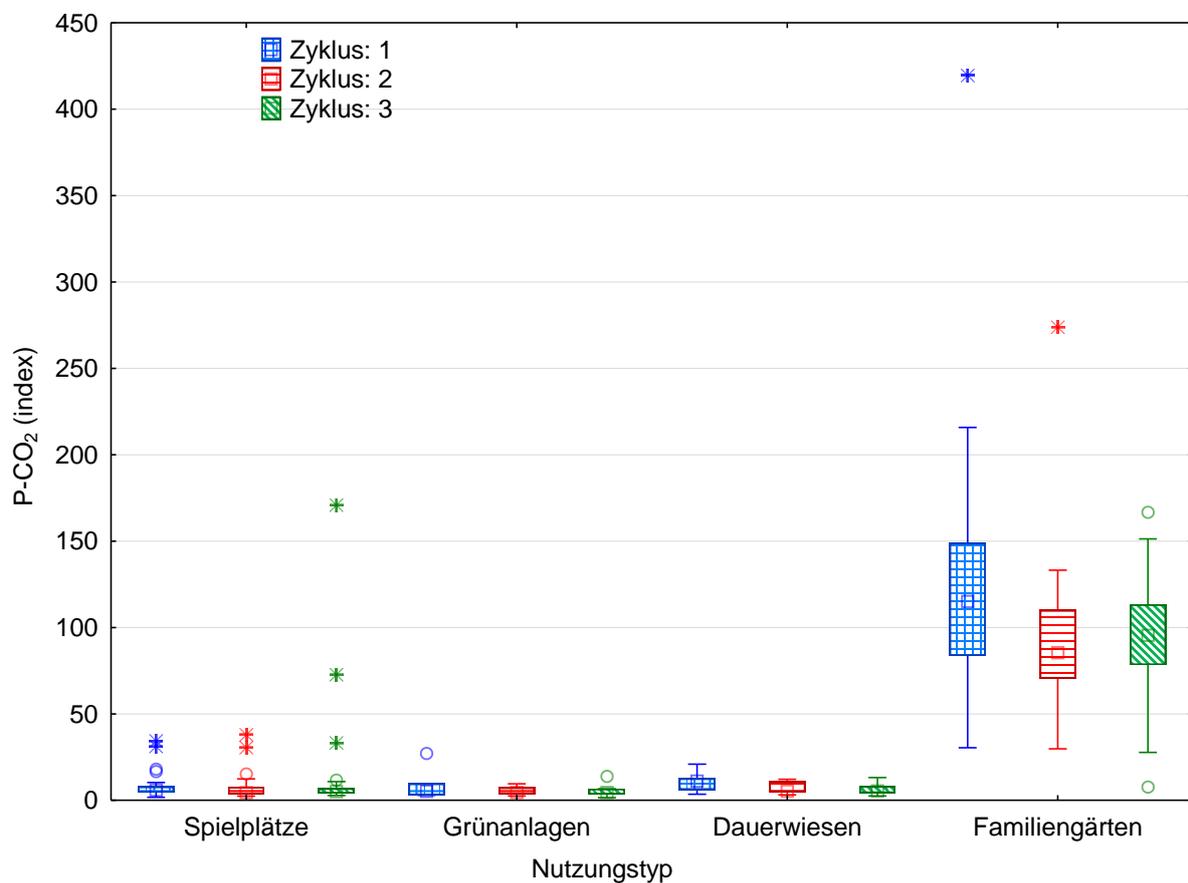


Abbildung 3.2.1-1: Entwicklung des löslichen Phosphors nach Bodennutzungsart gemäss der CO₂-Extraktionsmethode

Die Gehalte an löslichem Phosphor in den Familiengärten sind immer noch erheblich höher als auf den Spielplätzen, Grünanlagen und Dauerwiesen (

Abbildung 3.2.1-1: Entwicklung des löslichen Phosphors nach Bodennutzungsart gemäss der CO₂-Extraktionsmethode). Gemäss GRUD werden alle Familiengärten als «angereichert» klassiert, mit einer Ausnahme in der Stadt Freiburg, wo der Phosphorgehalt erheblich sank und nun auf einem «genügenden» Niveau liegt.

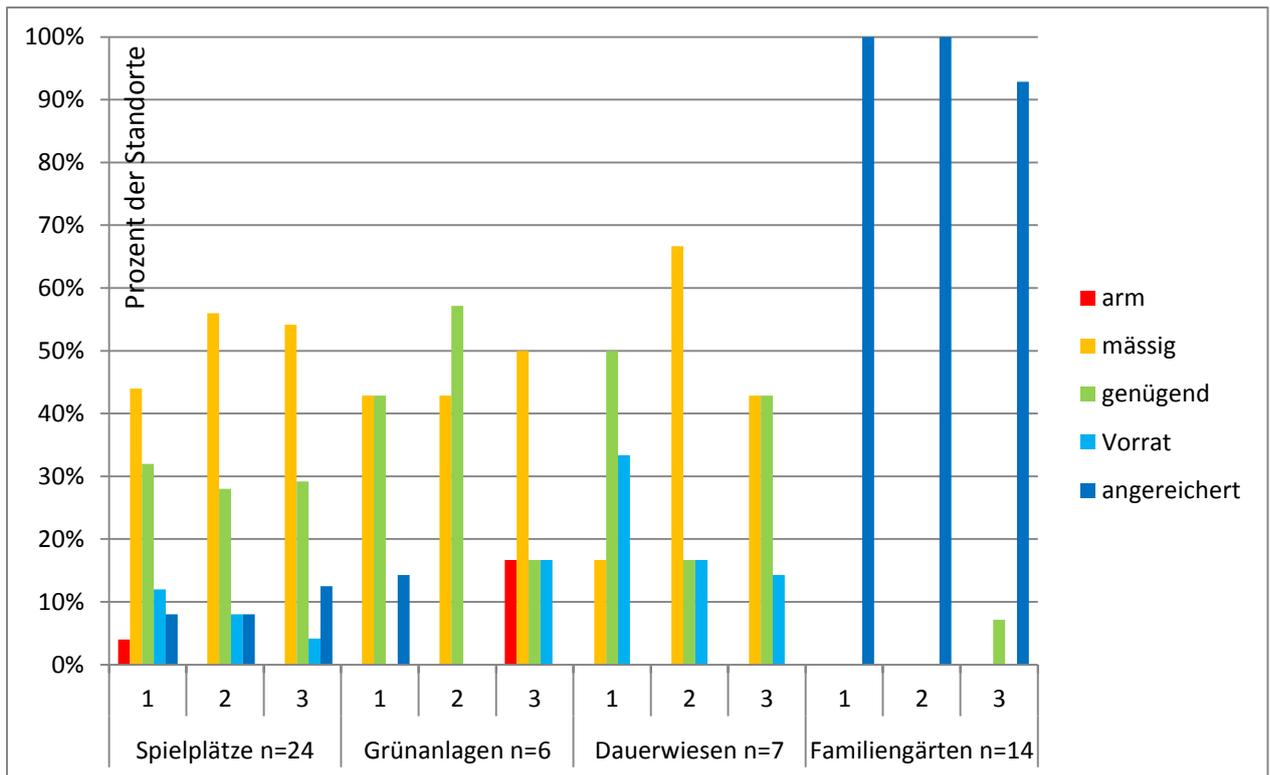


Abbildung 3.2.1-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P CO₂ gemäss GRUD 2017

3.2.1.2 AAE10-Extraktion

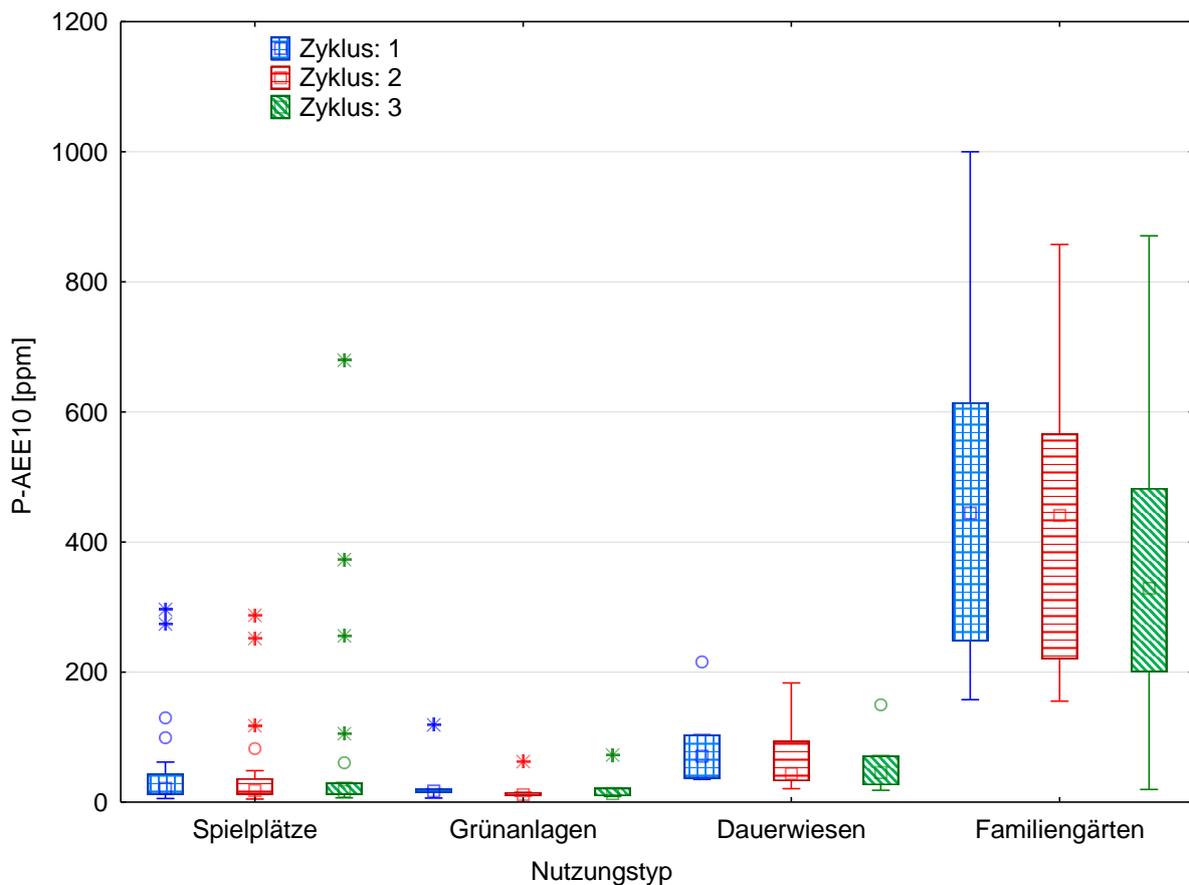


Abbildung 3.2.1-3: Entwicklung des Reservephosphors nach Bodennutzungsart gemäss AAE10-Extraktionsmethode. 1 ppm= 1 mg-P/kg Erde

Die Familiengärten weisen immer noch zu hohe Gehalte an Reservephosphor auf. Es zeichnet sich jedoch eine positive Tendenz ab. Der Medianwert ging im letzten Zyklus um rund 120 ppm oder 30 % zurück. Der Phosphorbedarf der Gemüsekulturen beträgt zwischen 20 und 120 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$, wobei der Durchschnitt bei 60 kg- $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ liegt (Neuweiler, 2011).

Ohne Phosphordüngung sollte die Konzentration an Reservephosphor im Boden je nach Kulturart und Anzahl Ernten pro Jahr um 15 bis 30 ppm abnehmen, was den Beobachtungen entspricht; mit einem Rückgang des Medianwerts um 24 ppm/Jahr. Die Vereinigung der Familiengärten von Freiburg macht die neuen Mieter auf die gute Praxis aufmerksam, die zurzeit darin besteht, keine Düngemittel auszubringen, weder organische noch mineralische. Diese Sensibilisierungspolitik scheint Früchte zu tragen.

Wenn der Rhythmus der Reduktion der Phosphorreserven konstant bleibt, wird der Medianwert der Gemüsekulturen in rund zehn Jahren ein gemäss GRUD «genügendes» Niveau erreichen. Es wäre jedoch gefährlich, allgemeine Schlussfolgerungen für alle Familiengärten zu ziehen: Eine Parzelle hat diesen Wert bereits erreicht und weist sogar einen leichten Mangel auf, während andere Parzellen noch Reserven für ca. 30 Jahre enthalten. Das Gleichgewicht der anderen Nährstoffe (Stickstoff, Kalium, Magnesium, Schwefel usw.) muss ebenfalls berücksichtigt werden. Eine Optimierung der Düngungsmenge könnte langfristig nur mit individuellen Bodenanalysen jeder Parzelle erreicht werden.

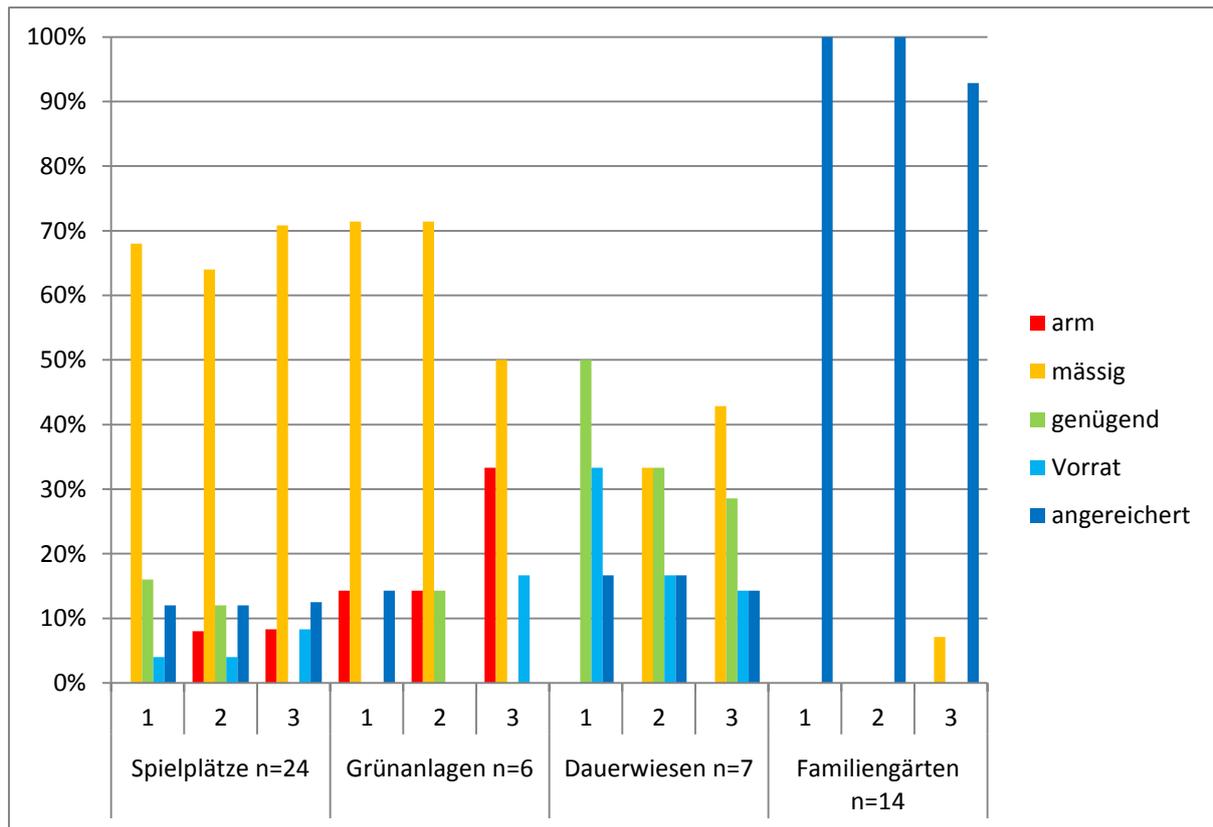


Abbildung 3.2.1-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des P AAE10 gemäss GRUD 2017

Gewisse Spielplätze weisen sehr hohe Phosphorgehalte auf, meistens in Korrelation mit hohen Kaliumgehalten (

Abbildung 3.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO2 gemäss GRUD 2017). Dies erklärt sich mit einer übermässigen Düngung.

3.2.2 Kalium

3.2.2.1 CO₂-Extraktion

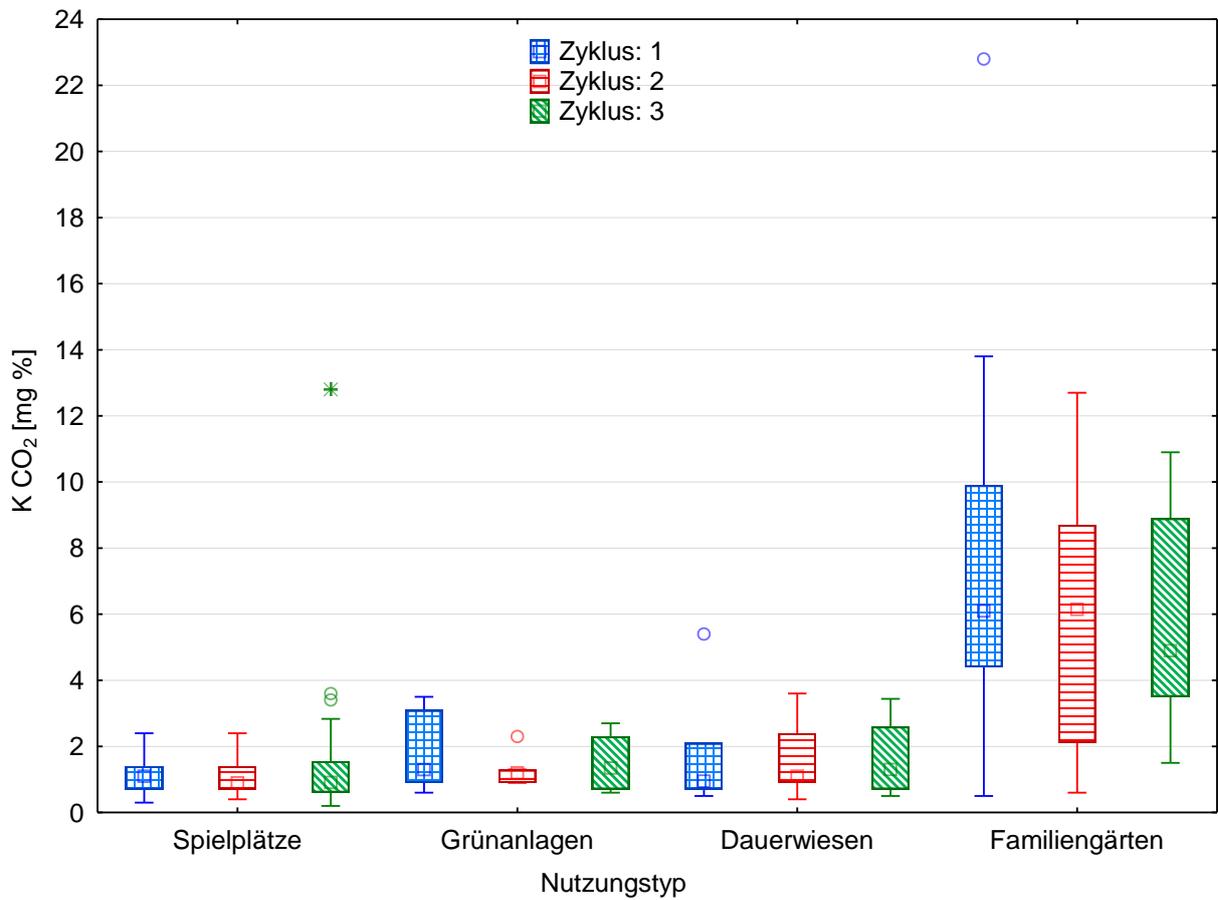


Abbildung 3.2.2-1: Entwicklung des löslichen Kaliums pro Bodennutzungsart gemäss CO₂-Extraktionsmethode. 1 [mg %] = 1 [mg-K₂O/100 g Erde] = 8.3 [mg-K/kg Erde]

Die höchsten Gehalte an löslichem Kalium finden sich ebenfalls in den Familiengärten. Die Situation ist jedoch weniger beunruhigend als beim Phosphor.

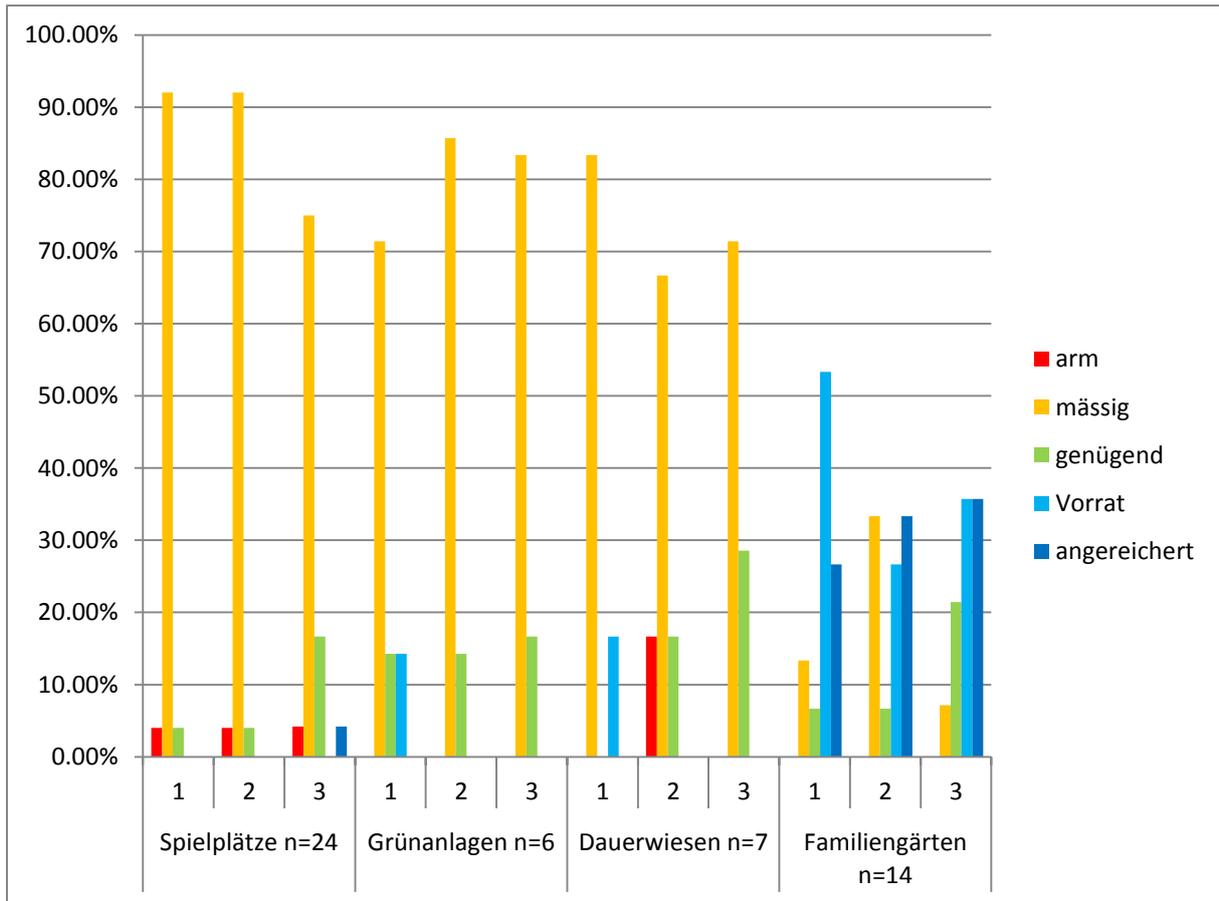


Abbildung 3.2.2-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K CO2 gemäss GRUD 2017

3.2.2.2 AAE10-Extraktion

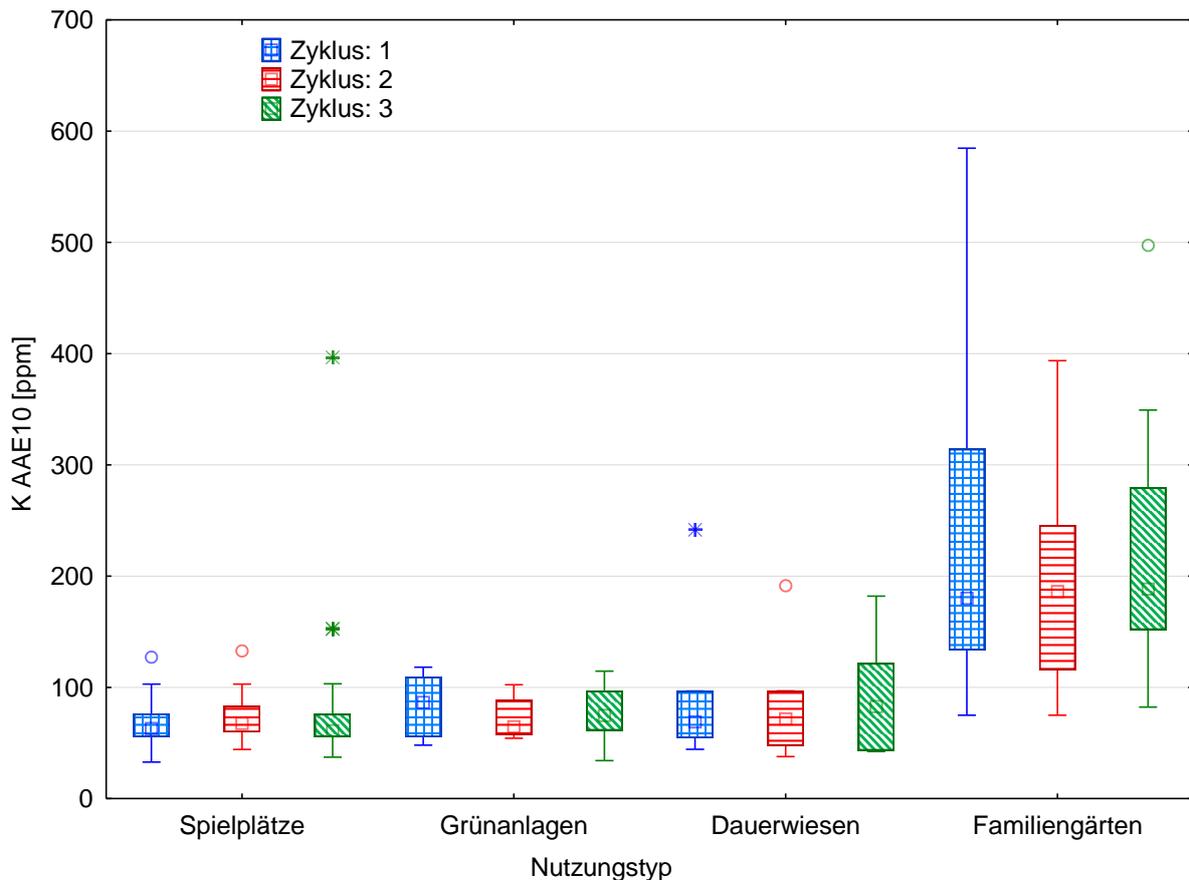


Abbildung 3.2.2-3: Entwicklung des Reservekaliums pro Bodennutzungsart gemäss AAE10-Extraktionsmethode. 1 ppm= 1 mg-K/kg Erde

Rund die Hälfte der Familiengärten kann gemäss GRUD als an «Vorrat» oder «angereichert» mit Reservekalium bezeichnet werden. Ohne Düngung dürfte der Medianwert in zwei Jahren ein «genügendes» Niveau erreichen. Es wird jedoch kein Rückgang des Reservekaliums festgestellt. Dies erklärt sich sehr wahrscheinlich damit, dass der Gesamtgehalt an Kalium – hauptsächlich in mineralischer Form – auf den Ackerböden des Kantons Freiburg rund 100 Mal höher ist als das Reservekalium gemäss AAE10-Methode (Blanchet et al., 2017). Jedes Jahr wird ein Teil dieses Kaliums infolge der biologischen Bodenaktivität für die Pflanzen freigegeben. Wenn auf gewissen Parzellen ein Kaliummangel festgestellt wird, könnte das Ausbringen von Pferdemist – arm an Phosphor und reich an Kalium – eine Lösung darstellen.

Was die Spielplätze betrifft, ist interessant zu beobachten, dass es dieselben Standorte sind, die eine massive Erhöhung des Kaliums- und des Phosphorgehalts aufweisen, ob löslich oder als Reserve. Dies erklärt sich sehr wahrscheinlich mit der Überdüngung der Spielplätze. Es wäre nützlich, die mit dem Unterhalt dieser Anlagen betrauten Institutionen an die gute Düngepraxis zu erinnern.

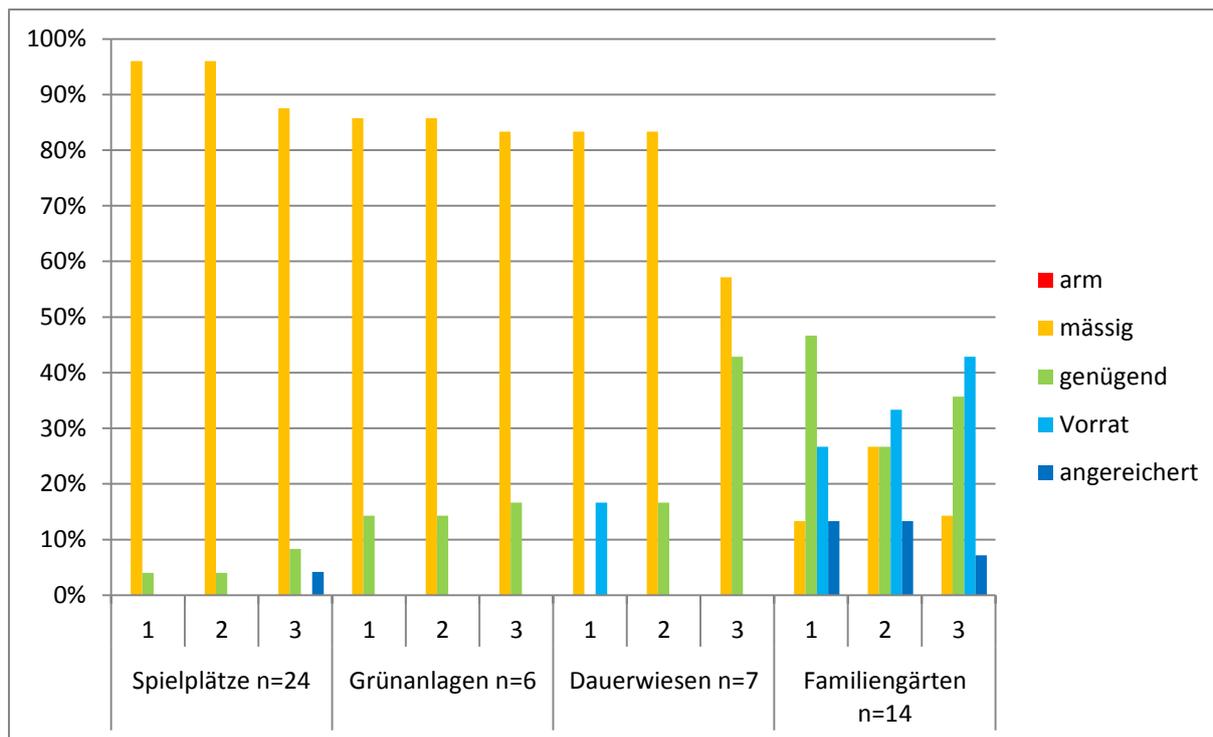


Abbildung 3.2.2-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des K AAE10 gemäss GRUD 2017

3.2.3 Schwermetalle

| Schadstoffe | Kadmium | Chrom | Kupfer | Nickel | Blei | Zink |
|-------------|---------|-------|------------------|--------|------|------|
| Richtwert | 0.8 | 50 | 40 | 50 | 50 | 150 |
| Prüfwert | 2 | | 150 ¹ | | 200 | |

Tabelle 4: Richt- und Prüfwerte der wichtigsten Schwermetalle gemäss VBBo in mg/kg Bodentrockensubstanz (ppm).

¹ Der Prüfwert liegt für die Futtermittelproduktionszonen bei 150 ppm (Dauerwiesen)

Der Richtwert für Kobalt von 25 ppm wurde in der VBBo gestrichen. Dies erklärt sich damit, dass die in der Schweiz beobachteten Werte den Richtwert meistens nicht überschreiten. Das bestätigt sich im Rahmen von FRIBO, wurden doch Höchstwerte von ca. 10 ppm beobachtet, und zwar sowohl in der Landwirtschafts- als auch in der städtischen Zone (Rossier et al., 2012).

3.2.3.1 Kadmiem

Kein Standort überschreitet den Kadmiem-Richtwert von 0.8 ppm (Abbildung 3.2.3-1: Entwicklung des Kadmiemgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungs). Zur Erinnerung: Der Richtwert bezeichnet die Schwelle, ab welcher der Schadstoffgehalt hoch ist und dessen Entwicklung überwacht werden muss, weil die Bodenfruchtbarkeit langfristig in Gefahr ist. Die Gesundheit der Menschen ist jedoch nicht gefährdet.

Während der vorangehenden Zyklen wurden zahlreiche Werte, die unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, willkürlich auf 0 ppm festgelegt. Die Bestimmungsgrenze konnte dank des Kaufs eines leistungsfähigeren Geräts durch das Labor gesenkt werden: Kein einziger Wert liegt nun bei 0 ppm, und die Standardabweichung der Werte im 3. Zyklus ist etwas kleiner als im 1. und 2. Zyklus. Die durchschnittliche Kadmiemkonzentration der Grünanlagen und Dauerwiesen scheint zugenommen zu haben, aber es handelt sich, wie erwähnt, um ein analytisches Artefakt.

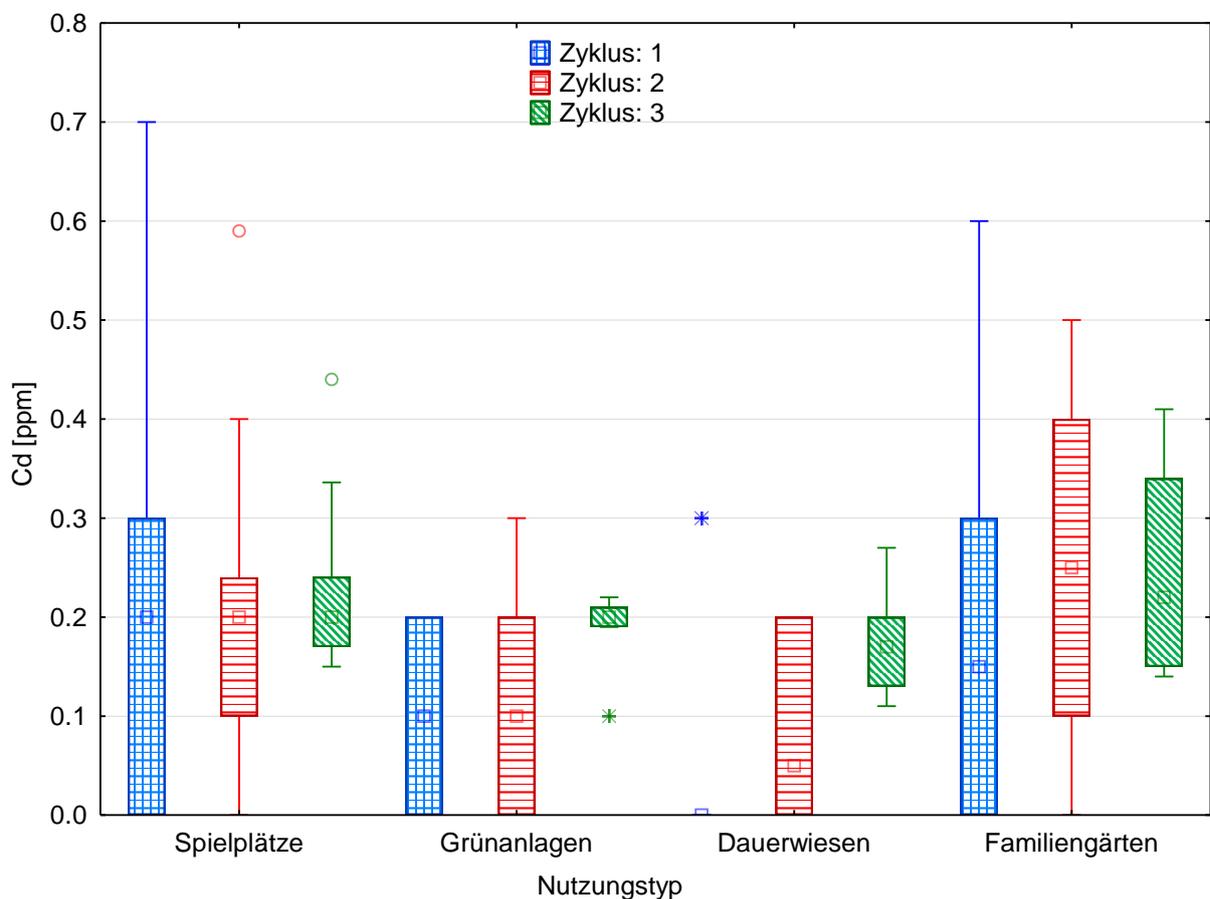


Abbildung 3.2.3-1: Entwicklung des Kadmiemgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp

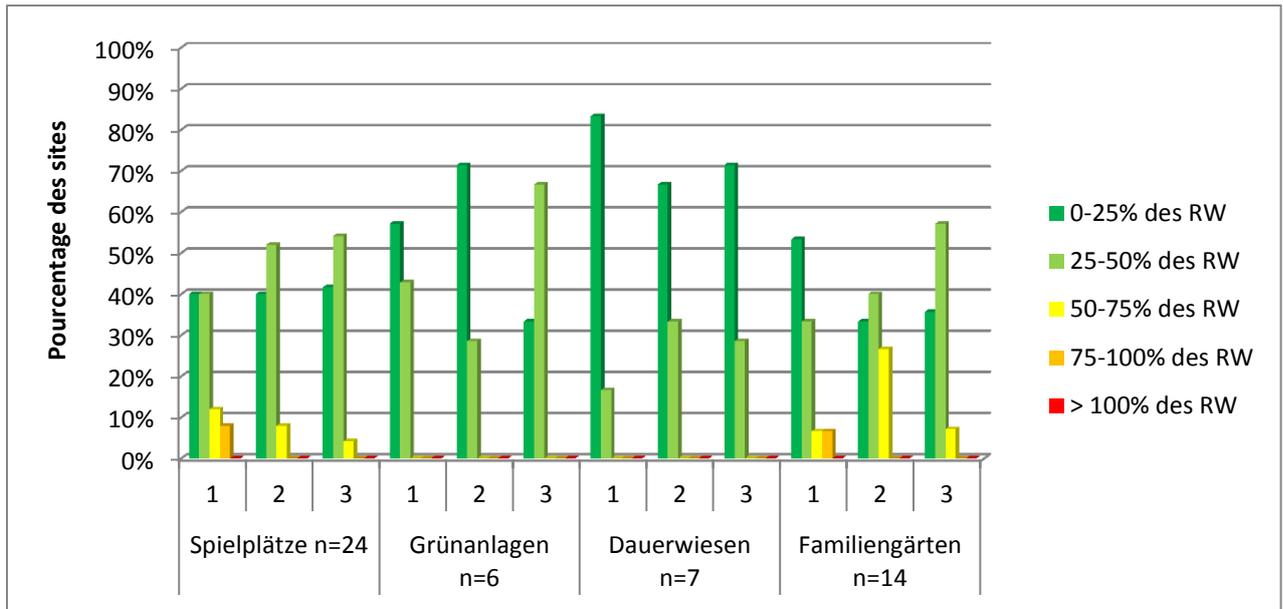


Abbildung 3.2.3-2: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Kadmiumgehalts gemäss VBBo

3.2.3.2 Chrom

Im städtischen Gebiet wird keine Überschreitung des bei 50 ppm festgelegten Richtwertes festgestellt. Die höchsten Chrom-Konzentrationen werden in den Familiengärten und auf Dauerwiesen gemessen. Dies erklärt sich sehr wahrscheinlich mit der Verwendung von Asche oder Schlacke vor 1990. Die Werte der Böden der Familiengärten weisen seit dem 1. Zyklus eine sinkende Tendenz auf.

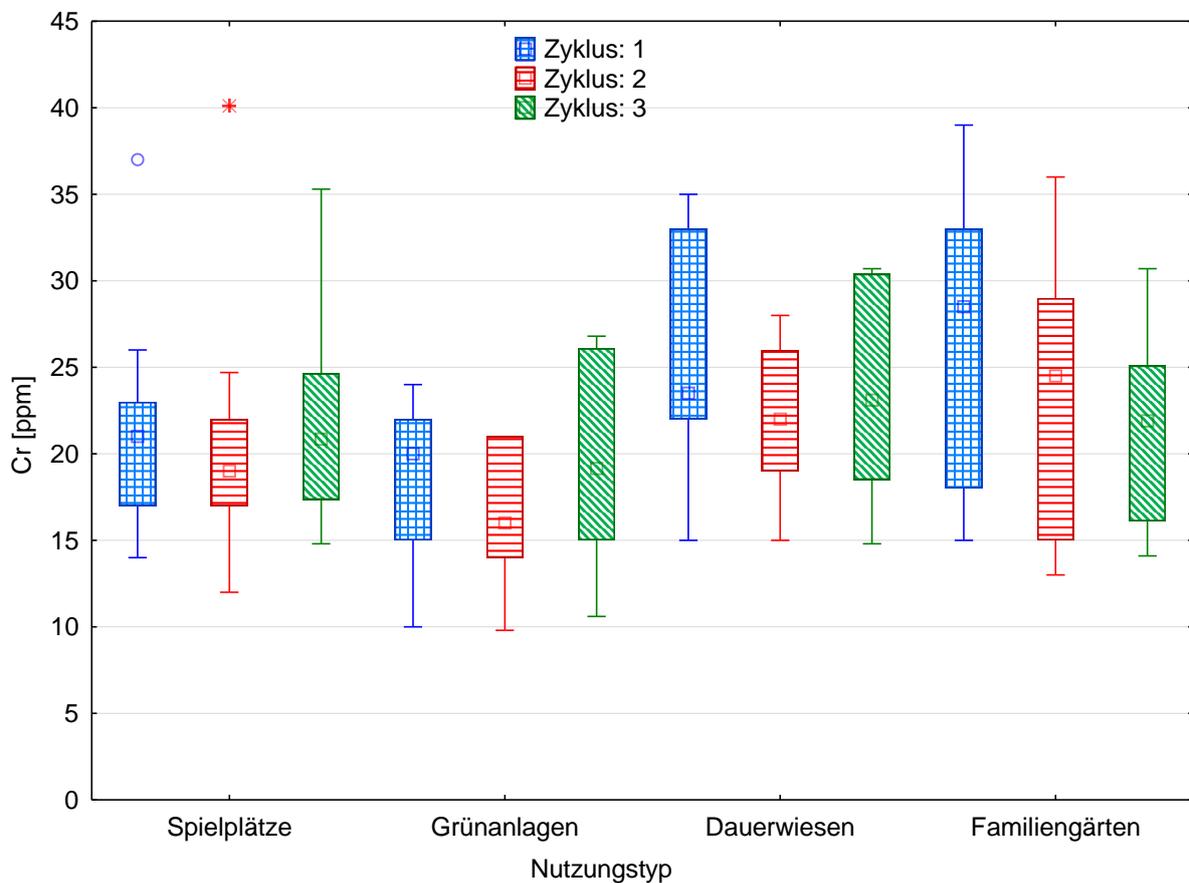


Abbildung 3.2.3-3: Entwicklung des Chromgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp

Zwei Grünanlagen weisen eine erhebliche Zunahme der Chromkonzentration auf. Einer dieser Standorte liegt unterhalb einer stark befahrenen Strasse, wovon er durch eine Böschung mit starker Hangneigung getrennt wird. Es scheint plausibel, dass der Chromeintrag von der Strasse kommt. Diese Theorie lässt sich hingegen nicht auf den anderen Standort anwenden, der oberhalb der nächstgelegenen Strasse liegt. Auch für alle anderen Schwermetalle wird an diesem Standort die gleiche Tendenz festgestellt, sodass ein systemischer Fehler bei der Analyse oder der Probenahme möglich ist.

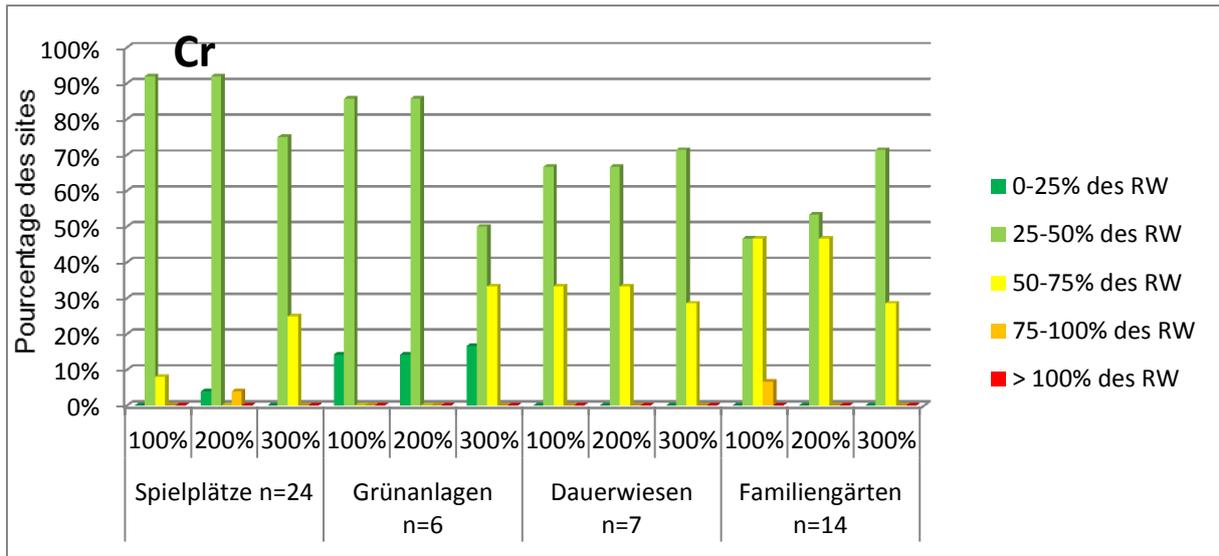


Abbildung 3.2.3-4: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung des Chroms gemäss VBBo

3.2.3.3 Kupfer

Mehrere Standorte überschreiten den Richtwert von 40 ppm (ein Spielplatz und einige Familiengärten), und eine Grünanlage weist einen höheren Wert als den Prüfwert gemäss VBBo für Futtermittelkulturen auf (150 ppm) (Abbildung 3.2.3-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Kupfer gemäss VBBo). Die zeitliche Variabilität des Wertes für diesen Standort ist erheblich. Dies erklärt sich sehr wahrscheinlich mit dem Vorkommen von Kupfer in Partikelform: Heterogen im Boden verteilt sind «Kupferklümpchen» vorhanden, was eine grosse Fluktuation bei den Resultaten der aufeinanderfolgenden Probenahmen verursacht. Die Hypothese der Ablagerung eines kupferhaltigen Materials an diesem Standort wurde formuliert (Rossier et al., 2007).

Diese Werte sind für die menschliche Gesundheit jedoch nicht problematisch, da Kupfer wenig giftig ist. Ausserdem gibt es keinen Prüfwert bezüglich des Risikos durch Kupferaufnahme in der VBBo.

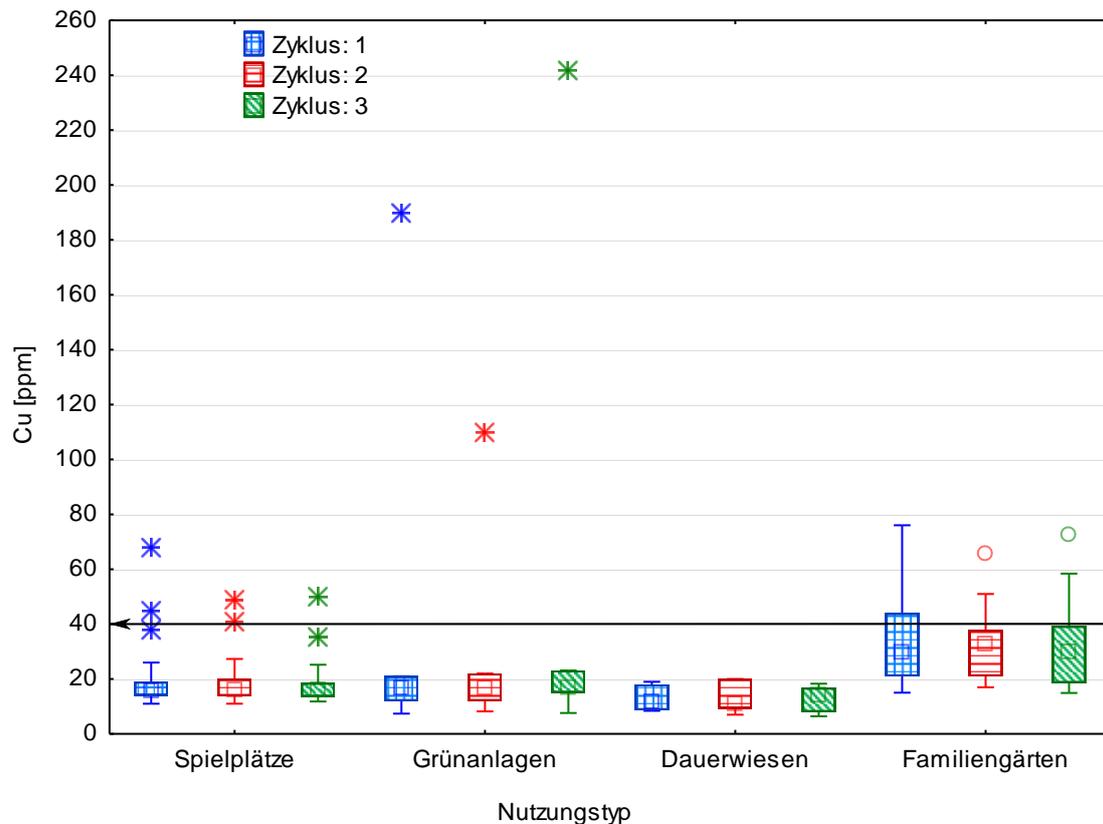


Abbildung 3.2.3-5: Entwicklung des Kupfergehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Der Richtwert (40 ppm) wird mit einem Pfeil angegeben.

Die höchste mediane Konzentration findet sich in den Familiengärten. Rund 20 % der Böden der Familiengärten weisen höhere Konzentrationen als den Richtwert auf. Die Beigabe von Kupfer in den Pflanzenschutzmitteln – insbesondere in Fungiziden – ist in diesem Fall sehr wahrscheinlich.

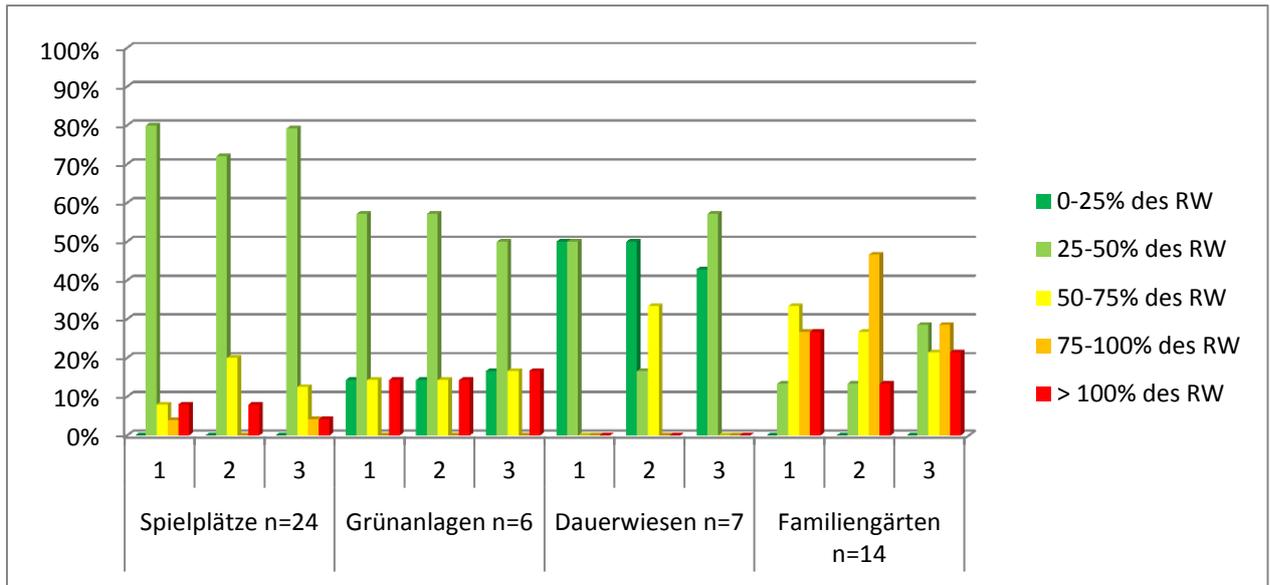


Abbildung 3.2.3-6: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Kupfer gemäss VBB

3.2.3.4 Nickel

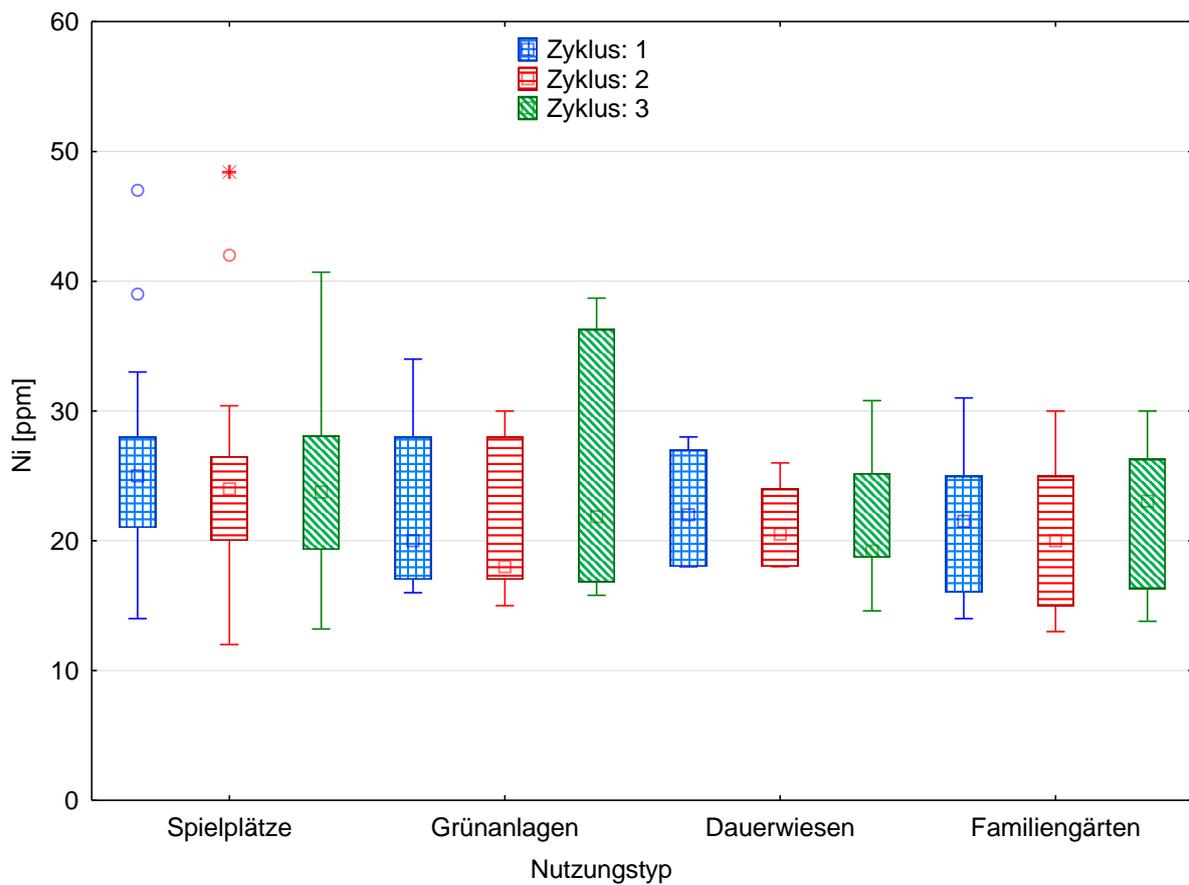


Abbildung 3.2.3-7: Entwicklung des Nickelgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp

Es sind keine Überschreitungen des Richtwertes von 50 ppm zu verzeichnen. Die durchschnittlichen Werte – meistens um 25 mg/L – sind ähnlich wie diejenigen, die im Rahmen des landwirtschaftlichen FRIBO-Netzes beobachtet wurden. Sie liegen ebenfalls zwischen 8 bis 43 mg/kg. Es sind «häufig gemessene Werte» (80 % der gemessenen Werte) im Rahmen der NABO (Gubler et al., 2015).

3.2.3.5 Blei

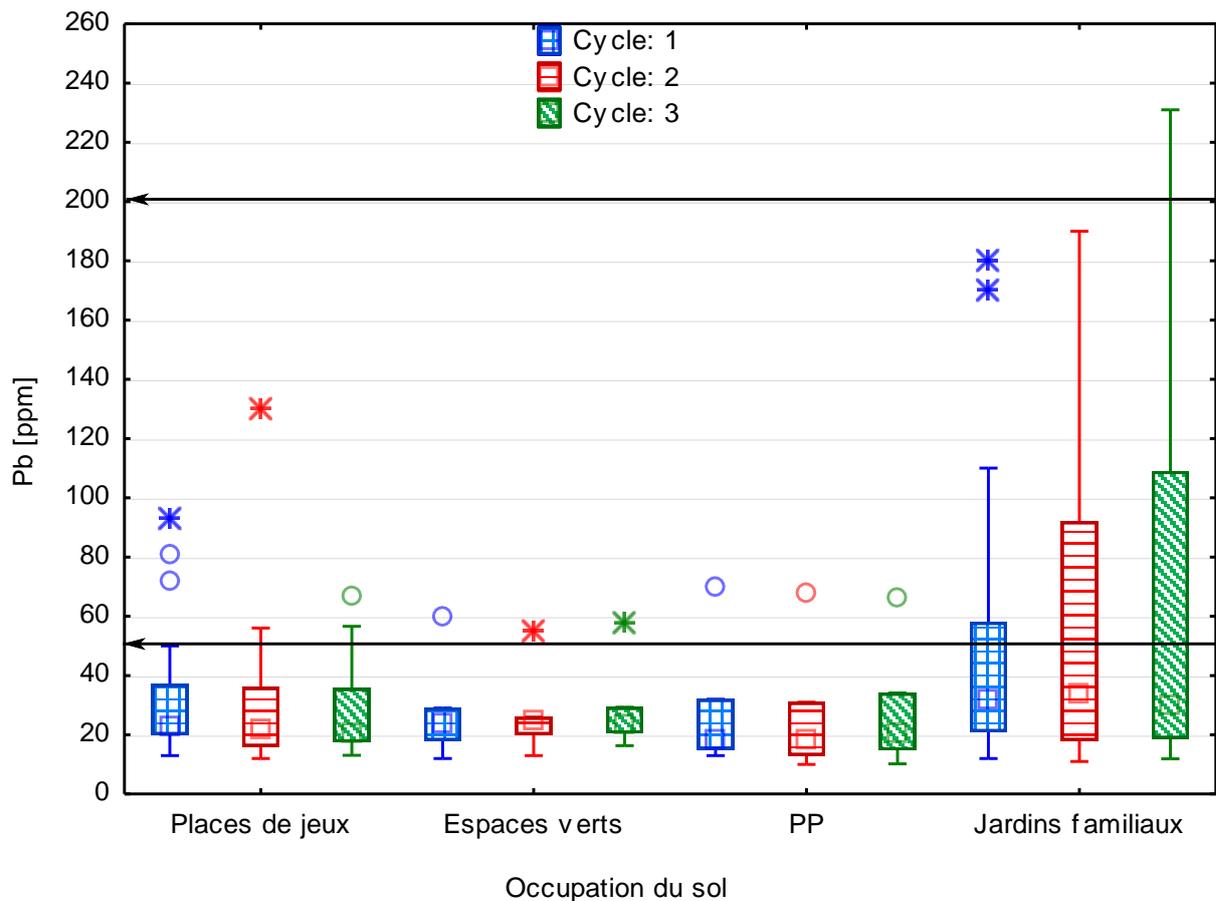


Abbildung 3.2.3-8: Entwicklung des Bleigehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Richt- (50 ppm) und Prüfwert (200 ppm) werden mit Pfeilen angegeben.

Bis im Jahr 2000 (Bleiverbot im Benzin in der Schweiz) stellte die atmosphärische Ablagerung infolge der Verbrennung von bleihaltigem Benzin eine Schadstoffquelle für die Böden dar. Seit der Einführung von bleifreiem Benzin im Jahr 1985 nahm der Bleieintrag im Boden auf diesem Weg erheblich ab (BAFU, 2018). Die Konzentrationen an den FRIBO-Standorten gehen jedoch noch nicht zurück. Die Tatsache, dass Blei der Schadstoff ist, der im Boden am wenigsten mobil ist, könnte eine Erklärung dafür sein (Baize, 1997). Durch seine grosse Affinität zu organischem Material sammelt es sich an der Bodenoberfläche an.

Die Familiengärten weisen immer noch die höchsten Bleigehalte auf. Die Gründe dafür könnten sein:

- > Jahrzehntelange Verwendung von Kompost aus Material, das aus bleibelasteten Zonen stammt oder auf Strassen und Parkplätzen aufgesammelt wurde.
- > Bis ins Jahr 2000 Verwendung von Regenwasser, das auf den Dächern gesammelt wurde (Ablagerung von bleihaltigem atmosphärischem Staub).
- > Ausbringen von Asche der Kehrlichtverbrennung z. Bsp. von Altholz (bleihaltige Farben).

Die Zunahme des Bleigehaltes auf zwei Parzellen in Familiengärten ist beunruhigend. In einem Garten wurde sogar der Prüfwert von 200 ppm überschritten. Zur Ermittlung der Gründe für diese Erhöhung ist eine vertiefte Analyse des Standortes erforderlich. Die Bleikonzentrationen in den anderen Familiengärten bleiben stabil oder gehen zurück, wobei sowohl der Durchschnitt als auch der Medianwert abnehmen.

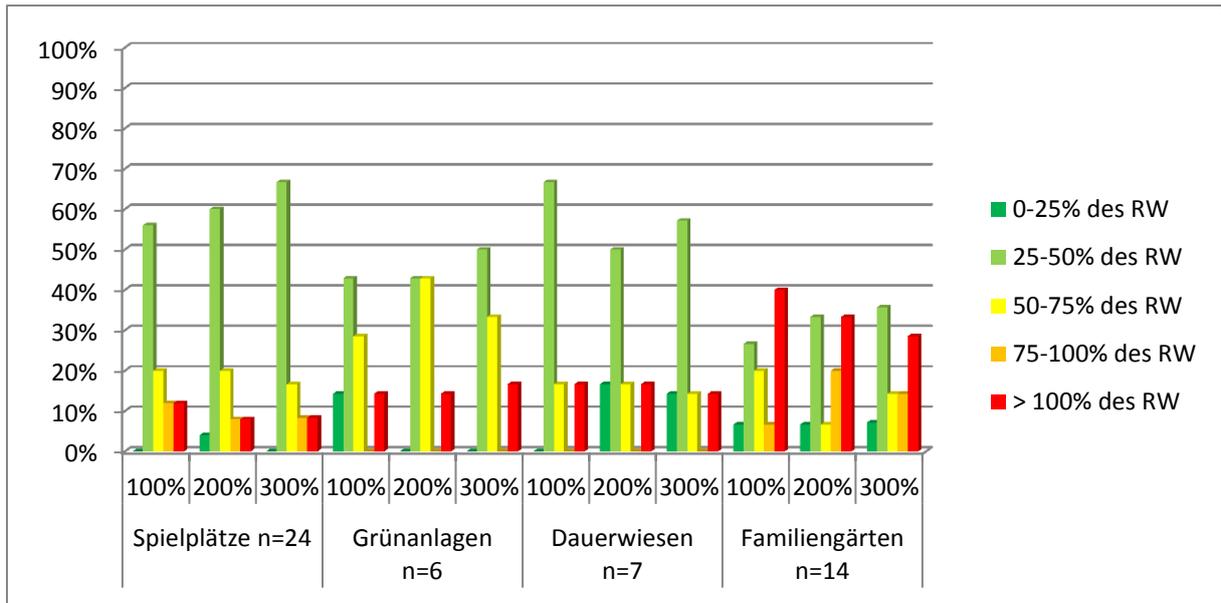


Abbildung 3.2.3-9: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Blei gemäss VBBo

3.2.3.6 Zink

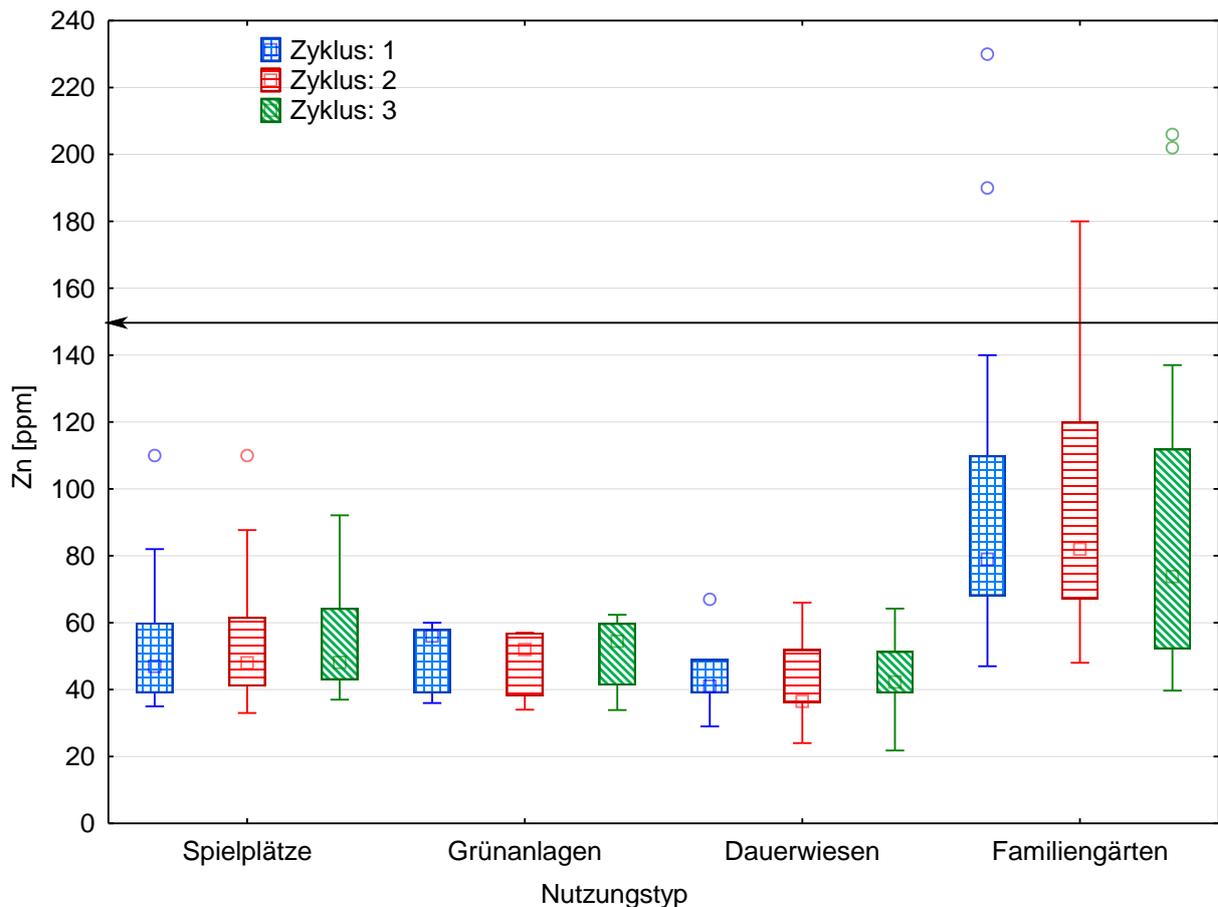


Abbildung 3.2.3-10: Entwicklung des Zinkgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Der Richtwert (150 ppm) wird mit einem Pfeil angegeben.

Die Familiengärten weisen die höchsten Zinkgehalte auf (Abbildung 3.2.3-10: Entwicklung des Zinkgehaltes der städtischen Standorte nach Bodennutzungstyp. Der Richtwert (150 ppm) wird mit einem Pfeil angegeben.). Der Richtwert wird in ca. 15 % der Familiengärten überschritten (Abbildung 3.2.3-11: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Zink gemäss VBBo).

Die Gründe für hohe Zinkgehalte in den Familiengärten sind unterschiedlich. Zink ist ein Grundbestandteil gewisser Fungizide, und mineralische Dünger können auch Zink beinhalten. Die Dachrinnen enthalten meistens Zink. Je nach Zustand der Dachrinnen findet sich das Zink im Wasser wieder, das für die Gartenbewässerung gesammelt wird.

Dies könnten Gründe für höhere Zinkgehalte in den Familiengärten sein. Der Strassenverkehr sowie die Industrie sind auch mögliche Verschmutzungsquellen. Die Zinkgehalte bleiben bei allen Bodennutzungstypen stabil.

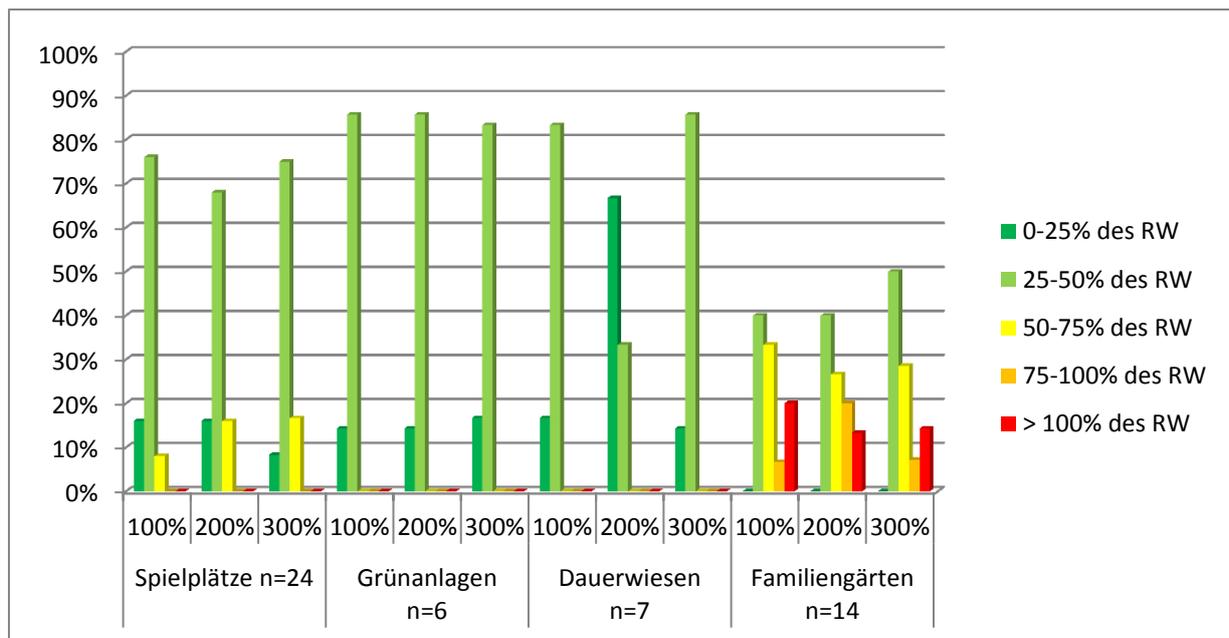


Abbildung 3.2.3-11: Verteilung der Standorte aufgrund der Beurteilung von Zink gemäss VBBö

3.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der städtischen Böden

Die Situation in den Familiengärten muss weiter beobachtet werden. Die Böden enthalten grosse Mengen an Schwermetallen infolge einer unangebrachten Gartenpraxis in der Vergangenheit. Noch heute verwenden Hobbygärtner übermässige Mengen an Dünge- oder Pflanzenschutzmitteln, weil sie nicht genügend informiert sind und in gutem Glauben exzessive Dosen verabreichen. Die zurückgehenden Phosphoreserven zeigen jedoch, dass das Bewusstsein gestiegen ist. Die Grünanlagen, Dauerwiesen und Spielplätze weisen mit einigen Ausnahmen hingegen keine problematischen Werte auf.

Der Richtwert von Cd, Co, Cr und Ni wird an keinem städtischen Standort überschritten.

An 5 der 51 städtischen FRIBO-Standorte wurden Überschreitungen des Richtwertes von Kupfer beobachtet, hauptsächlich in Familiengärten, was sich mit der Verwendung von Fungiziden erklären lässt. Ein Spielplatz und eine Grünanlage sind ebenfalls betroffen. Die Verschmutzungsquellen dieser beiden Standorte konnten aber nicht ermittelt werden. Alle gemessenen Werte stellen jedoch keine Gefahr für die Gesundheit der Benutzer dieser Standorte dar.

8 Standorte überschreiten den Richtwert für Blei gemäss VBBö, hauptsächlich in Familiengärten oder in der Nähe von grossen Strassen.

Der Richtwert für Zink wird schliesslich in 2 Familiengärten überschritten. Gründe dafür könnten die Verwendung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln sowie nahegelegene Strassen sein.

4 Parallele Untersuchungen und Zusammenarbeit mit Institutionen

4.1 Parallele Untersuchungen

Aufgrund seiner Dichte, seiner langen Messreihe und seiner homogenen Verteilung auf dem ganzen Gebiet des Kantons Freiburg ist das FRIBO-Netz zu einer nationalen Referenz für Bodenschutz und -beobachtung geworden. Unsere Daten sowie die seit 1987 referenzierten und aufbewahrten Proben sind für die wichtigsten agronomischen Forschungsanstalten von Interesse, insbesondere Agroscope Changins Wädenswil (ACW), Agroscope Reckenholz Tänikon (ART), die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU). Diese Zusammenarbeiten sind auch für den Kanton Freiburg von Nutzen, da sie eine Vertiefung in den Bereichen Physik, Chemie und Biologie sowie bei der Dynamik der Böden im Kanton ermöglichen.

Die Daten des FRIBO-Netzes wurden in den letzten fünf Jahren für vier Forschungsprojekte genutzt, die unten vorgestellt werden. Wir danken allen Partnern herzlich für diese wertvolle Zusammenarbeit.

- > Dissertation von Alice Johannes, betreut von Pascal Boivin (HEPIA, ETHZ)
- > Artikel von Aurélien Roger zur Situation des Phosphors im FRIBO-Netz, betreut von Sokrat Sinaj (Agroscope Changins)
- > Artikel von Guillaume Blanchet zur Situation des Kaliums im FRIBO-Netz, betreut von Sokrat Sinaj (Agroscope Changins)
- > Artikel in der Einreichungsphase von Lorenzo Frau zur Situation des Magnesiums im FRIBO-Netz, betreut von Sokrat Sinaj (Agroscope Changins)
- > Design Project mit der Sektion Umweltwissenschaften und -technik der EPFL zur DNA-Analyse für eine biologische Überwachung der Böden von Leonie Schweiger und Alexis Baron, betreut von Rizlan Bernier-Latmani

Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?



Alice Johannes^{a,b,*}, Adrien Matter^a, Rainer Schulin^b, Peter Weiskopf^c, Philippe C. Baveye^d, Pascal Boivin^a

^a University of Applied Sciences of Western Switzerland hepi, Soils and Substrates group, Institute Land-Nature-Environment, route de Presinge 150, 1254 Jussy Geneva, Switzerland

^b ETH Zürich, Institute of Terrestrial Ecosystems, Universitätsstrasse 16, 8092 Zürich, Switzerland

^c Swiss Federal Research Station Agroscope, Soil Fertility and Soil Protection group, Department of Natural Resources & Agriculture, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich, Switzerland

^d UMR ECOSYS, AgroParisTech-INRA, Université Paris-Saclay, Avenue Lucien Brétignières, Thiverval-Grignon 78850, France

ARTICLE INFO

Keywords

Soil organic matter
Clay content
Soil quality
Soil structure
Complexed organic carbon
VESS

ABSTRACT

Most soil structure-related physical properties are correlated to soil organic carbon (SOC) content. Texture, mineralogy, and SOC:clay ratio are also acknowledged to affect physical properties, however there is no consensus or general conclusions in this respect. Against this background, the present study aims at determining objectives for the management of SOC in terms of structural quality of agricultural soils. The large area in which 161 free-to-swell undisturbed samples were obtained for this research represents a major part of the Swiss agricultural land and belongs to one broad soil group (Cambi-Luvisols). The structural quality was scored visually, and bulk volumes (inverse of bulk density) were measured at standard matric potentials. To define the effect of SOC without interference of soil mechanical degradation, soils with good structural quality scores were considered first in studying the relationship between SOC and soil pore volumes. Results suggest that the relationship is always linear, irrespective of the clay content of the soils. No optimum of SOC corresponding to a fraction of the clay content is found, contrary to the theory of “complexed organic carbon” (Dexter et al., 2008). However, the SOC:clay ratio decreases with decreasing soil structure quality. The SOC:clay ratio of 1:8 is the average for a very good structure quality. A SOC:clay ratio of 1:10 is the limit between good and medium structural quality, thus it constitutes a reasonable goal for soil management by farmers. A SOC:clay ratio of 1:8 or smaller leads to a high probability of poor structural state. These ratios can be used as criteria for soil structural quality and SOC management, and in that context, the concept of complexed organic carbon appears relevant.

Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland



Aurélien Roger^a, Zamir Libohova^b, Nicolas Rossier^c, Stéphane Joost^d, Alexandra Maltas^a, Emmanuel Frossard^e, Sokrat Sinaj^{a,*}

^a Agroscope Changins-Wädenswil ACW Research Station, Route de Daillier 50, Case postale 1012, 1260 Nyon 1, Switzerland

^b USDA-NRCS National Soil Survey Center, 100 Centennial Mall North, Federal Building, Room 152, Lincoln NE 68508, United States

^c Agronomical Institute of the Fribourg canton, Route de Grangeneuve 31, 1725 Posieux, Switzerland

^d Laboratory of Geographical Information Systems (LASIG), School of Architecture, Civil and Environmental Engineering (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland

^e Institute of Agricultural Sciences, Federal Institute of Technology Zurich (EPFZ), Eschikon 33, CH 8315 Lindau, Switzerland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 July 2013
Received in revised form 31 October 2013
Accepted 8 November 2013
Available online xxx

Keywords:

Soil phosphorus
Soil properties
Land use
Spatial variability
Geostatistics

ABSTRACT

Phosphorus (P) is the second essential nutrient for plant growth but can become an ecological and economical concern in case of over-fertilization. Soil P dynamic is influenced by many parameters like soil physical-chemical properties and farming practices. A better understanding of the factors controlling its distribution is required to achieve best management of P in cropping systems. In Switzerland, the FRIBO network was launched in 1987 and consists of 250 sites covering a wide diversity of soils (Cambisols, Gleysols, Rendzinas, Lithosols, Luvisols, Fluvisols) and three different land uses (cropland, grassland and mountain pasture) across the Fribourg canton. A spatial investigation of the different P forms (total, organic and available) for the FRIBO network led to the following main conclusions:

- (i) The P status in agricultural soils was significantly different among the three land uses encountered, with the highest mean values of available P found in croplands, from 2.12 (CO₂ saturated water extraction) to 81.3 mg.kg⁻¹ (acetate ammonium + EDTA extraction); whereas total P was more abundant in permanent grasslands (1186 mg.kg⁻¹), followed by mountain pastures (1039 mg.kg⁻¹) and croplands (935 mg.kg⁻¹). This full characterization of the soil P status provides important data on P distribution related to soil properties and land use.
- (ii) Environmental variables such as altitude, slope, wetness index or plan curvature, derived from the digital elevation model (DEM) only explained a small part of the spatial variation of the different P forms (20 to 25%). Thus, the geostatistical analyses revealed that land use plays a significant role in soil P distribution. Improved predictions of the spatial distribution of P-related forms at landscape scales are needed and would require additional data points and variables such as parent material, soil types and terrain attributes.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland



Guillaume Blanchet^a, Zamir Libohova^b, Stéphane Joost^c, Nicolas Rossier^d, André Schneider^e, Bernard Jeangros^a, Sokrat Sinaj^{a,*}

^a Agroscope, Institute for Plant Production Sciences IPV, Route de Duillier 50, P.O. Box 1012, 1260 Nyon, Switzerland

^b USDA-NRCS National Soil Survey Center, 100 Centennial Mall North, Federal Building, Room 152, Lincoln, NE 68508, United States

^c Laboratory of Geographical Information Systems (LASIG), School of Architecture, Civil and Environmental Engineering (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland

^d Agricultural Institute of the Fribourg Canton, Route de Grangeneuve 31, 1725 Posieux, Switzerland

^e Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), UMR 1391 ISPA, CS 20032, F-33882 Villenave-d'Ornon cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 June 2016

Received in revised form 25 November 2016

Accepted 1 December 2016

Available online xxxxx

Keywords:

Soil potassium

Soil properties

Terrain attributes

Land use

Spatial statistics

Autocorrelation

Random forest

ABSTRACT

Potassium (K) is a crucial element for plant nutrition and its availability and spatial distribution in agricultural soils is influenced by many agro-environmental factors. In Switzerland, a soil monitoring network (FRIBO) was established in 1987 with 250 sites distributed over the whole of the canton of Fribourg (representing 4% of the surface area of Switzerland), whose territory is shared between the Swiss Midlands and the Western Alp foothills. In this study area, diverse geological deposits (sandstone, marlstone, silts and calcareous rocks), soil types (Cambisols, Gleysols, Rendzinas, Luvisols and Fluvisols) and land uses (cropland, permanent grassland and mountain pasture) are present, making the network interesting for assessing the relative contribution of environmental variables and land use management on soil properties. The aims of the present study were to (i) characterize the soil K status in the Fribourg canton according to four different extraction methods; (ii) analyse the spatial variability of soil K in relation to land use, soil type, soil parent material and topography; (iii) evaluate the spatial predictability of K at the canton level; and (iv) analyse the implications for K fertilization management. The overall amount of soil total K averaged $13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with significant variations across the sites ($5.1\text{--}22.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The spatial distribution of total K content was influenced by relatively extended soil forming processes, as suggested by (i) a significant global spatial autocorrelation measure at the 10 km scale (Moran's $I = 0.43$); (ii) significant differences observed among soil types and soil parent materials and (iii) significant correlations with land attributes such as elevation ($r = -0.51$). On the other hand, available mean K forms were significantly different among land uses, with the highest mean values of available K encountered in permanent grasslands, from $46.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (water extraction) to $198 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (acetate ammonium + EDTA extraction). All K forms (total and available) showed similar spatial regional patterns for all spatial interpolation methods, with areas dominated by permanent grassland and crops presenting higher values. However, these trends were less pronounced for the available K forms due to the prevalence of on-farm management practices for these K forms (e.g. fertilization), likely inducing high spatial and temporal variability. This hypothesis was supported by spatial clustering of low and/or high K fertility status that could be related to local particular farming practices. Grasslands require particular attention with regard to overall high K fertility status.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

Analyse de l'ADN pour un suivi biologique des sols

Contexte

L'Institut Agricole du Canton de Fribourg effectue un suivi long terme des sols (FRIBO) depuis 1987. Le réseau de surveillance est composé de 264 sites comprenant des terres assolées, des prairies permanentes, des alpages et des sites forestiers. Jusqu'à présent, la mesure de l'ATP et la minéralisation du carbone organique sont utilisées comme mesures de la présence et de l'activité de la biomasse des sols. Avec la récente baisse des coûts d'extraction et de séquençage de l'ADN, l'intégration d'une étude de l'ADN au suivi long terme existant est une alternative intéressante pour le suivi des communautés microbiennes des sols, la diversité de ces dernières contribuant à la qualité et à la fertilité du sol.

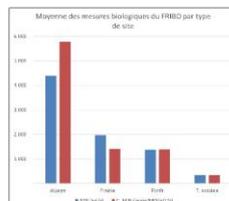
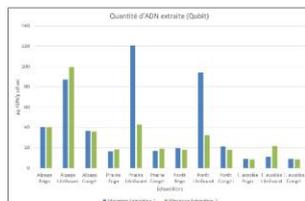
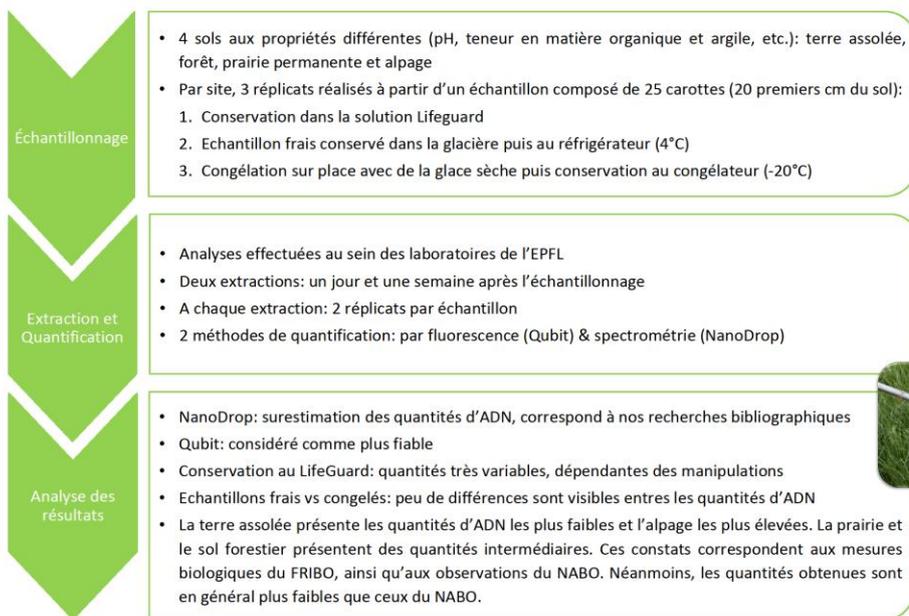
Objectifs

- Documenter les méthodes existantes d'extraction, de quantification et d'analyse de l'ADN des sols
- Proposer l'alternative la plus pertinente pour le FRIBO
- Définir un protocole d'échantillonnage des sols
- Tester l'influence de 3 méthodes de conservation des sols sur la quantification de l'ADN

Résultats de la recherche

- Séquençage: permet un suivi de la composition et de l'évolution des communautés microbiennes
 - La composition de la biomasse reflète plusieurs facteurs d'influence ainsi que des stress éventuels
 - Une perte de la biodiversité peut être le signe d'une détérioration biologique du milieu et servir d'alerte précoce
- Le défi du FRIBO: assurer la comparabilité des résultats sur le long terme
 - Kits d'extraction d'ADN à exclure car soumis à de régulières modifications par le fournisseur
 - Conserver les extraits d'ADN au congélateur pour de futures analyses
- L'observatoire national des sols (NABO) analyse l'ADN depuis 2012
 - Résultats très stables: méthode pertinente pour un suivi long terme
- Pour des raisons de comparabilité au niveau Suisse, recommandation au FRIBO d'utiliser les mêmes méthodes que le NABO

Quelle est l'influence des méthodes de conservation des sols sur la quantité de l'ADN extrait?



Conclusion

- Recommandation: mise en oeuvre du suivi de l'ADN en coopération avec le NABO, afin de profiter de leur expérience et de leur savoir-faire
- Une comparaison des quantités d'ADN sur le long terme peut être intéressante, surtout si elle est complétée par un séquençage
- Un séquençage de nos extraits d'ADN est recommandé pour décider quelle méthode de conservation convient le mieux pour la représentativité des communautés microbiennes

Remerciements

A Franco Widmer et Anna Hug du NABO, Beat Frey du WSL, Thierry Heger de l'HES-SO de Changins, Emmanuelle Rohrbach du Laboratoire de biotechnologie environnementale de l'EPFL, Pierre Rossi du Central environmental laboratory de l'EPFL, Manon Fruttschi et la Pr. Rizlan Bernier-Latmani du Laboratoire de microbiologie environnementale de l'EPFL, ainsi qu'à Clément Levasseur de l'Institut Agricole du Canton de Fribourg.

Encadrants: Clément Levasseur & Pr. Rizlan Bernier-Latmani

4.2 Zusammenarbeit

Migration der Daten des FRIBO-Netzes auf die Plattform NABODAT

Die gesamten Daten des FRIBO-Netzes migrierten 2016 auf die Plattform NABODAT. Dahinter steht die Idee, eine Plattform für alle Bodendaten der Schweiz aufzubauen. Die meisten Kantone haben diese Migration durchgeführt oder werden dies demnächst tun, sodass die Benutzer Zugang zu umfangreichen Datenmengen haben werden.

5 Schlussfolgerungen

Das FRIBO-Netz entfaltet nach 30 Jahren Bodenüberwachung sein gesamtes Potenzial und seinen Nutzen für die Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und für den Umweltschutz. Die zahlreichen Kollaborationen, insbesondere mit Agroscope zur räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Nährstoffgehalte, aber auch mit der HEPIA zur organischen Substanz und Bodenstruktur, zeigen die Bedeutung einer langfristigen Bodenüberwachung um die landwirtschaftliche Forschung voranzutreiben.

In den letzten 30 Jahren hat das FRIBO-Netz die Landwirte und den gesamten Landwirtschaftssektor darauf aufmerksam gemacht, wie wichtig der Humusgehalt ist, dass die Bodenversauerung voranschreitet und die Borgehalte tief sind. Es zeigt auch die mögliche Reduktion der Phosphorgaben ohne Ertragsrückgang auf, die Zunahme der Kaligehalte in den Böden der Dauerwiesen sowie die Tatsache, dass die Schwermetallgehalte in den landwirtschaftlichen Böden nicht zunehmen.

Das städtische Netz ermöglichte es, die Hobbygärtner für die übermässige Verwendung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln zu sensibilisieren, und dürfte so zur Verbesserung ihrer Gesundheit beitragen. Es ergibt zudem ein Bild der städtischen Verschmutzung im Kanton Freiburg, die insgesamt zufriedenstellend ist.

Die Mittel, die vor 30 Jahren für diese Bodenbeobachtung eingesetzt wurden, erweisen sich immer noch als nützlich, sind aber nicht ausreichend, um Antworten auf die grossen agronomischen Fragen unserer Zeit zu finden. Die vertiefte Beobachtung der Bodenbiologie mit DNA-basierten Methoden, eine Analyse der physischen Parameter des Bodens zur Ermittlung des Verdichtungsgrads und der strukturellen Stabilität oder die Beobachtung der Pflanzenschutzmittel im Boden würden das FRIBO-Netz bestens ergänzen. Detailliertere Untersuchungen der Agrarpraxis, vor allem bezüglich der Düngung und Bodenbearbeitung, sind erforderlich, um die Datenanalyse zu ergänzen. Solche Untersuchungen laufen seit 2017.

Das Landwirtschaftliche Institut Grangeneuve und das Amt für Umwelt sorgen mit Hilfe dieses alle fünf Jahre erscheinenden Berichts, der FRIBO-Tage und verschiedener Merkblätter und Artikel dafür, dass die Hinweise und geeigneten Empfehlungen verbreitet und allgemein zugänglich werden. Die Resultate fliessen ebenfalls in den Unterricht zu Bodenkunde und Umwelt sowie in Weiterbildungskurse ein.

Das FRIBO-Netz ist eine äusserst wertvolle Grundlage und Datenquelle für die Vertiefung der verschiedenen Themen im Bereich der Bodenkunde geworden und ermöglicht eine Zusammenarbeit mit mehreren Institutionen, die im Bodenschutz aktiv sind.

6 Quellenverzeichnis

Agroscope, 2004. Fütterungsempfehlungen für Schweine (Gelbes Buch)

BAFU (Hrsg.) 2018. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–2015. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1818: 134 Seiten

BLW, 1980. Bodeneigungskarte der Schweiz, 1:200'000 (Grundlagen für die Raumplanung). Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.

Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. INRA, Paris. 408 pages.

Biedermann Y., Vittoz P., et Gobat J.-M., 2017. Typologie des sols sur gypse et végétation associée en Suisse. Bulletin de la société vaudoise des sciences naturelles, 94.1, Seiten 107–129

Blanchet G., Libohova Z., Joost S., Rossier N., Schneider A., Jeangros B. & Sinaj S., 2017. Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland. Geoderma 290, Seiten 107–121

Desaules A. & Studer K., 1993. Nationales Bodenbeobachtungsnetz (NABO) – Messperiode 1985–1991. Aufbau und erste Ergebnisse. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 175 Seiten

Doffey C., 1997. Etude de la variabilité spatiale du cadmium dans les sols de la région de la Dent-de-Lys. Mémoire pour l'obtention d'un Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement. EPFL, Lausanne. 58 Seiten

Dontsova K. & Norton L.D., 2001. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland

Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Phosphor in Böden. Standortbestimmung Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 174 Seiten

Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A., 2015. Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985 bis 2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507: 81 Seiten

Indexmundi, <https://www.indexmundi.com/fr/matierespremieres/?marchandise=phosphate&mois=360&marchandise=ble>, konsultiert am 13.09.2018

Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Baveye P.C., Boivin P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? Geoderma 302, Seiten 14–21

Julien P. & Morand D., 1995. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987–1994. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale de production végétale, Grangeneuve. 146 Seiten

Julien P., Bouchard D. & Niggli T., 2002. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987–2001. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 170 Seiten

Keller A., Rossier N. & Desaules A., 2005. Schwermetallbilanzen von Landwirtschaftsparzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Schriftenreihe der FAL 54, Zürich. 57 Seiten

Loué A., 1986. Les oligo-éléments en agriculture. Agri-Nathan International, Paris. 339 Seiten

Maire N., 1984. Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols ; une nouvelle méthode de calcul des pertes en ATP. Soil Biology and Biochemistry, 19 491–500

Meyer K., 1991. Bodenverschmutzung in der Schweiz. Bericht NFP Boden. Liebefeld-Bern. 240 Seiten

Neuweiler R., Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau, 2011. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 29 Seiten

-
- Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)**, 2006. Agrarbericht 2006. BLW, Bern. 235 Seiten.
- VBBö, SR 814.12**, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998
- Poget E., Rossier N. & Gfeller Laban B.**, 2004. FRIBO urbain : Réseau d'observation des sols en milieu urbain – Inventaire. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 20 Seiten
- Reutimann J.**, 2006. Kupfer- und Zink-Einträge durch Rindvieh- und Schweinefutter in landwirtschaftliche Systeme. Technik-Semesterarbeit – Studiengang Umweltnaturwissenschaften. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. 45 Seiten
- Roger A., Libohova Z., Rossier N., Joost S., Maltas A., Frossard E., Sinaj S.**, 2013. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma* 217–218, Seiten 26–36
- Rossier N. & Dessureault-Rompré J.**, 2003. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987–2001 Biologie. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 98 Seiten
- Rossier N., Altermath J., Niggli T.**, 2007. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987–2006. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 157 Seiten
- Rossier N., von Niederhäusern A., Bongard L.**, 2012. FRIBO : Réseau d'observation des sols agricoles 1987–2007 Biologie. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg, Station cantonale des productions animales et végétales, Grangeneuve. 200 Seiten
- Sinaj S. & Richner W.**, 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung* 8 (6), Spezialpublikation, 276 Seiten
- Statsoft**, Statistica, prise en main, 2. Auflage
- Thöni L., Matthaei D., Seidler E., Bergamini A.**, 2008. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990–2005. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern. 152 Seiten

7 Kontakte

7.1 Landwirtschaftliche Böden

Grangeneuve, Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg LIG
Landwirtschaftliches Beratungszentrum
Rte de Grangeneuve 27, 1725 Posieux
T +41 26 305 55 00, F +41 26 305 55 04
www.fr.ch/iag, iag@fr.ch
Kontakt: Clément Levasseur, clement.levasseur@fr.ch, T +41 26 305 58 74

7.2 Städtische Böden

Amt für Umwelt AfU
Sektion UVP, Bodenschutz und Anlagensicherheit
Impasse de la Colline 4, 1762 Givisiez
T +26 305 37 60, F +26 305 10 02
www.fr.ch/sen, sen@fr.ch
Kontakt: Thilo Dürr-Auster, thilo.duerr-auster@fr.ch, T +41 26 305 51 97

Bildquelle Deckblatt: Grangeneuve

A1 Anhänge

| OS [%] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|-----|------|-----|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 3.2 | 3.1 | 3.0 | 2.8 | 2.9 | 3.0 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 7.5 | 7.7 | 8.3 | 8.1 | 8.3 | 8.1 |
| Median | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.3 | 2.5 | 2.6 | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 5.9 | 6.5 | 6.8 | 7.0 | 7.1 | 7.4 |
| Minimum | 1.2 | 1.1 | 1.2 | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 2.2 | 1.9 | 2.8 | 2.7 | 2.3 | 2.2 | 3.5 | 3.9 | 3.2 | 3.8 | 4.5 | 4.3 |
| Maximum | 29.1 | 16.0 | 16.0 | 15.5 | 14.8 | 11.7 | 10.0 | 13.0 | 9.5 | 10.0 | 9.8 | 10.1 | 41.0 | 29.6 | 31.2 | 22.5 | 22.0 | 21.8 |
| Standard deviation | 2.8 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 5.5 | 4.1 | 4.4 | 3.3 | 3.3 | 2.8 |

| pH [-] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 6.4 | 6.5 | 6.4 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.2 | 6.3 | 6.1 | 6.2 | 6.2 | 6.2 | 6.0 | 6.0 | 5.8 | 5.9 | 5.9 | 5.9 |
| Median | 6.2 | 6.4 | 6.3 | 6.4 | 6.3 | 6.5 | 6.1 | 6.3 | 6.0 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 5.9 | 5.9 | 5.6 | 5.8 | 5.9 | 5.7 |
| Minimum | 5.1 | 5.2 | 4.9 | 5.0 | 5.3 | 5.2 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 4.7 | 4.7 | 4.4 | 4.8 | 4.4 | 4.6 |
| Maximum | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.8 | 8.0 | 8.1 | 7.5 | 8.0 | 7.4 | 7.5 | 7.7 | 7.9 | 7.4 | 7.4 | 7.3 | 7.4 | 7.3 | 7.4 |
| Standard deviation | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.7 |

| CEC [meq/100g] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 16.0 | 15.8 | 15.2 | 14.5 | 14.1 | 13.7 | 22.8 | 21.4 | 22.8 | 21.6 | 20.8 | 19.0 | 30.4 | 30.3 | 30.9 | 30.3 | 29.2 | 25.1 |
| Median | 14.4 | 13.7 | 13.5 | 12.7 | 12.4 | 11.8 | 21.3 | 20.0 | 21.3 | 20.1 | 19.3 | 16.8 | 28.4 | 26.8 | 28.1 | 27.9 | 26.2 | 21.3 |
| Minimum | 8.3 | 7.1 | 8.4 | 6.6 | 5.9 | 6.1 | 11.5 | 10.0 | 11.7 | 11.5 | 10.2 | 6.5 | 15.9 | 17.6 | 17.3 | 17.8 | 13.6 | 11.6 |
| Maximum | 65.0 | 73.5 | 64.3 | 67.9 | 67.7 | 64.0 | 45.2 | 49.3 | 46.9 | 49.7 | 51.7 | 52.1 | 57.3 | 64.0 | 61.6 | 66.2 | 71.3 | 69.3 |
| Standard deviation | 7.9 | 8.4 | 7.8 | 8.5 | 8.1 | 7.8 | 7.2 | 7.5 | 7.2 | 7.1 | 7.6 | 7.8 | 9.1 | 9.7 | 10.1 | 9.4 | 11.4 | 11.6 |

| Sättigung CEC [%] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 60.9 | 57.1 | 56.4 | 55.9 | 62.0 | 58.1 | 56.9 | 55.1 | 54.0 | 52.3 | 60.5 | 59.5 | 55.3 | 52.7 | 51.5 | 49.5 | 59.8 | 57.7 |
| Median | 58.0 | 55.6 | 54.4 | 52.6 | 60.2 | 57.4 | 57.4 | 52.7 | 54.1 | 51.8 | 59.7 | 60.0 | 57.8 | 52.6 | 50.0 | 48.6 | 63.3 | 60.3 |
| Minimum | 25.3 | 15.0 | 18.3 | 14.0 | 21.0 | 23.6 | 29.7 | 24.0 | 24.3 | 16.6 | 17.7 | 27.7 | 16.3 | 13.6 | 9.9 | 6.0 | 17.2 | 17.7 |
| Maximum | 100.0 | 96.8 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 96.2 | 100.0 | 91.9 | 92.2 | 96.8 | 91.8 | 100.0 | 90.0 | 88.2 | 89.9 | 87.6 | 87.2 |
| Standard deviation | 18.7 | 18.9 | 20.1 | 20.3 | 17.9 | 17.7 | 15.5 | 18.0 | 16.1 | 17.5 | 15.0 | 13.2 | 20.3 | 21.1 | 21.5 | 20.5 | 16.8 | 16.2 |

| P CO2 [Index] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|-------|-------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 19.7 | 16.3 | 14.8 | 13.6 | 13.0 | 12.8 | 14.2 | 10.3 | 9.3 | 12.2 | 12.9 | 11.8 | 5.3 | 4.3 | 4.6 | 4.6 | 4.0 | 4.0 |
| Median | 13.0 | 11.0 | 10.0 | 9.8 | 9.0 | 9.2 | 8.4 | 6.9 | 7.0 | 6.8 | 6.7 | 6.8 | 4.5 | 3.3 | 3.6 | 4.0 | 3.5 | 3.2 |
| Minimum | 2.9 | 1.1 | 2.3 | 1.4 | 1.9 | 2.1 | 1.5 | 2.4 | 2.2 | 1.9 | 2.1 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.0 |
| Maximum | 115.0 | 82.0 | 75.5 | 76.8 | 71.5 | 77.1 | 51.0 | 55.0 | 55.5 | 135.9 | 157.9 | 90.4 | 15.0 | 14.0 | 11.7 | 13.5 | 15.4 | 17.5 |
| Standard deviation | 20.0 | 15.7 | 14.1 | 12.2 | 12.6 | 12.2 | 12.6 | 10.5 | 9.2 | 18.2 | 20.2 | 15.1 | 3.2 | 2.6 | 2.6 | 3.0 | 2.6 | 3.1 |

| P AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 132 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 83.2 | 81.8 | 81.5 | 83.5 | 78.3 | 80.0 | 61.4 | 69.5 | 56.4 | 65.9 | 66.9 | 59.5 | 23.7 | 21.3 | 19.9 | 22.5 | 18.4 | 17.6 |
| Median | 68.6 | 66.1 | 65.6 | 69.8 | 62.4 | 64.6 | 42.6 | 46.0 | 39.5 | 43.8 | 41.3 | 38.0 | 20.4 | 13.7 | 11.9 | 16.3 | 15.0 | 16.3 |
| Minimum | 18.0 | 7.6 | 16.4 | 7.8 | 12.3 | 9.2 | 14.0 | 13.7 | 8.9 | 11.1 | 8.8 | 7.8 | 10.1 | 4.3 | 2.3 | 1.9 | 2.1 | 2.1 |
| Maximum | 354.2 | 348.5 | 286.9 | 311.0 | 337.3 | 292.6 | 333.6 | 385.3 | 293.8 | 439.1 | 423.6 | 537.4 | 48.8 | 86.7 | 80.9 | 96.4 | 66.6 | 65.3 |
| Standard deviation | 59.2 | 58.4 | 56.8 | 56.9 | 55.0 | 55.9 | 61.4 | 73.6 | 54.1 | 69.2 | 72.1 | 75.0 | 12.0 | 18.0 | 19.2 | 19.1 | 15.7 | 14.6 |

| K CO2 [mg-K2O / 100g] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|-----|------|-----|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.3 | 3.0 | 3.6 | 2.7 | 2.7 | 2.2 | 3.3 | 3.7 | 4.0 | 2.0 | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 1.9 | 1.7 |
| Median | 2.3 | 2.6 | 2.5 | 2.8 | 2.4 | 3.0 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.7 | 2.0 | 1.9 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.2 |
| Minimum | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.4 |
| Maximum | 18.0 | 16.8 | 16.6 | 16.2 | 11.0 | 10.1 | 27.0 | 20.0 | 15.7 | 27.3 | 27.0 | 35.2 | 18.0 | 9.5 | 12.5 | 8.4 | 10.2 | 6.4 |
| Standard deviation | 3.2 | 2.7 | 2.4 | 2.5 | 2.0 | 2.4 | 3.9 | 3.2 | 2.4 | 4.0 | 4.2 | 5.1 | 2.8 | 1.5 | 2.5 | 1.5 | 2.0 | 1.3 |

| K AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 132 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 163.9 | 175.2 | 164.7 | 163.3 | 159.8 | 173.5 | 149.9 | 169.8 | 155.7 | 180.4 | 197.9 | 203.5 | 167.1 | 161.7 | 193.9 | 176.8 | 186.3 | 168.5 |
| Median | 140.6 | 155.8 | 143.6 | 150.9 | 149.5 | 151.9 | 122.3 | 124.9 | 125.8 | 160.3 | 169.3 | 169.9 | 125.4 | 127.4 | 147.1 | 153.9 | 173.8 | 139.2 |
| Minimum | 48.2 | 51.6 | 63.0 | 57.5 | 62.6 | 69.4 | 48.2 | 43.9 | 58.2 | 49.9 | 55.5 | 46.9 | 55.3 | 68.8 | 84.2 | 68.3 | 52.2 | 79.7 |
| Maximum | 702.7 | 764.5 | 568.5 | 539.9 | 443.3 | 367.8 | 787.6 | 818.0 | 578.0 | 820.3 | 748.0 | 1007 | 697.2 | 565.5 | 598.5 | 540.0 | 519.2 | 402.7 |
| Standard deviation | 97.7 | 99.5 | 83.5 | 76.1 | 65.5 | 74.5 | 107.5 | 128.8 | 93.3 | 119.7 | 118.2 | 148.2 | 115.9 | 95.1 | 125.4 | 91.0 | 97.1 | 84.5 |

| Mg CaCl2 [mg-Mg/100 g] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 7.2 | 7.2 | 7.4 | 7.9 | 9.0 | 9.3 | 10.7 | 10.6 | 11.8 | 11.9 | 13.6 | 13.9 | 10.1 | 9.2 | 9.8 | 10.2 | 11.0 | 10.4 |
| Median | 6.3 | 6.4 | 6.6 | 7.3 | 7.8 | 8.3 | 10.6 | 10.5 | 12.3 | 11.1 | 13.7 | 14.0 | 8.8 | 8.3 | 8.4 | 9.3 | 9.0 | 9.3 |
| Minimum | 2.7 | 2.2 | 3.0 | 2.5 | 3.8 | 2.9 | 3.3 | 3.4 | 5.9 | 3.1 | 4.5 | 3.4 | 4.1 | 2.6 | 3.7 | 3.7 | 3.5 | 3.6 |
| Maximum | 24.9 | 27.9 | 24.3 | 30.0 | 29.7 | 26.8 | 18.3 | 18.5 | 23.8 | 22.3 | 25.5 | 23.3 | 34.1 | 28.6 | 36.1 | 29.5 | 31.0 | 30.9 |
| Standard deviation | 3.5 | 3.6 | 3.4 | 3.8 | 4.2 | 3.9 | 3.1 | 3.5 | 3.9 | 3.8 | 4.4 | 4.2 | 5.3 | 5.1 | 5.4 | 4.8 | 5.3 | 5.1 |

| Mg AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 132 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 104.4 | 116.7 | 120.6 | 121.7 | 128.3 | 132.4 | 151.4 | 169.3 | 176.9 | 169.8 | 183.0 | 186.1 | 153.8 | 167.4 | 168.8 | 164.3 | 170.2 | 161.3 |
| Median | 70.7 | 88.0 | 6.6 | 91.5 | 7.8 | 106.9 | 144.6 | 160.5 | 165.0 | 154.0 | 171.2 | 172.4 | 133.3 | 134.0 | 153.0 | 131.9 | 142.8 | 135.8 |
| Minimum | 18.1 | 25.0 | 3.0 | 27.5 | 3.8 | 29.1 | 24.3 | 44.5 | 70.5 | 31.9 | 53.5 | 37.2 | 37.8 | 57.0 | 52.0 | 43.4 | 60.5 | 41.6 |
| Maximum | 500.7 | 600.0 | 24.3 | 520.3 | 29.7 | 495.2 | 536.7 | 740.0 | 716.0 | 660.6 | 667.5 | 636.1 | 599.6 | 666.0 | 626.0 | 675.8 | 712.3 | 676.3 |
| Standard deviation | 86.6 | 89.5 | 3.4 | 89.2 | 4.2 | 81.5 | 74.7 | 96.5 | 90.5 | 82.1 | 80.5 | 78.0 | 106.9 | 123.0 | 106.9 | 125.6 | 120.0 | 122.8 |

| Mn AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 60 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 264.5 | 281.9 | 297.7 | 295.5 | 294.5 | 305.6 | 287.2 | 323.0 | 348.6 | 339.2 | 349.4 | 341.1 | 321.0 | 322.1 | 377.2 | 345.4 | 384.5 | 368.5 |
| Median | 231.0 | 251.5 | 274.0 | 277.0 | 283.0 | 280.0 | 262.0 | 299.0 | 317.0 | 321.0 | 325.0 | 319.0 | 231.0 | 224.0 | 235.0 | 220.0 | 259.0 | 260.0 |
| Minimum | 84.0 | 86.0 | 85.0 | 39.0 | 47.0 | 59.6 | 72.0 | 81.0 | 46.0 | 66.0 | 56.0 | 50.0 | 44.0 | 46.0 | 33.0 | 26.0 | 25.0 | 15.0 |
| Maximum | 728 | 832 | 995 | 994 | 1005 | 1068 | 667 | 810 | 784 | 919 | 855 | 796 | 1375 | 1306 | 1529 | 1589 | 1362 | 1373 |
| Standard deviation | 120.0 | 116.3 | 135.5 | 138.1 | 129.4 | 144.1 | 132.8 | 142.8 | 175.8 | 178.3 | 161.8 | 151.2 | 253.8 | 264.9 | 320.2 | 311.1 | 323.4 | 307.4 |

| Ca AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 132 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 5219 | 4782 | 5181 | 5017 | 4770 | 4652 | 5836 | 6297 | 4924 | 4512 | 5278 | 4788 | 4777 | 6163 | 5145 | 5234 | 5563 | 5767 |
| Median | 1512 | 1919 | 1880 | 1684 | 1786 | 1832 | 2690 | 2966 | 3040 | 2676 | 2583 | 2424 | 3286 | 4164 | 3640 | 3487 | 3532 | 3032 |
| Minimum | 1.0 | 497.0 | 441.0 | 312.0 | 536.0 | 700.9 | 216.0 | 668.0 | 950.0 | 635.0 | 706.0 | 539.9 | 1.0 | 508.0 | 588.0 | 491.0 | 474.0 | 378.3 |
| Maximum | 54744 | 73020 | 93050 | 77030 | 76648 | 72972 | 56752 | 103440 | 98800 | 80705 | 77962 | 79606 | 19450 | 57580 | 23580 | 49047 | 53798 | 57237 |
| Standard deviation | 10175 | 9630 | 12099 | 11052 | 10542 | 9984 | 10472 | 14263 | 11862 | 9430 | 11108 | 10121 | 4053 | 8836 | 4785 | 7370 | 7946 | 9354 |

| B [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|--------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.6 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.6 |
| Median | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.6 |
| Minimum | 0.2 | 0.3 | 0.0 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.1 |
| Maximum | 2.6 | 2.2 | 1.7 | 3.6 | 2.3 | 1.5 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | 2.2 | 2.1 | 1.4 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 2.2 | 2.0 | 1.6 |
| Standard deviation | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |

| Fe AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | Naturwiesen | | | | Alpweiden | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | |
| N | 135 | 127 | 122 | 115 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 401.9 | 380.8 | 372.9 | 357.2 | 552.4 | 512.7 | 512.1 | 471.9 | 887.9 | 631.7 | 705.9 | 643.1 |
| Median | 354.0 | 322.0 | 324.0 | 331.0 | 549.0 | 458.0 | 475.5 | 439.0 | 736.0 | 566.0 | 640.0 | 575.4 |
| Minimum | 140.0 | 124.0 | 127.0 | 129.1 | 213.0 | 204.0 | 216.0 | 189.7 | 260.0 | 342.0 | 370.0 | 246.8 |
| Maximum | 1456 | 1146 | 1227 | 1306 | 1833 | 1352 | 1473 | 1118 | 3684 | 1280 | 1355 | 1330 |
| Standard deviation | 197.4 | 172.5 | 181.9 | 184.2 | 227.3 | 212.9 | 207.3 | 190.1 | 583.4 | 242.8 | 280.5 | 259.0 |

| Cu AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 60 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 11.3 | 9.8 | 10.5 | 10.5 | 10.7 | 11.2 | 6.3 | 6.3 | 6.2 | 6.0 | 6.3 | 6.6 | 5.4 | 5.5 | 5.7 | 6.2 | 6.5 | 8.9 |
| Median | 4.9 | 5.1 | 4.8 | 5.0 | 5.2 | 5.6 | 4.8 | 5.0 | 4.7 | 4.9 | 5.3 | 5.6 | 4.4 | 4.7 | 4.4 | 4.2 | 5.0 | 5.6 |
| Minimum | 1.9 | 1.9 | 1.1 | 1.8 | 1.7 | 2.8 | 2.9 | 2.1 | 2.3 | 1.3 | 1.4 | 1.9 | 2.1 | 2.1 | 1.4 | 1.4 | 1.7 | 2.3 |
| Maximum | 235.9 | 244.2 | 304.3 | 285.1 | 248.6 | 222.2 | 70.1 | 64.5 | 56.3 | 69.2 | 59.5 | 69.8 | 16.4 | 18.0 | 22.0 | 28.1 | 22.5 | 112.9 |
| Standard deviation | 35.2 | 29.8 | 34.4 | 33.7 | 31.9 | 31.2 | 8.6 | 7.8 | 6.6 | 7.7 | 6.5 | 7.1 | 3.3 | 3.4 | 4.3 | 5.5 | 4.7 | 16.4 |

| Zn AEE10 [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|-------------------------|--------------|------|------|-------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|-------|-------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 60 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.5 | 3.9 | 4.4 | 6.1 | 6.3 | 5.6 | 5.4 | 5.4 | 5.5 | 9.6 | 9.6 | 13.1 | 9.0 | 8.7 | 9.9 |
| Median | 4.0 | 4.0 | 3.8 | 3.3 | 3.3 | 3.5 | 5.5 | 5.3 | 4.4 | 4.3 | 4.6 | 4.5 | 7.5 | 6.8 | 6.5 | 4.9 | 5.3 | 5.2 |
| Minimum | 2.3 | 1.9 | 1.2 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 2.6 | 2.2 | 2.3 | 1.6 | 1.3 | 1.3 | 3.0 | 2.8 | 2.5 | 1.3 | 2.1 | 2.4 |
| Maximum | 19.6 | 23.5 | 65.9 | 168.5 | 21.2 | 21.6 | 21.0 | 27.7 | 27.5 | 30.8 | 28.9 | 27.4 | 41.5 | 59.2 | 115.7 | 108.6 | 77.9 | 156.3 |
| Standard deviation | 3.2 | 3.3 | 6.1 | 15.5 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.8 | 3.6 | 4.2 | 3.8 | 3.7 | 7.0 | 9.3 | 21.7 | 15.9 | 11.7 | 22.7 |

| Cd Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|------------------------------|--------------|-----|-----|------|------|-----|-------------|-----|-----|------|------|-----|-----------|-----|-----|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Median | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| Minimum | 0.1 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | -0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | -0.1 | -0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | -0.1 | -0.1 | 0.2 |
| Maximum | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 1.7 | 1.9 | 1.3 | 1.3 | 2.1 | 1.4 |
| Standard deviation | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |

| Co Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 61 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 6.6 | 5.8 | 6.3 | 5.8 | 5.9 | 5.9 | 8.3 | 6.4 | 7.3 | 6.4 | 6.6 | 6.4 | 8.9 | 7.2 | 8.5 | 7.5 | 7.8 | 7.3 |
| Median | 6.0 | 5.5 | 6.0 | 5.3 | 5.4 | 5.4 | 7.9 | 6.0 | 7.0 | 6.1 | 6.5 | 6.2 | 7.2 | 6.7 | 7.2 | 6.6 | 6.6 | 6.7 |
| Minimum | 3.1 | 2.9 | 3.2 | 2.7 | 3.1 | 3.1 | 3.9 | 3.1 | 2.8 | 3.3 | 3.2 | 3.1 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.6 |
| Maximum | 15.1 | 14.3 | 14.8 | 14.0 | 13.0 | 14.0 | 18.6 | 13.3 | 12.8 | 11.6 | 13.0 | 13.0 | 30.5 | 16.7 | 22.0 | 19.0 | 18.0 | 16.5 |
| Standard | 2.4 | 1.8 | 2.0 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 2.7 | 1.9 | 2.2 | 1.9 | 2.1 | 1.9 | 6.0 | 4.3 | 5.5 | 4.8 | 4.7 | 4.1 |

| deviation | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| Cr Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
| Zyklus | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 61 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 18.3 | 20.1 | 23.1 | 23.3 | 22.5 | 23.6 | 22.3 | 21.4 | 24.4 | 24.1 | 24.4 | 24.5 | 13.9 | 12.7 | 16.7 | 16.9 | 16.5 | 17.1 |
| Median | 16.2 | 18.5 | 22.0 | 22.0 | 21.7 | 22.0 | 18.5 | 20.1 | 24.2 | 25.0 | 25.0 | 25.1 | 11.9 | 8.5 | 14.4 | 14.0 | 14.0 | 13.7 |
| Minimum | 7.5 | 6.9 | 9.3 | 13.0 | 13.0 | 12.5 | 8.1 | 7.2 | 5.9 | 11.9 | 11.0 | 11.3 | 4.4 | 4.3 | 5.1 | 5.8 | 5.6 | 7.1 |
| Maximum | 48.8 | 41.4 | 62.4 | 59.0 | 51.0 | 57.7 | 58.0 | 56.0 | 42.8 | 52.0 | 49.0 | 46.3 | 71.5 | 42.9 | 64.6 | 56.0 | 58.0 | 61.9 |
| Standard deviation | 8.0 | 7.0 | 9.0 | 7.2 | 7.0 | 7.3 | 10.4 | 9.2 | 7.6 | 6.6 | 6.6 | 5.9 | 11.2 | 9.0 | 10.1 | 10.2 | 10.4 | 10.5 |

| Cu Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Zyklus | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 61 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 24.3 | 22.5 | 21.0 | 21.3 | 22.2 | 22.3 | 19.1 | 16.4 | 17.3 | 15.9 | 16.7 | 16.4 | 16.7 | 14.3 | 15.8 | 15.3 | 16.2 | 23.8 |
| Median | 15.2 | 14.5 | 14.7 | 14.0 | 14.5 | 14.5 | 16.9 | 14.5 | 15.7 | 14.0 | 15.0 | 14.9 | 14.6 | 11.0 | 12.5 | 12.0 | 13.0 | 13.8 |
| Minimum | 5.0 | 4.9 | 4.0 | 3.4 | 3.8 | 4.8 | 7.7 | 7.9 | 7.6 | 4.5 | 4.3 | 4.8 | 5.0 | 3.3 | 2.5 | 3.6 | 3.3 | 3.0 |
| Maximum | 375.0 | 419.0 | 372.3 | 410.0 | 390.0 | 354.0 | 99.0 | 101.0 | 81.8 | 96.0 | 90.9 | 93.4 | 49.7 | 49.5 | 57.8 | 53.0 | 56.0 | 406.0 |
| Standard deviation | 51.1 | 50.6 | 41.6 | 48.2 | 48.6 | 46.8 | 12.1 | 11.9 | 9.6 | 10.6 | 9.9 | 9.7 | 10.4 | 9.7 | 10.8 | 11.0 | 11.2 | 59.0 |

| Ni Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|----------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|-------|-------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 107 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 61 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 24.7 | 23.7 | 24.3 | 23.2 | 23.2 | 23.7 | 27.6 | 24.3 | 25.7 | 23.8 | 25.0 | 24.8 | 24.3 | 19.9 | 21.9 | 20.6 | 21.2 | 20.3 |
| Median | 21.7 | 21.0 | 20.8 | 20.6 | 20.1 | 20.7 | 27.0 | 23.5 | 25.6 | 24.0 | 25.9 | 25.5 | 18.8 | 15.2 | 15.9 | 17.0 | 17.0 | 16.2 |
| Minimum | 10.4 | 10.0 | 10.4 | 10.0 | 11.0 | 11.8 | 12.0 | 8.5 | 9.1 | 9.0 | 8.2 | 9.8 | 3.1 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.0 | 3.3 |
| Maximum | 65.2 | 71.2 | 71.4 | 69.0 | 63.0 | 69.0 | 55.0 | 59.0 | 43.7 | 43.0 | 52.6 | 44.4 | 173.0 | 100.0 | 113.0 | 98.9 | 98.0 | 96.5 |
| Standard deviation | 10.1 | 9.6 | 10.3 | 9.6 | 9.4 | 9.4 | 10.4 | 9.6 | 8.2 | 8.1 | 8.7 | 7.4 | 29.8 | 19.5 | 20.9 | 18.6 | 18.8 | 17.8 |

| Pb Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|----------------------------------|--------------|------|-------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 14.2 | 13.5 | 15.4 | 13.3 | 13.6 | 13.8 | 19.6 | 16.9 | 18.5 | 17.4 | 18.4 | 17.6 | 45.0 | 26.7 | 29.7 | 32.7 | 37.8 | 31.3 |
| Median | 13.6 | 12.4 | 12.4 | 12.0 | 12.8 | 12.7 | 19.2 | 16.8 | 18.0 | 17.0 | 17.0 | 16.8 | 22.0 | 19.6 | 22.4 | 21.0 | 20.4 | 20.4 |
| Minimum | 7.5 | 7.9 | 7.5 | 6.7 | 8.0 | 6.8 | 11.0 | 10.6 | 9.8 | 8.3 | 9.1 | 9.3 | 13.2 | 11.8 | 11.7 | 12.2 | 13.2 | 13.2 |
| Maximum | 31.3 | 31.4 | 311.4 | 29.4 | 29.0 | 31.3 | 35.3 | 32.6 | 36.7 | 37.0 | 88.6 | 32.5 | 950.0 | 149.6 | 296.9 | 380.0 | 697.0 | 408.0 |
| Standard deviation | 4.3 | 4.2 | 26.0 | 4.5 | 4.1 | 4.7 | 5.2 | 4.1 | 4.9 | 4.6 | 9.2 | 4.3 | 138.2 | 26.5 | 41.5 | 54.9 | 100.7 | 57.9 |

| Zn Total VBBo [mg/kg] | Ackerflächen | | | | | | Naturwiesen | | | | | | Alpweiden | | | | | |
|----------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Zyklus | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | 133 | 138 | 135 | 127 | 122 | 115 | 69 | 64 | 67 | 75 | 80 | 87 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mean | 46.5 | 42.4 | 45.6 | 42.7 | 41.6 | 42.4 | 63.2 | 52.7 | 58.6 | 51.7 | 51.7 | 51.8 | 67.5 | 61.0 | 69.1 | 62.1 | 61.7 | 61.1 |
| Median | 41.9 | 38.9 | 42.2 | 38.0 | 38.0 | 40.1 | 59.1 | 51.0 | 56.7 | 49.8 | 50.1 | 50.1 | 63.3 | 50.8 | 60.9 | 54.0 | 55.0 | 53.2 |
| Minimum | 22.6 | 23.8 | 14.3 | 24.0 | 23.5 | 23.2 | 28.0 | 28.8 | 29.4 | 26.0 | 22.0 | 25.5 | 27.2 | 20.5 | 22.5 | 20.0 | 19.0 | 16.8 |
| Maximum | 114.0 | 107.8 | 142.5 | 250.0 | 100.0 | 100.7 | 141.0 | 114.0 | 112.0 | 100.0 | 110.0 | 105.0 | 156.0 | 143.0 | 168.8 | 190.0 | 170.0 | 232.0 |
| Standard deviation | 16.9 | 14.1 | 16.4 | 23.5 | 13.8 | 13.2 | 22.0 | 16.0 | 15.8 | 14.4 | 14.4 | 14.0 | 27.7 | 31.2 | 32.8 | 33.2 | 32.0 | 33.9 |

| P CO2 Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|-------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 8.6 | 7.8 | 16.1 | 8.2 | 8.2 | 5.7 | 10.9 | 6.9 | 6.3 | 135.3 | 96.2 | 92.3 |
| Median | 5.9 | 4.4 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 4.5 | 11.2 | 5.3 | 5.4 | 111.9 | 82.7 | 95.5 |
| Minimum | 1.7 | 2.4 | 2.8 | 2.9 | 2.9 | 1.5 | 3.5 | 3.1 | 2.5 | 30.4 | 29.8 | 7.7 |
| Maximum | 34.3 | 37.9 | 170.9 | 27.1 | 27.1 | 13.8 | 20.9 | 12.1 | 13.1 | 419.5 | 273.8 | 166.7 |
| Unteres Quartil | 4.4 | 3.5 | 3.9 | 3.0 | 3.0 | 3.4 | 6.1 | 4.8 | 4.2 | 80.3 | 69.7 | 78.3 |
| Oberes Quartil | 7.9 | 7.7 | 6.9 | 9.7 | 9.7 | 6.7 | 12.7 | 10.8 | 8.1 | 148.9 | 110.1 | 113.4 |
| Standardabweichung | 8.2 | 8.6 | 36.1 | 8.6 | 8.6 | 4.3 | 6.0 | 3.7 | 3.5 | 92.6 | 55.4 | 43.2 |

| P AAE10 Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|---------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 50.3 | 45.3 | 73.9 | 30.3 | 30.3 | 23.1 | 88.8 | 69.6 | 56.1 | 467.4 | 423.4 | 373.6 |
| Median | 21.1 | 17.9 | 16.5 | 17.1 | 17.1 | 13.0 | 70.8 | 43.9 | 45.5 | 425.2 | 401.8 | 329.0 |
| Minimum | 5.7 | 4.8 | 6.7 | 6.3 | 6.3 | 8.7 | 35.1 | 20.7 | 18.4 | 157.6 | 155.4 | 19.6 |
| Maximum | 296.4 | 287.4 | 679.5 | 118.8 | 118.8 | 72.6 | 215.7 | 183.3 | 149.7 | 1000.0 | 857.5 | 870.8 |
| Unteres Quartil | 11.9 | 12.0 | 11.5 | 14.7 | 14.7 | 9.3 | 36.7 | 32.4 | 26.1 | 247.3 | 220.3 | 200.1 |
| Oberes Quartil | 44.2 | 36.7 | 30.1 | 20.5 | 20.5 | 22.0 | 103.7 | 93.6 | 71.5 | 614.6 | 566.5 | 482.9 |
| Standardabweichung | 76.7 | 72.3 | 155.5 | 39.3 | 39.3 | 24.8 | 67.4 | 61.0 | 44.7 | 260.9 | 224.7 | 226.6 |

| Cd Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Median | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.2 |
| Minimum | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| Maximum | 0.7 | 0.6 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 0.5 | 0.4 |
| Unteres Quartil | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 |
| Oberes Quartil | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| Standardabweichung | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 |

| Co Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 5.9 | 5.6 | 5.8 | 5.4 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.1 | 5.0 |
| Median | 5.7 | 5.6 | 5.9 | 5.5 | 5.5 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.8 | 5.2 | 5.3 | 5.0 |
| Minimum | 4.2 | 4.1 | 4.1 | 4.2 | 4.2 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 3.7 | 3.1 | 3.5 | 3.2 |
| Maximum | 9.1 | 8.5 | 7.7 | 6.7 | 6.7 | 7.4 | 7.1 | 6.2 | 6.6 | 7.0 | 6.4 | 6.2 |
| Unteres Quartil | 5.2 | 4.8 | 5.3 | 4.2 | 4.2 | 4.4 | 4.7 | 4.5 | 4.7 | 5.1 | 4.5 | 4.4 |
| Oberes Quartil | 6.2 | 6.0 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 6.9 | 6.9 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 5.9 | 5.9 |
| Standardabweichung | 1.1 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.3 | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.9 |

| Cr Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 20.4 | 19.9 | 21.8 | 18.3 | 18.3 | 19.5 | 25.3 | 22.0 | 23.2 | 26.0 | 22.5 | 21.7 |
| Median | 21.0 | 19.0 | 20.9 | 20.0 | 20.0 | 19.2 | 23.5 | 22.0 | 23.1 | 27.0 | 24.0 | 21.9 |
| Minimum | 14.0 | 12.0 | 14.8 | 10.0 | 10.0 | 10.6 | 15.0 | 15.0 | 14.8 | 15.0 | 13.0 | 14.1 |
| Maximum | 37.0 | 40.1 | 35.3 | 24.0 | 24.0 | 26.8 | 35.0 | 28.0 | 30.7 | 39.0 | 36.0 | 30.7 |
| Unteres Quartil | 17.0 | 17.0 | 17.4 | 15.0 | 15.0 | 15.4 | 22.0 | 19.0 | 19.9 | 17.0 | 15.0 | 16.9 |
| Oberes Quartil | 23.0 | 22.0 | 24.4 | 22.0 | 22.0 | 25.0 | 33.0 | 26.0 | 26.9 | 33.0 | 29.0 | 25.0 |
| Standardabweichung | 5.0 | 5.6 | 5.6 | 5.1 | 5.1 | 6.5 | 7.4 | 4.7 | 5.8 | 8.6 | 7.3 | 5.5 |

| Cu Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 20.2 | 18.9 | 18.6 | 40.2 | 40.2 | 53.7 | 13.0 | 13.2 | 12.7 | 34.5 | 33.1 | 32.5 |
| Median | 16.0 | 16.3 | 16.4 | 17.0 | 17.0 | 17.2 | 12.0 | 11.3 | 14.4 | 32.0 | 33.0 | 30.2 |
| Minimum | 11.0 | 11.0 | 11.8 | 7.4 | 7.4 | 7.6 | 8.4 | 7.0 | 6.4 | 15.0 | 17.0 | 14.9 |
| Maximum | 68.0 | 49.0 | 50.1 | 190.0 | 190.0 | 242.0 | 19.0 | 20.0 | 18.3 | 76.0 | 66.0 | 72.9 |
| Unteres Quartil | 14.0 | 13.8 | 13.7 | 12.0 | 12.0 | 15.3 | 8.7 | 9.3 | 8.8 | 21.0 | 21.0 | 19.5 |
| Oberes Quartil | 19.0 | 20.0 | 18.6 | 21.0 | 21.0 | 21.9 | 18.0 | 20.0 | 15.9 | 44.0 | 38.0 | 38.6 |
| Standardabweichung | 12.7 | 8.9 | 8.5 | 66.2 | 66.2 | 92.4 | 4.7 | 5.6 | 4.6 | 16.9 | 13.1 | 16.8 |

| Ni Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 25.0 | 24.5 | 24.4 | 23.3 | 23.3 | 25.2 | 22.5 | 21.2 | 21.5 | 21.1 | 20.5 | 22.1 |
| Median | 25.0 | 24.0 | 23.8 | 20.0 | 20.0 | 21.9 | 22.0 | 20.5 | 19.2 | 21.0 | 20.0 | 23.1 |
| Minimum | 14.0 | 12.0 | 13.2 | 16.0 | 16.0 | 15.8 | 18.0 | 18.0 | 14.6 | 14.0 | 13.0 | 13.8 |
| Maximum | 47.0 | 48.4 | 40.7 | 34.0 | 34.0 | 38.7 | 28.0 | 26.0 | 30.8 | 31.0 | 30.0 | 30.0 |
| Unteres Quartil | 21.0 | 20.0 | 19.4 | 17.0 | 17.0 | 17.6 | 18.0 | 18.0 | 19.0 | 16.0 | 15.0 | 17.0 |
| Oberes Quartil | 28.0 | 26.5 | 27.8 | 28.0 | 28.0 | 33.2 | 27.0 | 24.0 | 24.0 | 25.0 | 25.0 | 26.1 |
| Standardabweichung | 7.4 | 7.9 | 6.9 | 6.8 | 6.8 | 9.9 | 4.7 | 3.4 | 5.3 | 5.6 | 5.3 | 5.6 |

| Pb Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 31.1 | 29.1 | 26.6 | 27.7 | 27.7 | 28.5 | 27.8 | 26.5 | 26.7 | 58.5 | 55.3 | 59.5 |
| Median | 23.0 | 22.0 | 20.7 | 24.0 | 24.0 | 23.7 | 18.5 | 18.5 | 20.7 | 37.0 | 39.0 | 30.1 |
| Minimum | 13.0 | 12.0 | 13.1 | 12.0 | 12.0 | 16.3 | 13.0 | 10.0 | 10.2 | 12.0 | 11.0 | 11.9 |
| Maximum | 93.0 | 130.0 | 66.9 | 60.0 | 60.0 | 57.8 | 70.0 | 68.0 | 66.4 | 180.0 | 190.0 | 231.0 |
| Unteres Quartil | 20.0 | 16.0 | 17.7 | 18.0 | 18.0 | 20.8 | 15.0 | 13.0 | 16.4 | 21.0 | 18.0 | 18.8 |
| Oberes Quartil | 37.0 | 36.0 | 35.3 | 29.0 | 29.0 | 28.4 | 32.0 | 31.0 | 28.4 | 79.0 | 92.0 | 94.1 |
| Standardabweichung | 21.3 | 24.1 | 14.1 | 15.3 | 15.3 | 15.0 | 21.7 | 21.6 | 19.0 | 54.4 | 49.8 | 63.1 |

| Zn Zyklus | Spielplätze | | | Grünanlagen | | | Dauerwiesen | | | Familiengärten | | |
|----------------------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Durchschnitt | 52.7 | 53.6 | 55.1 | 51.4 | 51.4 | 51.1 | 44.3 | 41.8 | 43.0 | 103.6 | 94.0 | 92.5 |
| Median | 47.0 | 48.0 | 48.1 | 56.0 | 56.0 | 54.5 | 41.0 | 36.5 | 42.3 | 82.0 | 86.0 | 73.8 |
| Minimum | 35.0 | 33.0 | 37.0 | 36.0 | 36.0 | 33.9 | 29.0 | 24.0 | 21.8 | 47.0 | 48.0 | 39.7 |
| Maximum | 110.0 | 110.0 | 92.1 | 60.0 | 60.0 | 62.4 | 67.0 | 66.0 | 64.2 | 230.0 | 180.0 | 206.0 |
| Unteres Quartil | 39.0 | 41.0 | 43.2 | 39.0 | 39.0 | 43.7 | 39.0 | 36.0 | 39.3 | 68.0 | 67.0 | 53.2 |
| Oberes Quartil | 60.0 | 61.7 | 63.6 | 58.0 | 58.0 | 59.5 | 49.0 | 52.0 | 47.2 | 140.0 | 120.0 | 107.1 |
| Standardabweichung | 17.4 | 19.3 | 16.5 | 9.7 | 9.7 | 11.4 | 12.8 | 14.8 | 12.9 | 56.3 | 41.8 | 54.3 |