

Interaktion von Böden und Quellgewässern

–

Eine Studie zur Regionalisierung der forstökologischen Verhältnisse in Vogesen und Schwarzwald

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Philosophie

der Philosophischen Fakultät III

der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Stefanie Heßler

aus Saarlouis

Saarbrücken, 2014

Der Dekan: Prof. Dr. Roland Brünken

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Jochen Kubiniok

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Olaf Kühne

Tag der Disputation: 24.01.2014

Danksagung

Nach fast fünf Jahren intensiver Arbeit ist meine Dissertation endlich fertig. Trotz unermüdlichen Einsatzes meinerseits wäre dies ohne die Hilfe und Unterstützung einiger Menschen nicht möglich gewesen.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Jochen Kubiniok ganz herzlich bedanken. Trotz vieler anderer Verpflichtungen hat er mich stets durch seine vielen Ideen und durch viele Diskussionen unterstützt und war zu jeder Zeit an den Ergebnissen meiner Arbeit interessiert. Zudem hatte er stets Verständnis für Verzögerungen, die aufgrund der Doppelbelastung durch das Referendariat und meine anschließende Anstellung in der Schule entstanden sind. Nicht zuletzt bin ich ihm sehr dankbar, dass er mir das Thema überlassen hat und mir so die Chance zur Forschung innerhalb dieses interessanten Arbeitsgebietes gegeben hat.

Im „Dschungel“ der Proben und Daten hätte ich mich ohne die Unterstützung meiner lieben Kollegen am Lehrstuhl der Physischen Geographie und Umweltforschung an der Universität des Saarlandes mit Sicherheit verlaufen. Bei der oft sehr zeitintensiven und anstrengenden Laborarbeit haben mich Irene Scheydt und Christa Schramm tatkräftig unterstützt. In besonderem Maße möchte ich mich bei Irene bedanken, die vor allem im Zuge der Tonmineralanalytik mehr als eine Überstunde eingelegt hat. Durch ihren unermüdlichen Einsatz und mit ihrer positiven Art hatte sie für jedes Problem eine Lösung parat und hat so dafür gesorgt, dass ich immer Licht am Ende des Labortunnels gesehen habe. Bei der Auswertung und Interpretation der Daten haben mich Gero, Uli, Bernhard und Marco maßgeblich unterstützt. Gero, Uli und Bernhard waren mir bei der Erstellung der Karten eine große Hilfe. Durch seinen unermüdlichen Einsatz hat es Bernhard in der Endphase der Kartenerstellung geschafft alle meine teilweise nicht einfachen Vorstellungen umzusetzen. Uli hatte auf meine nervenden Fragen bezüglich des Layouts immer eine Antwort und hat dankenswerter Weise die Endkorrektur der Arbeit übernommen. Zudem möchte ich mich insbesondere bei Uli für die zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen bedanken, die für meine Arbeit immer eine Bereicherung darstellten. Die wissenschaftlichen Hilfskräfte der Fakultät, insbesondere Sarah, Corinna, Christina und Evelyn haben mich bei allen anfallenden Arbeiten unterstützt und waren mir jederzeit eine zuverlässige Hilfe. Ein wichtiger Baustein zur Interpretation der Messergebnisse waren die Daten über Kalkungsmaßnahmen im Schwarzwald, die mir von der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt wurden. Herr Dr. Jürgen Schäffer hat die Kalkungsmaßnahmen mit großer Sorgfalt und Mühe zuverlässig zusammengestellt und somit einen wichtigen Beitrag zur angemessenen Interpretation der Daten geleistet.

In der Endphase der Erstellung der Arbeit hatte ich großes Glück meine Lehrerstelle am Albert-Einstein-Gymnasium anzutreten. Dort fühle ich mich sehr wohl und möchte mich bei den Kollegen und insbesondere bei dem Schulleiter Herrn OStD Wolfgang Pfaff und seiner

Stellvertreterin Frau StD' Michaela Brinkmann bedanken, dass sie mich in meinem Promotionsvorhaben stets unterstützt haben.

Ohne die Unterstützung meines privaten Umfeldes wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Meinem Nachbarn Dr. Hans Grüttemeier danke ich für die Korrektur des Skriptes.

Schließlich möchte ich meinen Eltern danken. Sie haben mir über all die Jahre durch ihre bedingungslose Unterstützung mein Studium ermöglicht und waren mir bei der Erstellung dieser Arbeit eine unersetzliche Hilfe. Mein Vater war mein Geländehelfer und hat alle witterungs- und reisetechischen Strapazen im Winter und im Sommer ertragen. Er hatte für jedes technische Problem eine Lösung und ich konnte mich immer hundertprozentig auf ihn verlassen. Nicht weniger wichtig war die Unterstützung meiner Mutter. Sie hat mich nicht nur stundenlang im Labor durch das Mörsern der Bodenproben unterstützt und mir während langen Arbeitstagen Gesellschaft geleistet, sie musste auch während der zwei Jahre dauernden Geländearbeit an fast jedem Wochenende auf mich und meinen Vater verzichten. Zudem hat sie mir zu Hause jede Art von Arbeit abgenommen, sodass ich die neben meinem Referendariat bleibende Zeit zur Erstellung meiner Dissertation nutzen konnte.

„Alles ist aus dem Wasser entsprungen!

Alles wird durch das Wasser erhalten!“

(Johann Wolfgang Goethe)

„Auch Quellen und Brunnen versiegen, wenn man zu viel aus ihnen schöpft.“

(Demosthenes, griechischer Redner)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Kartenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Ziele der Arbeit	3
2. Physisch-geographische Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes	4
2.1 Topographie und Abgrenzung.....	4
2.2 Geologie	5
2.3 Klima	11
2.4 Böden	13
2.5 Naturraum, Vegetation und Nutzung	15
3. Methodisches Vorgehen	18
3.1 Auswahl der Standorte	18
3.2 Beprobungszeitpunkte	21
3.3 Feldmethoden	21
3.3.1 Quellen	21
3.3.2 Niederschlag.....	21
3.3.3 Boden	24
3.4 Labor	24
3.4.1 Boden	24
3.4.2 Quellen und Niederschlag	26
3.5 Analysegenauigkeit der Untersuchungsmethode	27
3.6 Verwendete Geräte im Überblick.....	27
3.7 Bestimmungs- und Nachweisgrenzen	28
3.8 Auswertung der Daten.....	29
4. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	30
4.1 Allgemeine Feststellungen	30
4.1.1 Bedeutung der untersuchten Parameter für Pflanzen und Umwelt	30
4.1.2 Beobachtungen innerhalb der Bodenprofile.....	33
4.2 Einfluss des Reliefs in den Vogesen	36
4.2.1 Einfluss des Reliefs auf den Quellgewässerchemismus.....	36
4.2.2 Einfluss des Reliefs auf den Bodenchemismus.....	43
4.2.3 Zusammenfassende Betrachtung.....	57
4.3 Regionalisierung der Vogesenquellen und Vogesenböden.....	58
4.4 Einfluss der Geologie in den Vogesen	62

4.4.1 Einfluss der Geologie auf den Quellgewässerchemismus.....	62
4.4.2 Einfluss der Geologie auf den Bodenchemismus.....	67
4.4.3 Zusammenfassende Betrachtung.....	73
4.5 Einfluss der Kalkungsmaßnahmen im Schwarzwald.....	74
4.5.1 Wirkung von Kalkungsmaßnahmen.....	74
4.5.2 Durchgeführte Maßnahmen im Schwarzwald.....	76
4.5.3 Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen auf die Böden und Quellwässer.....	79
4.5.4 Notwendige Maßnahmen in den Vogesen.....	81
4.6 Niederschläge im Untersuchungsgebiet.....	82
4.6.1 Niederschlagsverteilung.....	82
4.6.2 Chemismus der Niederschläge.....	87
4.6.3 Elementfracht.....	88
4.7 Tonmineralanalyse in den Vogesenböden.....	90
4.7.1 Einfluss des Reliefs auf die Tonmineralgarnitur im Oberboden.....	90
4.7.2 Tonmineralgarnitur in den Bodentiefen.....	92
4.8 Versauerungsfront in den Vogesenböden.....	93
4.9 Gruppierung der Böden hinsichtlich des Versauerungsgrades.....	98
4.10 Al ³⁺ -und H ⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen.....	98
4.11 Zusammenhänge zwischen chemischen Parametern in beiden Umweltmedien.....	100
4.12 Zusammenhänge zwischen Boden- und Quellwerten.....	103
4.13 Bestimmung des Bodenzustand aufgrund des Quellchemismus.....	108
4.13.1 Molares Ca/Al-Verhältnis in den Quelle und im Boden.....	108
4.13.2 Molares Ca/Al-Verhältnis in der Quelle und Pufferbereich des Bodens.....	110
4.13.3 (Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +K ⁺ +Na ⁺)/Al ³⁺ -Quotient der Quelle und Basensättigung des Bodens.....	111
4.13.4 Zusammenfassende Betrachtung.....	112
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	113
6. Literaturverzeichnis.....	116
7. Deutsche Normen und Verordnungen.....	133
8. Karten.....	135
9. Internetlinks.....	136
10. Anhang.....	137
Abbildungsverzeichnis Anhang.....	138
Tabellenverzeichnis Anhang.....	139
Kartenverzeichnis Anhang.....	142
Abkürzungsverzeichnis Anhang.....	143

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bodenhorizonte und Grundwasser, schematisiert, verändert nach BUSCH & LUCKNER 1974, aus: HÖLTING & COLDEWEY 2009: 35.....	2
Abb. 2: Landschaftsgliederung des Schwarzwaldes, aus: GÜNTHER 2010: 7.	5
Abb. 3: Geologie Deutschlands, aus: LIEDTKE ET. AL. 2002.....	7
Abb. 4: Geologische Übersichtskarte des Grundgebirges im Schwarzwald, aus: HENNINGSEN 2006:21.	9
Abb. 5: Mittlere jährliche Windverteilung Jahreshäufigkeit (1951-1960) auf dem Feldberg im Schwarzwald (1486m NN), Daten: Deutscher Wetterdienst, aus: WEISCHET & ENDLICHER 2000:37.	12
Abb. 6: Typische relative Jahreshäufigkeit der Bodenwindrichtung über Süddeutschland in zwölfteiliger Richtungsskala nach 30°-Sektoren, Daten: Schäfer 1982, aus: HENDL 2002:21.	12
Abb. 7: Die Vegetationstypen unterschiedlicher Höhenzonen in den Vogesen (nach Office Nationale des Fôrets), aus: BÜRGER 2004:14.....	16
Abb. 8: Nutzungsaufteilung im Schwarzwald zu unterschiedlichen Zeiten; Quelle der Daten: BÜRGER 2004: 20, Diagramm: EIGENE DARSTELLUNG.	17
Abb. 9: Schema eines Glimmers mit einer nicht aufgeweiteten, einer randlich aufgeweiteten und einer durchgehend aufgeweiteten vermiculitischen oder smectitischen Schicht, aus: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:20.....	32
Abb. 10: H ⁺ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Bodentiefen am Beispiel von drei ausgewählten Vogesenstandorten.	33
Abb. 11: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Bodentiefen am Beispiel von drei ausgewählten Vogesenstandorten	34
Abb. 12: Schematische Darstellung der KAK _{eff} und des Kationenbelages (in% von KAK _{pot} .) eines schluffig-lehmigen Bodenhorizontes mit 2-3 % organischer Substanz (frei nach Schachtschabel), aus: STAHR ET AL. 2008:61.....	35
Abb. 13: Bildungs- und Umbildungspfade der Tonminerale (M = Metallkation), aus: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:21.	36
Abb. 14: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.....	37
Abb. 15: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.	38
Abb. 16: K ⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.....	39
Abb. 17: Na ⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.	40
Abb. 18: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.	40
Abb. 19: Mg ²⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.....	41
Abb. 20: Ionenkonzentrationen in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen (3.Beprobung).	42
Abb. 21: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.	44
Abb. 22: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	44

Abb. 23: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.....	46
Abb. 24: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	47
Abb. 25: K ⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.....	48
Abb. 26: K ⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	48
Abb. 27: Na ⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.....	49
Abb. 28: Na ⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	50
Abb. 29: Mg ²⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.....	50
Abb. 30: Mg ²⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	51
Abb. 31: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.....	52
Abb. 32: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.....	53
Abb. 33: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden der Vogesenwestseite.....	54
Abb. 34: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.....	54
Abb. 35: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden des Vogesenkammes.....	55
Abb. 36: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.....	55
Abb. 37: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden der Vogesenostseite.....	56
Abb. 38: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.....	56
Abb. 39: H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l), Ca ²⁺ -Ionenkonzentration (mg/l) und Mg ²⁺ - Ionenkonzentration (mg/l) in den Quellen der Granit- und Buntsandsteinstandorte der Vogesen.....	59
Abb. 40: H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l), Ca ²⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg) und Mg ²⁺ - Ionenkonzentration (meq/kg) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesen (MW 0-100cm).....	60
Abb. 41: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.....	64
Abb. 42: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.....	64
Abb. 43: Na ⁺ - und K ⁺ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.....	65
Abb. 44: Ca ²⁺ - und Mg ²⁺ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.....	66
Abb. 45: H ⁺ - Ionenkonzentrationen der Bodentiefen in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.....	68
Abb. 46: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.....	68
Abb. 47: Na ⁺ - und K ⁺ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.....	69
Abb. 48: Ca ²⁺ - und Mg ²⁺ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.....	69
Abb. 49: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.....	71
Abb. 50: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.....	71

Abb. 51: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.....	72
Abb. 52: Kalkung in den verschiedenen Lagen, Datengrundlage: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.	77
Abb. 53: Mittelwert der Jahresniederschlagssumme in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	86
Abb. 54: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Niederschlagsproben der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	87
Abb. 55: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Regenproben in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	88
Abb. 56: H ⁺ -Ionen- und Al ³⁺ -Ionenfracht in den Niederschlägen in Abhängigkeit vom Relief.	89
Abb. 57: H ⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen und H ⁺ -Ionenfracht in den Niederschlägen in Abhängigkeit vom Relief.	90
Abb. 58: Tonmineralgarnitur in den verschiedenen Vogesenlagen.	91
Abb. 59: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden der Vogesenwestseite.	94
Abb. 60: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.	95
Abb. 61: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden des Vogesenkammes.	95
Abb. 62: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.	96
Abb. 63: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden der Vogesenostseite.	96
Abb. 64: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.	97
Abb. 65: Vergleich der H ⁺ - Ionenkonzentration und der Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.	99
Abb. 66: Vergleich der H ⁺ - Ionenkonzentration und der Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Schwarzwaldlagen.	100
Abb. 67: H ⁺ - Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.	103
Abb. 68: H ⁺ - Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.	104
Abb. 69: Ca ²⁺ - Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.	104
Abb. 70: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.	105
Abb. 71: Al ³⁺ - Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.	105
Abb. 72: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.	106
Abb. 73: Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Quellen und den Böden im Schwarzwald.	106
Abb. 74: Häufigkeitsdiagramm Pufferbereiche Böden und Ca/Al-Quotient der Quelle.	110

Abb. 75: Häufigkeitsdiagramm Basensättigung Böden und $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -
Quotient der Quelle..... 111

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vorherrschende Bodentypen in den Vogesen.....	13
Tab. 2: Vorherrschende Bodentypen im Schwarzwald.....	15
Tab. 3: Anzahl der beprobten Quellen in den verschiedenen Gebirgslagen.....	18
Tab. 4: Zuteilung der Monate und Beprobungen zu den verschiedenen Jahreszeiten.....	21
Tab. 5: Messwerte mit und ohne Anreicherung in den Vogesen- und Schwarzwaldquellen (Bsp. 1. Beprobung).....	27
Tab. 6: Anreicherungskonzentrationen.....	27
Tab. 7: Verwendete Geräte bei der Laboranalytik.....	27
Tab. 8: Bestimmungs- und Nachweisgrenze für die Elemente Aluminium, Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium, Ausrechnung nach FUNK ET AL. 1985.....	28
Tab. 9: Abstufungen der Korrelationskoeffizienten zur verbalen Beschreibung, nach: BÜHL 2008.....	29
Tab. 10: Einteilung und Eigenschaften der wichtigsten Tonminerale, nach: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:15.....	32
Tab. 11: Mittelwerte (mg/l bzw. $\mu\text{mol/l}$) und Standardabweichungen der Elementkonzentrationen und der H^+ -Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.....	41
Tab. 12: Ionenkonzentrationen in den Vogesenquellen (MW der verschiedenen Lagen) innerhalb der 3. Beprobung.....	42
Tab. 13: H^+ -Ionenkonzentration ($\mu\text{mol/l}$) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	44
Tab. 14: Al^{3+} -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	45
Tab. 15: Al^{3+} -Ionenkonzentration (meq/kg) in den Bodentiefen der verschiedenen Standorte an der Vogesenwestseite.....	45
Tab. 16: K^+ -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	48
Tab. 17: Na^+ -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	49
Tab. 18: Mg^{2+} -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	51
Tab. 19: Mg^{2+} -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.....	52
Tab. 20: Anteil der Basen und Säuren (%) im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe in den Vogesenlagen.....	57
Tab. 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der Elementmengen in den Quellen der Vogesenostseite und des Vogesenkammes.....	57

Tab. 22: Anteil der Basen und Säuren (%) im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe in den Böden der Vogesenostseite und des Vogesenkammes.	58
Tab. 23: pH-Werte in den verschiedenen Pufferbereichen; verändert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010, ULRICH 1981 ¹	61
Tab. 24: Anzahl der Böden in den verschiedenen Pufferbereichen je nach Vogesenlage.	61
Tab. 25: Mittelwerte der Quotienten in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.	61
Tab. 26: Anzahl der Messwerte.....	66
Tab. 27: Standardabweichungen.	66
Tab. 28: Mittelwerte der H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l) und der Elementmengenkonzentration (mg/l) in den Granit- und Buntsandsteinquellen der Vogesenlagen.	67
Tab. 29: Mittelwerte der H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l) und der Elementmengenkonzentration (meq/kg) in den Granit- und Buntsandsteinböden (MW der Bodentiefen) der Vogesenlagen.	70
Tab. 30: Anzahl der Messwerte.....	70
Tab. 31: Standardabweichungen.	70
Tab. 32: Anteil der Mg ²⁺ -Ionen (%) an der KAK in den Oberböden der Granit- und Buntsandsteinböden der verschiedenen Vogesenlagen.	72
Tab. 33: Kriterien für die Kalkungsbedürftigkeit von Waldböden, angelehnt an ELLING ET AL. 2013: 344.....	75
Tab. 34: Kalkungsmenge in den verschiedenen Schwarzwaldlagen, Daten: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.	76
Tab. 35: Kalkungsarten im Schwarzwald, Daten: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.....	77
Tab. 36: Mittlere H ⁺ -Ionenkonzentration in den Granitböden der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen in 0-20 cm und 80-100 cm Bodentiefe.	79
Tab. 37: Basensättigung in den Vogesen- und Schwarzwaldböden (Mittelwert aus den Werten der verschiedenen Lagen).	79
Tab. 38: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration in den Vogesen- und Schwarzwaldböden (Mittelwert aus den Werten der verschiedenen Lagen).....	80
Tab. 39: Mittlere H ⁺ -Ionenkonzentration der Quellen in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	80
Tab. 40: Mittlere Ca ²⁺ -Ionenkonzentration aus den Mittelwerten der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	80
Tab. 41: Einschätzung der Kalkungsbedürftigkeit anhand ausgewählter Kriterien.	81
Tab. 42: Mittelwerte der Jahresniederschlagssumme in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen, Datengrundlage: METEOFRACTANCE UND DEUTSCHER WETTERDIENST.	87
Tab. 43: Elementfrachten in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.	89

Tab. 44: Kategorisierung bzw. Verbalisierung des Mengenverhältnisses der Dreischicht- zu den Zweischichttonmineralen.	91
Tab. 45: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale im Oberboden (0-20cm Bodentiefe) und im Unterboden (80-100cm Bodentiefe).	92
Tab. 46: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale und der Al^{3+} -Ionen an der KAK_{eff} in ausgewählten Bodenproben im Oberboden (0-20cm Bodentiefe) und im Unterboden (80-100cm Bodentiefe).	93
Tab. 47: Tiefe der Versauerungsfront in den Böden der verschiedenen Gebirgslagen.	97
Tab. 48: Anteil der Basen an der KAK_{eff} in den Böden der verschiedenen Pufferbereiche in den Vogesen und im Schwarzwald (MW 0-100 cm).	98
Tab. 49: Korrelation zwischen dem Ca/Al-Quotient der Quelle und des Bodens bei Standorten mit unterschiedlicher Standardabweichung der Ca^{2+} -Ionenkonzentration.	109
Tab. 50: Klassifizierung des molaren Ca/Al-Verhältnisses in der Bodenlösung als Kriterium für die Elastizität bezüglich der toxischen Wirkung von Aluminium, angelehnt an: MEIWES ET AL. 1984:47.	109
Tab. 51: Mittelwerte der Ca-Al-Quotienten der Quellen und Böden in Abhängigkeit vom Relief.	110
Tab. 52: Beurteilung der Basensättigung; in Anlehnung an: WOLFF & RIECK 1996.	112

Kartenverzeichnis

Karte 1: Lage der beprobten Quellen in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	19
Karte 2: Lage der beprobten Quellen im Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	20
Karte 3: Niederschlagsmesspunkte in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	22
Karte 4: Niederschlagsmesspunkte im Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	23
Karte 5: Lage der Vogesen- und Schwarzwaldquellen auf den verschiedenen geologischen Untergründen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.	63
Karte 6: Für die Schwarzwaldquellen relevante Kalkungsgebiete, Datengrundlage: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	78
Karte 7: Niederschlagsverteilung in den Vogesen, ENTWURF: ULRICH HONECKER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	84
Karte 8: Niederschlagsverteilung im Schwarzwald, ENTWURF: ULRICH HONECKER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	85

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
meq	Milliäquivalent
meq/kg	Milliäquivalent pro Kilogramm Boden
mg/l	Milligramm pro Liter
µmol/l	Micromol pro Liter
Vog_WS	Vogesenwestseite
Vog_K	Vogesenkamm
Vog_OS	Vogesenostseite
Schw_WS	Schwarzwaldkamm
Schw_K	Schwarzwaldkamm
Schw_OS	Schwarzwaldostseite
o.A.	ohne Anreicherung
m.A.	mit Anreicherung
s	Standardabweichung
MW	Mittelwert
WS_GR	Westseite Granit
K_GR	Kamm Granit
OS_GR	Ostseite Granit
WS_BS	Westseite Buntsandstein
K_BS	Kamm Buntsandstein
OS_BS	Ostseite Buntsandstein
OB	Oberboden
UB	Unterboden
BT	Bodentiefe
dt	Dezitonnen
Pr.Nr._BT	Probennummer_Bodentiefe

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Quellen sind von grundlegender Bedeutung für die Trinkwasserversorgung und für die Qualität des Oberflächenwassers von Flüssen und Seen. Darüber hinaus erlaubt die Wasserqualität Rückschlüsse auf die geoökologischen Verhältnisse des Quelleinzugsgebietes. Aufgrund anthropogen verursachter Verunreinigungen entsprechen nur noch wenige Oberflächenquellen den Güteeigenschaften, die die Gesellschaft an das Trinkwasser stellt. So muss dieses „so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit insbesondere durch Krankheitserreger nicht zu besorgen ist.“ (TRINKWASSERVERORDNUNG 2001). Um dies zu gewährleisten wurden in der Trinkwasserverordnung Grenzwerte für chemische Stoffe festgelegt, die in einer höheren Konzentration die menschliche Gesundheit beeinträchtigen können. So liegt der Grenzwert für Aluminium, das vor allem unter sauren pH-Bedingungen bei forstlicher Nutzung mobilisiert werden kann, bei 0,2 mg/l (TRINKWASSERVERORDNUNG 2001). Bereits bei geringeren Konzentrationen wirkt dieses Element toxisch auf aquatische Lebensgemeinschaften. Untersuchungen im Saarland und den angrenzenden Gebieten weisen Aluminiumkonzentrationen von z.T. mehreren mg/l nach (FELTES 2001). Auch aus anderen mitteleuropäischen Gebieten wird über dieses Problem berichtet (vgl. u.a. TEUFEL & BAUER 2004, ZECH 1990, MATSCHULLAT ET AL. 1994, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1991, WESTERMANN 2000, DAVEZAC ET AL. 2008, CHAMBRE D'AGRICULTURE 2011, BAUDOIN 2007, TIXIER 2005, THIEBAUT 1997, GUEROLD 1992, GUEROLD ET AL. 2000, MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1989, BRECHTEL 1989).

Derartig belastetes Wasser kann für Trinkwasserzwecke kostenintensiv aufbereitet und gereinigt werden (HEINZ 1984; FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSINSTITUT FÜR DIE INDUSTRIE- UND SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT SOWIE ABFALLWIRTSCHAFT 1990); aber die Trinkwasseraufbereitung wird hierdurch zu einem Kostenfaktor für die Kommunen und Länder. Kleine, quellengestützte Trinkwasserversorgungen der Mittelgebirge mussten vielfach aufgegeben werden, da die erforderlichen Aufbereitungstechniken ökonomisch nicht zu vertreten waren (BEISECKER & EWERS 2012).

Die Trinkwassergewinnung unter Waldstandorten ist eng mit den geoökologischen Prozessen der Bodenversauerung durch anthropogene Stoffeinträge und forstliche Nutzungen verbunden. Die Quellwässer in vielen Räumen Mitteleuropas, vor allem innerhalb der Mittelgebirge gelten als versauert (vergl. u.a. LETHMATE 2011, DAMBRINE ET AL. 1999, HESS & HÄRTLING 2000, MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1989).

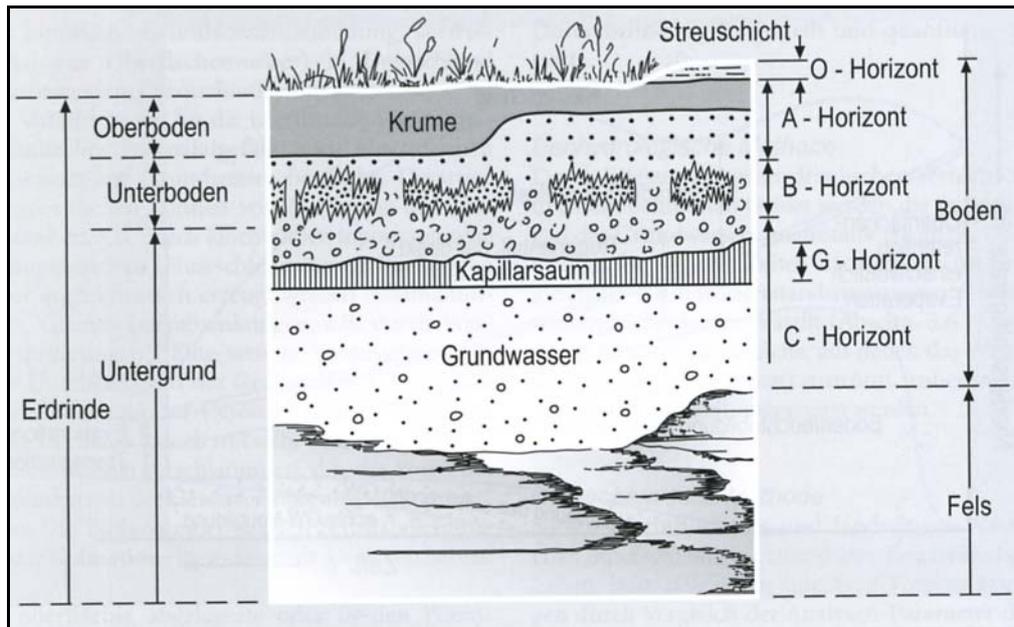


Abb. 1: Bodenhorizonte und Grundwasser, schematisiert, verändert nach BUSCH & LUCKNER 1974, aus: HÖLTING & COLDEWEY 2009: 35..

Die Bodenpassage des Niederschlagswassers hat einen grundlegenden Einfluss auf die Quellwasserqualität (vergl. Abb. 1). Insbesondere die zunehmende Versauerung der Waldböden führt zu einer erhöhten Mobilisierung von Al^{3+} -Ionen und deren Eintrag ins Grundwasser bei gleichzeitiger Schädigung der Feinwurzeln der Vegetation (vergl. u.a. ULRICH 1986; IMMER ET AL. 1993; SCHWINN 1992; WOCHLE 2010; HÖLTING & COLDEWEY 2009:31-36; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:2-6). Innerhalb dieser Untersuchungen wurde eine Entbasung der Böden im Oberboden und in tieferen Bodenhorizonten nachgewiesen. Dies hat zur Folge, dass „eine akute Gefährdung für die Qualität des Grundwassers besteht, da Säureinträge nicht oder kaum mehr im Boden gepuffert werden“. (FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG 2000:4). Die Kenntnis der chemischen Bodeneigenschaften ist daher grundlegende Voraussetzung zum Verständnis der forstökologischen Situation.

In der vorliegenden Arbeit wird an zwei regionalen Beispielen aus Frankreich und Deutschland das Ausmaß der Belastung von Quellen und Böden mit dem Ziel analysiert, eine zukünftige Regionalisierung des Bodenzustandes über Messungen an Oberflächenquellen vornehmen zu können. Hierdurch könnte der Untersuchungsaufwand gegenüber herkömmlichen Verfahren – wie in der aktuellen Forschung bei der europaweit durchgeführten Bodenzustandserhebung eingesetzt (vergl. z.B. MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2012) - deutlich reduziert werden.

1.2 Ziele der Arbeit

Aufgrund der in Kapitel 1.1 skizzierten Problemstellung und den noch offenen Forschungsfragen ergeben sich für die folgende Arbeit mehrere übergeordnete Untersuchungsziele.

Ein Ziel ist es mit Hilfe von selbst erhobenen Daten in Vogesen und Schwarzwald eine Regionalisierung und Klassifizierung der Quellgewässer aufgrund ihres Versauerungszustandes vorzunehmen. Dabei soll die Frage geklärt werden, welche Rolle das Relief und die Geologie spielen. Da sich aufgrund des topographischen Aufbaus des Untersuchungsgebietes vermuten lässt, dass diese beiden Faktoren einen Einfluss auf die regionale Verteilung des Versauerungsgrades der Quellen und Böden haben, soll geklärt werden, ob eventuell nachweisbare Unterschiede signifikant sind oder nicht.

Des Weiteren wird der Frage nachgegangen in welcher Form die Niederschlagsmengen, aber auch die chemische Zusammensetzung der Niederschläge den Quellgewässer- und Bodenzustand beeinflussen.

Ein weiteres Untersuchungsziel besteht darin mit Hilfe der erhobenen Daten zu klären, ob die Versauerungsfront in den Böden den Einfluss des Reliefs und der Geologie aufzeigt und ob diese Information in die Regionalisierung und Quantifizierung des Versauerungszustandes der Böden eingebunden werden kann.

Auffallend ist, dass in den bisherigen Forschungsarbeiten die Herstellung und Quantifizierung eines Zusammenhangs zwischen den beiden Untersuchungsmedien Quelle und Boden fehlt. Daher stellt sich die Frage, ob es gelingt, den zu erwartenden Zusammenhang zwischen Quell- und Bodenwerten statistisch nachzuweisen und zu quantifizieren. Zudem soll in einem weiteren Schritt ein Parameter entwickelt werden, aufgrund dessen aus den erhobenen Quellwerten auf den Bodenzustand im Quellgebiet geschlossen werden kann.

Da vergleichende Forschungsarbeiten in beiden Gebieten fehlen, ist ein Untersuchungsziel die Frage zu klären, ob zwischen den Ergebnissen der chemischen Analyse der Quellwässer und der Böden in Vogesen und Schwarzwald Parallelen aufgezeigt und quantifiziert werden können.

Außerdem soll die Frage geklärt werden, ob die Tonmineralgarnitur der Bodenstandorte den signifikanten Einfluss des Reliefs und der Geologie aufzeigt und ob diese in den verschiedenen Bodentiefen unterschiedlich ausgeprägt ist.

Da im Schwarzwald Kalkungsmaßnahmen durchgeführt werden, in den Vogesen jedoch nicht, drängt sich die Frage auf, ob die Auswirkungen der Maßnahmen im Schwarzwald nachgewiesen werden können und ob aufgrund der Messungen die Aussage getroffen werden kann, dass Kalkungsmaßnahmen auch in den Vogesen notwendig wären.

2. Physisch-geographische Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes

2.1 Topographie und Abgrenzung

Die Vogesen erstrecken sich im Norden von Sarrebourg und Saverne bis nach Belfort im Süden. Im Westen beginnen sie bei Epinal und Remiremont und reichen bis nach Colmar und Guebviller im Osten. Sie haben eine Länge von 120 km und eine Breite von 55 km (HARMAND & DESHAIES 2010:207). Zahlreiche Flüsse entspringen innerhalb des Gebirgszuges, von denen die Mosel, die Saar und die Meurthe die Bekanntesten sind. Die höchsten Erhebungen sind der Grand Ballon mit 1424 Meter, der Hohneck mit 1362 Meter und der Ballon D'Alsace mit 1247 Meter. Im Süden bilden die Burgundische Pforte und der Sundgau die markante Südschwelle, während die Zaberner Senke den Gebirgszug im Norden vom Pfälzer Wald abgrenzt. In den Vogesen befinden sich zwei Naturparks, der Parc des Vosges du Nord und der Parc des Ballons des Vosges.

Der Schwarzwald ist als rechtsrheinischer Teil des Oberrheinischen Gebirgsmassives eine nach Nordosten einfallende, gehobene Pultscholle (GÜNTHER 2010: 5). Man unterteilt ihn in Nord-, Mittel- und Südschwarzwald (vergl. Abb. 2). Die Grenze zwischen Nord- und Mittelschwarzwald verläuft auf der Linie Freudenstadt, Kniebis, Schliffkopf und Sohlberg. Die wichtigsten Flüsse sind Alb, Murg, Acher, Enz und Nagold. Geologisch befindet sich in diesem Gebiet der Buntsandstein als mesozoische Deckschicht. Der Mittelschwarzwald erreicht im Süden zur Grenze des Südschwarzwalde seine höchsten Erhebungen (Kandel: 1242 m). Weiter südlich liegt der Südschwarzwald, mit den vier Erhebungen Schauinsland (1284 m), Feldberg (1492 m), Belchen (1414 m) und Blauen (1165 m) (GÜNTHER 2010:8). Man spricht bei diesem Gebiet auch vom Hochschwarzwald, der während der Riss- und Würmeiszeit durch die Gletscher geformt wurde. Die Wasserscheide zwischen Rhein und Neckar/Donau verläuft auf der Linie Feldberg, Kesselberg, Dornhahn, Besenfeld und Dobel. Die längsten Flüsse, die im Schwarzwald entspringen sind die Enz, die Kinzig und die Elz. Im Schwarzwald wurden zwei Naturschutzparks eingerichtet: der 1999 gegründete Naturpark Schwarzwald Süd mit 333.000 ha und der 2000 gegründete Park Schwarzwald Mitte-Nord mit 370.000 ha. „Sie bilden zusammen das größte Landschaftsschutzgebiet Deutschlands“ (GÜNTHER 2010:8).

Flächenmäßig ist der Schwarzwald mit 6100 km² etwas kleiner als die Vogesen (6900 km²) (EGGERS 1964:18). Die Längserstreckung des Schwarzwalde ist allerdings mit 155 km größer als die der Vogesen, die von Nord nach Süd eine Länge von 120 km erreichen.

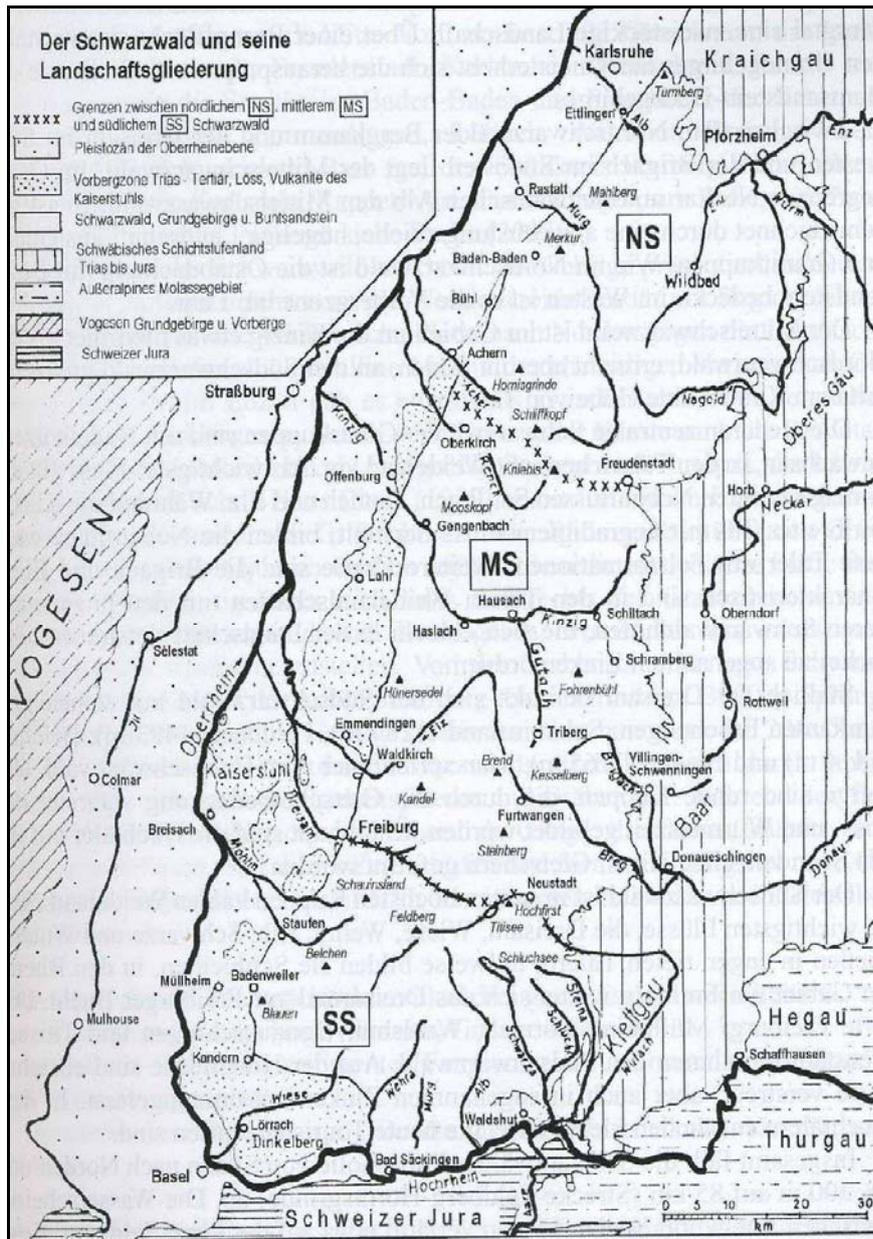


Abb. 2: Landschaftsgliederung des Schwarzwaldes, aus: GÜNTHER 2010: 7.

2.2 Geologie

Die Vogesen bilden mit dem Schwarzwald eine Einheit des variszischen Gebirges, die durch den Oberrheingraben getrennt ist (MAAS & SCHNEIDER 1995:139). Vor 240 Millionen Jahren waren die Vogesen, der Pfälzerwald und der Schwarzwald eine zusammenhängende Landmasse. Sie erhielten während der variszischen Gebirgsbildung ihre tektonische Struktur, bevor in der Permzeit eine Einebnung des Gebirges erfolgte und der zur Rumpffläche abgetragene Rheinische Schild mit Sedimenten des Mesozoikums überdeckt wurde. Bis zum oberen Eozän herrschten in diesem Gebiet festländische Verhältnisse (HARMAND & DESHAIES 2010:201).

Aufgrund ihrer Geologie lassen sich die Vogesen in drei Teile gliedern: In die Nordvogesen, die Mittelvogesen und die Südvogesen. Die Nordvogesen kann man wiederum in einen nördlicher, vorwiegend aus Buntsandstein aufgebauten Bereich (Buntsandsteinvogesen) und einen südlicher gelegenen Bereich aus kristallinen Gesteinen unterteilen. Die kristallinen Nordvogesen sind aus kambrischen und ordovizischen Schieferen aufgebaut. Außerdem findet man dort Sedimente, Pyroklastite und Vulkanite des Mitteldevons bis Unterkarbon (STAPF 1995:114).

Das Deckgebirge der Buntsandsteinvogesen entspricht einer mächtigen Ablagerung von klastischen Sedimenten aus dem Perm und der Unteren Trias. Die Gesteine des Buntsandsteins haben sich bis weit in den Norden und in die Pfalz ausgebreitet. Sie wurden als Erosionsprodukte eines Hochlandes gebildet, das im Raum des Pariser Beckens lag. Zur Zeit des unteren und mittleren Buntsandsteins erfolgte die Ablagerung der Sedimente durch viele Flüsse auf einer flachen Schwemmlandebene. In der Folgezeit führte die fortschreitende Transgression des Muschelkalkmeeres zur Bildung einer Deltalandschaft. Als das Einsinken des germanischen Trias-Beckens nicht mehr durch die Sedimentation ausgeglichen werden konnte, überflutete das Muschelkalkmeer die Nordvogesen (GALL ET AL. 1995:159).

Die mittleren Vogesen sind charakterisiert durch kristalline Gesteine (vergl. Abb. 3). Es lassen sich drei Gesteinsformationen mit unterschiedlicher Entstehung und Zusammensetzung unterscheiden: die Kayserberger Migmatite, der Kammgranit und die Granulite vom Col de Bagenelles. Die Migmatite von Kayserberg bilden im östlichen Teil der mittleren Vogesen eine ausgedehnte Serie. Eine thermische Metamorphose unter erhöhtem Druck führte dazu, dass die Schiefer und Grauwacken in den Bereich partieller Aufschmelzung gerieten und aus ihnen die Magmatite von Kayserberg entstanden (FLUCK 1995:133). Ein weiteres Phänomen der Vogesengeologie ist der Kammgranit (Granite des Crêtes). Seine mineralogische Zusammensetzung und seine Genese stellen ihn unter den Graniten heraus. Diese Herausstellung wird durch Fließstrukturen, Quarzgänge, Kristallwachstum in der granitischen Matrix, magmatische Schichtung und ehemals hochviskose Lagen begründet (FLUCK 1995:134). Die Granulite vom Col des Bagenelles bilden als südwestlicher Zipfel den Abschluss der Gneis-Serie von St.Marie-aux-Mines. Sie sind im Gegensatz zum Kammgranit unter sehr trockenen Bedingungen und somit unter niedrigem Wasser-Partialdruck entstanden. Ihr Erscheinungsbild ist sehr vielfältig: rosa- helle granat- und sillimanitführende Granulite, weiße granatführende Granulite („Weißstein“) und dunkle granat- und pyroxenführende Granulite. Charakteristisch ist, dass Amphibole und Glimmer fast vollständig fehlen. Die hellen granatführenden Granulite mit geplätteten Quarzen, die Weißsteine, sind besonders typisch, da sie die Bedingungen widerspiegeln (FLUCK 1995:134).

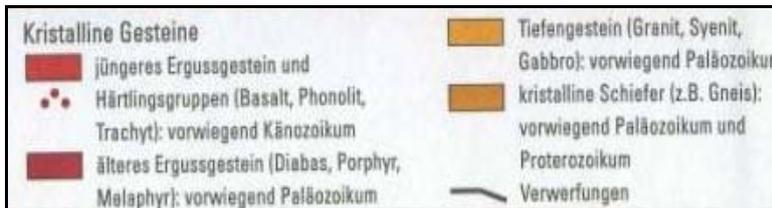
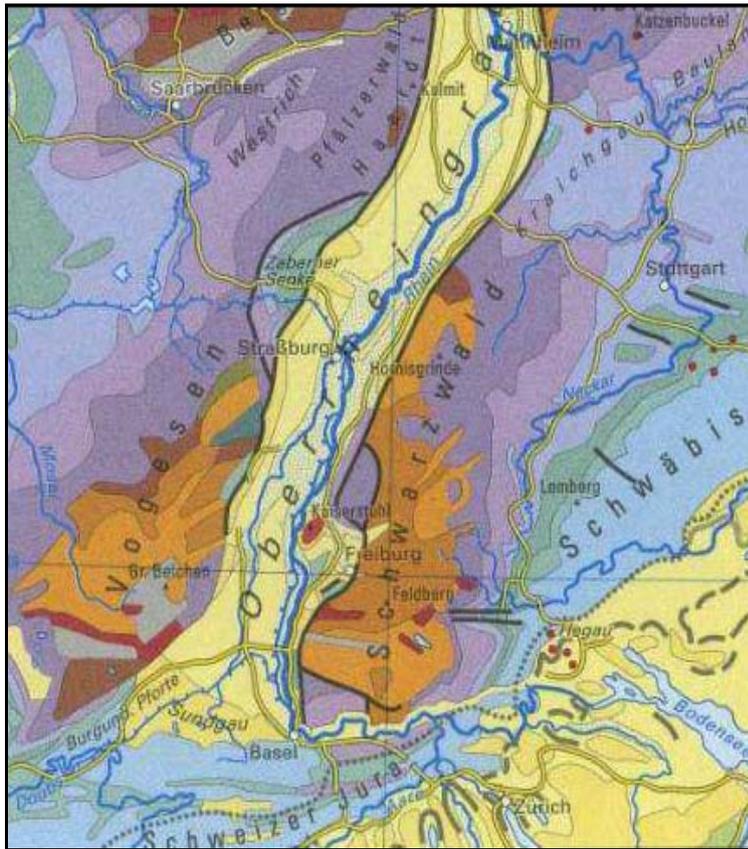


Abb. 3: Geologie Deutschlands, aus: LIEDTKE ET. AL. 2002.

Die Gesteine der Südvogesen sind Granite und Gneise, da die Sedimentgesteinsdecken bereits abgetragen sind und das Grundgebirge zutage getreten ist (vergl. Abb. 3). Am Vogesenkamm lässt sich dies mit der stärkeren Heraushebung und somit auch stärker einsetzende Verwitterung erklären.

Die Tektonik der Vogesen weicht von der anderer variszischer Gebirge insofern ab, dass das typische einheitliche variszische Streichen nicht nachweisbar ist. Die Schichten verlaufen in einzelnen Bereichen N-S, NE, NW oder biegen von N-S auf E-W ab (MAAS & SCHNEIDER 1995:143). Es sind außerdem zahlreiche Kleinfalten zu finden. Im Süden bei Belfort lässt sich eine Schieferung nachweisen, die zu Knick-Falten mit sehr steilen Achsen deformiert ist. Somit sind die Richtungsänderungen der Schichten nicht mit Erscheinungen des Streichens zu

erklären, sondern gehen auf Verstellungen bereits gefalteter Schichten um steile Drehachsen zurück (MAAS & SCHNEIDER 1995:143).

Die letzte Eiszeit (sie endete vor etwa 10.000 Jahren) hat die Oberflächenformen der Vogesen geprägt. Die südlichen Vogesen waren von einer mächtigen Eisdecke bedeckt. Die Gletscherbildung wurde durch die Höhenverhältnisse beeinflusst, sodass die Eiskappen und Eisströme das Relief in seinen wesentlichen Zügen formen konnten (HARMAND & DESHAIES 2010:214, FLAGEOLLET 2002). Die Eiskappen und Eisströme formten das Relief in seinen wesentlichen Zügen. Das im Tertiär ausgebildete Flussnetz wurde glazialmorphologisch überformt und es entstanden steilwandige U-Täler, Moränen, Kare und rundgeschliffene Gipfel. Außerdem haben sich die bis heute erhaltenen Karseen, wie der Lac Blanc oder der Lac des Perches oder Moränenstauseen, wie der Lac de Geradmer herausgebildet. Man kann drei Vergletscherungen, die als alte, mittlere und neuere Kaltzeit bezeichnet werden, unterscheiden. Welchen Eiszeiten diese drei Vergletscherungen zuzuordnen sind, ist in der Forschung umstritten: nach SERET ET AL. (1990) entsprechen diese der Riss-, sowie der unteren und oberen Würmkaltzeit, während sie nach FLAGEOLLET (1988) der Mindel-, Riss- und Würmeiszeit zuzuordnen sind (HARMAND & DESHAIES 2010:214). Daran wird deutlich, dass die Zuordnung und Deutung der Vergletscherungen bzw. der Vergletscherungsspuren oft schwierig ist (vergl. auch WENZENS 1987). Die Vogesentäler auf der lothringischen Seite waren von bis zu 40 km langen Talgletschern ausgefüllt (HARMAND & DESHAIES 2010:214). Am Kamm hingegen fand man wegen der Zertalung und der geringen Ausdehnung von Flächen nur kleinere Kargletscher vor. Diese entstanden durch den Schnee, der durch den Westwind über die Kammlinie geblasen wurde und sich im Lee in Karmulden abgelagert hat. In den Nordvogesen konnten sich hingegen aufgrund der geringeren Höhenlage nur kleinere Kargletscher herausbilden.

Der Schwarzwald kann nach der Verbreitung der Gesteine in zwei Bereiche untergliedert werden: in den am höchsten herausgehobenen Teil mit dem zu Tage tretenden kristallinen Grundgebirge und die Nord- und Ostabdachung mit dem noch erhaltenen Deckgebirge (GEYER & GWINNER 1964:125). Neben diesen Hauptformationen sind noch die permischen Rotliegendensedimente (Fanglomerate, Arkosen) und Vulkanite (Rhyolithe, Ignimbrite) zu nennen (GÜNTHER 2010:9). Das kristalline Grundgebirge besteht vor allem aus Graniten und Gneisen, während als Schichtgestein besonders der Buntsandstein noch erhalten ist. In beiden Bereichen entwickelte sich die Landschaft unterschiedlich. Im kristallinen Grundgebirge findet man auf den Höhen vor allem sanfte Geländeformen, da die Gneise und Granite vergleichsweise homogen beschaffen sind. Der Buntsandsteinschwarzwald hingegen ist durch die Ausbildung von Schichtstufen gekennzeichnet und bildet ein erstes Stockwerk im schwäbisch-fränkischen Schichtstufenland (GEYER & GWINNER 1964:125).

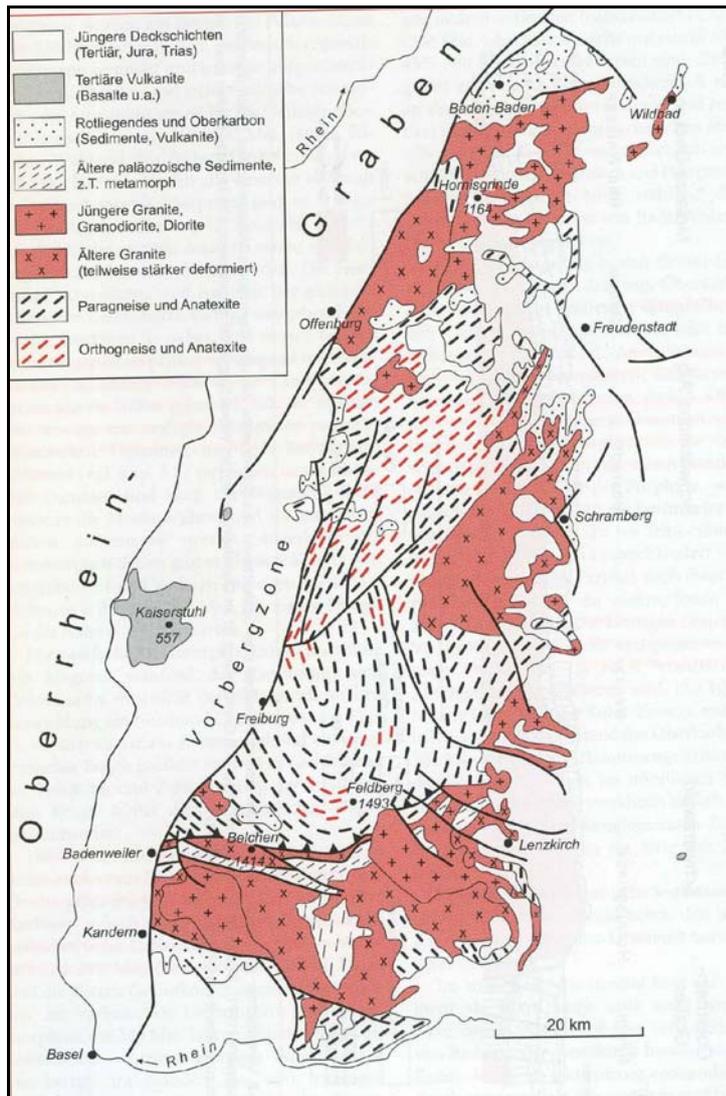


Abb. 4: Geologische Übersichtskarte des Grundgebirges im Schwarzwald, aus: HENNINGSSEN 2006:21.

Den Bereich des kristallinen Grundgebirges kann man in verschiedene Teilbereiche untergliedern (vergl. Abb. 4). Die Nordschwarzwälder Granitmasse befindet sich zwischen dem unteren Kinzigtal, dem unteren Renchtal und dem Murgtal. Im Murgtal sind Zweiglimmergranite und im Gebiet zwischen Kinzig und Rench sind Biotitgranite vertreten. Die Triberger Granitmasse befindet sich im Gebiet des Oberlaufes von Gutach und Schiltach. Ein weiteres Gebiet ist die Südschwarzwälder Granitmasse. Die prävariszischen Gneise treten zwischen den Granitkomplexen auf. Dabei handelt es sich überwiegend um Gneis-Anatexite, d.h. diese Gesteine haben nach der Vergneisung in variszischer Zeit erneut eine intensive An- und Aufschmelzung erfahren (GEYER & GWINNER 1964:126). Ein Zentrum der Anatexis ist der Südschwarzwald, mit den Gebieten Feldberg und Schauinsland findet, die aus durchgeschmolzenen Gneisen aufgebaut sind.

„Der Vulkanismus des Rotliegenden hat auch im Schwarzwald bedeutende Spuren hinterlassen.“(GEYER & GWINNER 1964:128). Im Gebiet um Baden-Baden, des Rauhkastens zwischen Lahr und der unteren Kinzig, Himmelsberg und Hünersedel, sowie beiderseits des

Münstertals und der Blauen findet man Quarzporphyre, die mit Tuffen mächtige und ausgedehnte Decken bilden.

Im Schwarzwald sind mehr als 200 Erz- und Mineralgänge bekannt (HENNINGSEN & KATZUNG 2006:25). Diese enthalten vor allem Minerale von Blei, Zink, Kupfer, Silber und Uran. Gebildet haben sich diese zu verschiedenen Zeiten zwischen dem Ende der variszischen Orogenese vor 300 Mio. Jahren bis zum Tertiär. Silberhaltige Bleierze wurden schon zur Römerzeit abgebaut. Hauptgebiete des Abbaus waren das Münstertal und die Umgebung des Schauinsland (vgl. auch: WERNER ET AL. 2002). Uranerze wurden in der Lagerstätte Menzenschwand am Feldberg bis 1992 abgebaut (HENNINGSEN & KATZUNG 2006:26).

Auch im Schwarzwald haben die Eiszeiten die Landschaft geformt (GEYER & GWINNER 1964: 129). Während Spuren der Riß- und Würmeiszeit eindeutig nachgewiesen wurden, konnte dies bei älteren Eiszeiten nicht geschehen. Es wird diskutiert, dass der Schwarzwald zu dieser Zeit noch nicht so hoch herausgehoben war, dass er in den nivalen Bereich auftrug. Als typische glaziale Form haben die Gletscher nach dem Abschmelzen die Kare hinterlassen. Im Nordschwarzwald findet man vor allem solche Kare, die sich an den Talflanken eingekerbt haben. Da der Buntsandstein leichter formbar ist, findet man diese vor allem dort und weniger im Grundgebirge. Nur im Südschwarzwald sind auch Kare im Grundgebirge anzutreffen, vor allem im Feldberggebiet, wo man auch andere typische glaziale Formen findet, wie z.B. zahlreiche Karseen (Feldsee, Glaswaldsee, Wildsee, Mummelsee) (GEYER & GWINNER 1964:129). Während des Riß- und Würmglazials war das Feldberggebiet das bedeutendste Zentrum der Vergletscherung. Der Hochschwarzwald war eine zusammenhängende Eisdecke von einer Fläche von 700 km² (GÜNTHER 2010:117). Es konnte nachgewiesen werden, dass die Eismassen während der Rißvereisung eine größere Fläche einnahmen, als während der Würmvereisung. Typisch sind durch glaziale Exaration entstandene übertiefte Becken, die sich nach dem Rückzug der Gletscher mit Wasser füllten, wie z.B. der Titisee, der Schluchsee und der Ursee. Außerdem findet man zahlreiche Trogtäler, wie z.B. das Zastlertal, das St. Wilhelmtal und das Menzenschwander Albtal, die von Moränenlandschaften umgeben sind (GÜNTHER 2010:19).

Vogesen und Schwarzwald weisen eine Vielzahl von Gemeinsamkeiten in ihrer Entstehungsgeschichte auf. Beide Gebirge wurden während der variszischen Gebirgsbildung als zusammenhängender Gesteinsblock herausgehoben, sodass in beiden Gebieten noch Reste des mesozoischen Deckgebirges, das auf den hohen Kammlagen bereits abgetragen ist, zu finden ist. Der Einbruch des Oberrheingrabens bildete einen markanten Einschnitt, wonach beide Gebiete sich unterschiedlich weiterentwickelten. Auffallend ist die differenzierte Entwicklung des Flussnetzes, was eine verschiedenartige morphologische Entwicklung beider Gebirge nach sich zog. Während man im Schwarzwald noch die hochgehobene Verebnungsfläche vorfindet, wurde diese in den Vogesen durch die Flüsse zerschnitten und man findet einen schmalen Kamm mit tief eingeschnittenen Tälern. Sowohl im Schwarzwald

als auch in den Vogesen lässt sich eine glazialmorphologische Überprägung nachweisen. Allerdings waren die Vogesen wegen der größeren Niederschlagsmengen und den Höhenverhältnissen stärker vergletschert als der Schwarzwald. Beide Gebirge sind im Süden höher herausgehoben als im Norden, was zur Folge hatte, dass im südlichen Teil während der Eiszeit zusammenhängende Eisflächen zu finden waren, während im nördlichen Teil kleinere Kargletscher vorherrschten.

Voraussetzung für die Entstehung beider Gebirge war der Einbruch des Oberrheingrabens. Nur durch dieses Ereignis konnten die Vogesen und der Schwarzwald entstehen. „Mit einer Länge von 300 km und einer durchschnittlichen Breite von 40 km ist der Oberrheingraben eine der markantesten Erscheinungen im geologischen Bau Europas und das Modellbeispiel eines geologischen Großgrabens schlechthin.“ (GEYER & GWINNER 1964:114, vergl. auch: HENNINGSEN & KATZUNG 2006:137, WALTER 2007:432, PFLUG 1982, BARTELS ET AL. 1982). Der Graben lässt sich in drei Bereiche gliedern: die Vorbergzone, der von Löss überzogene Terrassenkörper und die holozäne Talaue des Rhein (HARMAND & DESHAIES 2010:201, WALTER 2007:436). Im Graben haben sich Lockersedimente und Sedimentgesteine des Tertiärs abgelagert. Diese sind unterschiedlich dick, da der Untergrund aus vielen Einzelschollen aufgebaut ist, die sich unterschiedlich stark abgesenkt haben (HENNINGSEN & KATZUNG 2006:137). Der Oberrheingraben kann nicht als einzelne Erscheinung in Mitteleuropa betrachtet werden. Vielmehr ist er „Teil einer großen Nahtlinie, die Mitteleuropa in Nordnordost-Südsüdwest-Richtung durchzieht“. (HENNINGSEN & KATZUNG 2006:137). Man bezeichnet die Nahtlinie als Mittelmeer-Mjösen-Zone, wobei nach Westen ein Seitenast in den Zentral-Graben der Nordsee und in den Viking-Graben westlich von Norwegen abzweigt. Im Süden setzt sich der Graben im Bresse-Graben und im Rhone-Graben bis zum Mittelmeer fort (vergl. WALTER 2007:432).

2.3 Klima

Klimatisch gesehen bilden die beiden Untersuchungsgebiete Vogesen und Schwarzwald mit dem Oberrheingraben eine Einheit, die durch den Gegensatz zwischen Grabensenke und Randgebirge geprägt ist (HENDL 2002:91). Dieser Gegensatz wird in verschiedenen klimatischen Merkmalen der Region deutlich.

Das Untersuchungsgebiet liegt im Einflussbereich der außertropischen Westwinde (GLASER & SCHÖNBEIN 2007). Allerdings dominieren nicht nur reine Westwinde, sondern es treten häufig Winde aus Südwesten auf (HENDL 2002:21; WEISCHET & ENDLICHER 2000:37, GLASER & SCHÖNBEIN 2007:34, TRENKLE & VON RUDLOFF 1981). Auch auf dem Feldberg konnte dies nachgewiesen werden (vergl. Abb. 5 und Abb. 6).

Die Burgundische Pforte spielt eine wichtige Rolle, da warme Luft aus Südfrankreich in den Oberrheingraben einfließt und die Temperatur maßgeblich beeinflusst.

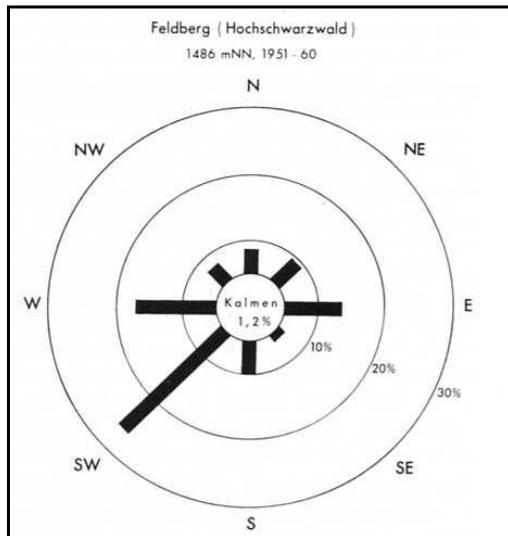


Abb. 5: Mittlere jährliche Windverteilung
Jahreshäufigkeit (1951-1960) auf dem Feldberg
im Schwarzwald (1486m NN), Daten: Deutscher
Wetterdienst, aus: WEISCHET & ENDLICHER
2000:37.

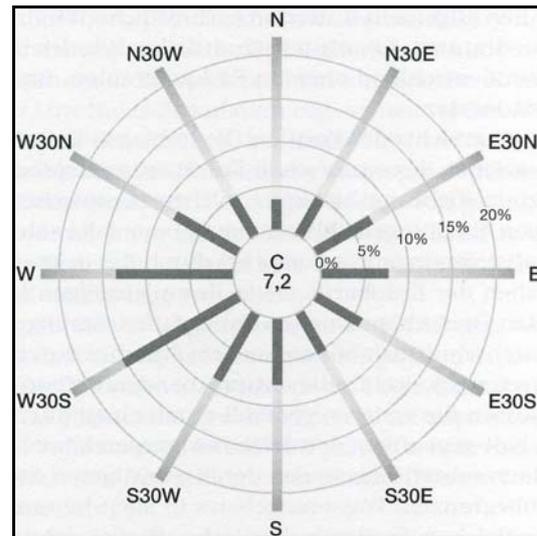


Abb. 6: Typische relative Jahreshäufigkeit der
Bodenwindrichtung über Süddeutschland in
zwölfteliger Richtungsskala nach 30°-Sektoren,
Daten: Schäfer 1982, aus: HENDL 2002:21.

Die klimatischen Merkmale Temperatur, Frosthäufigkeit und Niederschlagsverteilung zeigen, dass die Gebiete Vogesen, Oberrheingraben und Schwarzwald einen zusammenhängenden Wirkungskomplex darstellen. Vor allem der Oberrheingraben nimmt aus klimatischer Sicht eine Sonderstellung in Deutschland ein. Diese Sonderstellung wird durch seine Randgebirge maßgeblich beeinflusst (vergl. Tab. A. 1, Tab. A. 2, Tab. A. 3, Tab. A. 4, Tab. A. 5 im Anhang).

Der Temperaturjahresverlauf zeigt, dass im Winter die Durchschnittstemperaturen im Oberrheingraben über 0°C liegen und im wärmsten Monat Juli um die 19°C (siehe Tab. A. 1, Tab. A. 2 und Tab. A. 3 im Anhang). Die wärmsten Gebiete liegen dabei nicht in der tiefgelegenen zentralen Flussaue, sondern an den westlichen Grabenrandgebieten insbesondere am Ostfuß der Vogesen (HENDL 2002:91 und Tab. A. 1, Tab. A. 2 im Anhang). Die Gebiete am Ostrand der Vogesen sind durch erhöhte Solarstrahlung infolge leeseitiger Erhöhung der Sonnenscheindauer und durch warme Fallwinde, die vom hohen Vogesenkamm unter trockenadiabatischer Erwärmung herabstürzen begünstigt (HENDL 2002:91). Die Randgebirge selbst weisen deutlich niedrigere Temperaturen auf.

Die durchschnittliche Frosthäufigkeit zeigt Parallelen zum Temperaturverlauf. Die frostärmsten Gebiete liegen an den Grabenflanken. In der Rhein-Aue steigt die Frostgefahr an und ist in den Randgebirgen am größten (HENDL 2002:94 und Tab. A. 5 im Anhang).

Die Niederschlagsverteilung ist ein wichtiger klimatischer Faktor. Sie folgt zwar wie die anderen klimatischen Faktoren den orographischen Leitlinien, allerdings zeigt sich, dass neben der Höhenlage auch die Exposition die Höhe der Niederschläge bestimmt (HENDL 2002:94, vergl. auch Tab. A. 4, Tab. A. 5 im Anhang). Die höchsten Niederschlagsmengen sind in den Vogesen nachgewiesen. Dabei sind die Niederschlagsmengen in den höher gelegenen Südvogesen größer als in den Nordvogesen. Im Südschwarzwald hingegen werden

aufgrund der Leewirkung der hohen Südvogesen niedrigere Niederschlagsmengen nachgewiesen. Die vorherrschenden Südwestwinde haben zur Folge, dass niederschlagsbringende Wolken aus südwestlicher Richtung aus Südostfrankreich „aufgespalten“ werden. Ein Teil steigt an der Westseite der Vogesen auf und regnet sich ab, aber ein großer Teil gelangt in den Oberrheingraben. Dieser ist durch die Siedlungs- und Industriestruktur und durch den Verlauf einer Hauptverkehrsachse ein mit Luftschadstoffen angereichertes Gebiet. Zwar bilden die Vogesen für die Westwinde einen Riegel, aber ein großer Teil der Luftmassen gelangt bei südwestlicher Windrichtung bis zum Schwarzwald. Dieser Effekt wird durch die Form und Lage beider Gebirge begünstigt.

2.4 Böden

Bei der Bestimmung der vorherrschenden Bodentypen in den Vogesen wurde die Carte pédologique de la France à échelle du millionième verwendet (INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE 1966). Zur Analyse der genaueren Eigenschaften der Bodentypen wurde das Beiheft zur Karte herangezogen (DUPUIS 1967). Zudem sind bei der Beschreibung der Bodeneigenschaften eigene Beobachtungen eingegangen.

Tab. 1: Vorherrschende Bodentypen in den Vogesen.

Lage	Vogesenwestseite	Vogesenkamm	Vogesenostseite
Bodentypen	Braunpodsole	Braunpodsole	Nährstoffreiche Braunerden Rendzinen
	Nährstoffreiche Braunerden	Ranker	
	Parabraunerden.	Saure Braunerden	

In den Vogesen herrschen Braunerden, Podsole und Ranker vor (vergl. Tab. 1). Die an der Vogesenwestseite und am Kamm vorherrschenden Braunpodsole gelten als Vorstufe der Podsolböden, da der aschgraue, gebleichte A₂- Horizont, wie er bei den Podsolen vorhanden ist, fehlt (DUPUIS 1967:16). Dieser Bodentyp bedeckt große Teile der Vogesenwestseite, aber auch des Kamms zwischen 1000 m und 1100 m entlang der Vogesenkammstraße (Route de Crête). Die Podsole sind durch eine Verlagerung von Eisen- und Aluminiumionen mit organischen Stoffen im Profil entstanden: „Podsolierung ist die abwärts gerichtete Umlagerung gelöster organischer Stoffe, oft zusammen mit Aluminium und Eisen. Die Verlagerung findet bei stark saurer Reaktion statt, weil dann Nährstoffmangel den mikrobiellen Abbau der organischen Komplexbildner hemmt“ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:289). Podsole entstehen nur, wenn die wichtigsten bodenbildenden Faktoren bestimmte Eigenschaften aufweisen. Neben den hohen Niederschläge, der hohen relativen Luftfeuchte und den niedrigen Jahresmitteltemperaturen, bilden calcium- und magnesiumarme Gesteine die Grundlage zur Entwicklung der Böden. Zudem spielt die

Vegetation der Standorte eine wichtige Rolle. Wie in den Vogesen zu beobachten, wachsen auf Podsolböden Pflanzenarten mit geringen Nährstoffansprüchen, wie z.B. Nadelhölzer. Sind diese Bedingungen gegeben, verschlechtern sich im Zuge von Versauerung und Nährstoffverarmung die Lebensbedingungen der Bodentiere und die Streu wird nur noch zögernd und unvollständig zersetzt. Gleichzeitig treten verstärkt organische Komplexbildner in der Bodenlösung auf, die Eisen und Aluminium freisetzen.

Die am Kamm weit verbreiteten Rankerböden bilden auf dem silikatischen, carbonatfreien Muttergestein einen humosen, steinigen A-Horizont (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:316). Er weist nur eine schwache Basensättigung auf, weshalb er vorwiegend als extensives Grünland oder forstwirtschaftlich genutzt wird und tritt meist in Hanglagen auf.

In allen Vogesenlagen kommen Braunerden vor, die das Bodenprofil Ah/Bv/C aufweisen. Charakteristisch ist der verbraunte Bv-Horizont, der durch den Prozess der Verbraunung und Verlehmung entstanden ist. Bei dem Prozess der Verbraunung verwittern eisenhaltige Minerale, z.B. Silikate, wie Biotite, Olivine oder Amphibole unter der Bildung von Eisenoxiden. Mit der Verbraunung geht oft eine Verlehmung einher, d.h. es werden Tonminerale gebildet. Die eutrophen Braunerden sind basenreich (BS-Wert > 50%) und reich an austauschbaren Ca- und Mg- Ionen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Die basenarmen Braunerden besitzen lediglich eine Basensättigung von weniger als 20%, sind auf Granit, Grauwacken und Sandstein zu finden und mit podsolierten Böden und Rankern vergesellschaftet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:321). Der ackerbauliche Wert der Braunerden schwankt und man findet auf ihnen oft Waldstandorte.

Die an der Ostseite vorhandenen Rendzinen weisen die Horizontabfolge Ah/C auf. Der Ah-Horizont ist humus- und skelettreich und liegt auf einem Carbonatgestein. Sie entstehen durch „physikalische und chemische Verwitterung, sowie Humusanreicherung aus Kalkstein-, Dolomit-, Tonmergel- oder Gips- Syrosemern“ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:317). Entscheidend ist, dass der Ah-Horizont der Rendzinen carbonathaltig, schwach alkalisch bis höchstens schwach sauer und weitgehend mit Ca^{2+} -Ionen gesättigt ist, was eine hohe Basensättigung der Böden zur Folge hat.

Bei der Bestimmung der Bodentypen in den verschiedenen Schwarzwaldlagen wurde zur Ergänzung der im Gelände gewonnenen Erkenntnisse die Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) der Bundesrepublik Deutschland verwendet (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEN STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTEN DER BRD (HRG.) 2005).

Tab. 2: Vorherrschende Bodentypen im Schwarzwald.

Lage	Schwarzwaldwestseite	Schwarzwaldkamm	Schwarzwaldostseite
Bodentypen	Braunerden auf Löss	Humusbraunerden	Braunerden
	Parabraunerden auf Löss	Regosole	Parabraunerden
	Pararendzinen auf Löss		Podsole

Im Schwarzwald findet man vor allem Braunerden und Parabraunerden, sowie Podsole (vergl. Tab. 2). Die Braunerden und Parabraunerden, sowie die Pararendzinen haben sich an der Schwarzwaldwestseite auf Löss ausgebildet, was auf die chemischen Eigenschaften der Quellgewässer und der Böden einen erheblichen Einfluss hat. Desweiteren findet man am Schwarzwaldkamm Humusbraunerden, mit pH-Werten um 5,0 und einer Basensättigung von ca. 20% im Oberboden (STAHR 2001:110). Charakteristisch für diese Braunerde ist ein mindestens 40 cm mächtiger Ah- Horizont (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010 UND STAHR 2001:108). Man findet den Bodentyp unter Buchen-Tannen-Wäldern, sowie unter reinen Fichtenforsten.

Podsole lassen sich vereinzelt am Kamm und an der Schwarzwaldostseite nachweisen. In dem Untersuchungsgebiet um den Schluchsee und zwischen Titisee und Schluchsee werden die Prozesse der Bodenbildung durch den Bärhaldegranit beeinflusst. „Der Bärhaldegranit zerfällt grobkörnig und ist sehr arm an Calcium und Magnesium, aber reich an Kalium.“ (STAHR 2001:116). Daher lassen sich unter Fichtenbeständen Norm-Podsole, die im Auflagehumus pH-Werte zwischen 2 und 3, in den Verarmungshorizonten zwischen 3 und 4 erreichen und erst in den Anreicherungshorizonten pH-Werte von 4 überschreiten, nachweisen. Zudem ist die Basensättigung in den oberen Bodenhorizonten z.T. unter 10% (STAHR 2001:116). Allerdings sind die Standorteigenschaften der Podsole noch relativ günstig, da in den Horizonten noch relativ viele Minerale enthalten sind, was auf den noch jungen Granitschutt zurückzuführen ist (STAHR 2001:116 , ZÖTTL ET AL. 1977).

2.5 Naturraum, Vegetation und Nutzung

Die Mischwälder der Vogesen bestehen aus Buchen, Ahorn, Eichen, Hainbuchen, Fichten, Kiefern, Birken und Ebereschen. In höheren Lagen sind natürlicherweise Buchen- und Nadel-Buchenwälder anzutreffen, während in der montanen Stufe findet man nur noch reine Nadelwälder nachweisbar sind (vergl. Abb. 7). Am Vogesenkamm trifft man in den Höhenlagen zum Teil auf Offenland (z.B. Gebiet um den Hohneck). In diesem Zusammenhang zu erwähnen wäre die Frage nach der Offenheit der Vogesenhochlagen (Chaumes). NÖLKEN (2005) führt an, dass man nach CARBIENER (1963, 1966, 1969) primäre

und sekundäre Chaumes unterscheidet. „Dabei sind die primären Chaumes von Natur aus waldfrei und die sekundären Chaumes vom Menschen gemacht.“ (NÖLKEN 2005:17). Zur Hochweidewirtschaft in den Vogesen hat bereits PREUSSER (1978) Forschungen angestellt und die Besonderheit dieser Bewirtschaftung herausgestellt. Zudem erachtet er als wichtig, dass die Chaumes in die zukünftigen Infrastruktur- und Freizeitplanungen einbezogen werden und deren weitere Existenz gesichert wird. Dieser Aspekt ist auch für die Quellgewässer von großer Bedeutung, da der Schutz der Chaumes auch der Qualitätsverbesserung und dem Schutz der Quellen dienen könnte.

Am Hohneck-Massiv konnte nachgewiesen werden, dass das Gebiet in Höhen über 1250 m klimabedingt baumfrei ist (CARBIENER 1963, 1966, 1969). Solche waldfreien Standorte zeichnen sich durch besondere Standortbedingungen aus. Es sind Felsmassive, Blockhalden und auch Kuppen des Hauptkamms in exponierter Lage. Die exponierte Lage hat hohe Windgeschwindigkeiten und Schneehäufungen an den Leseiten des Kamms zur Folge, was einen Baumbewuchs erschwert (NÖLKEN 2005).

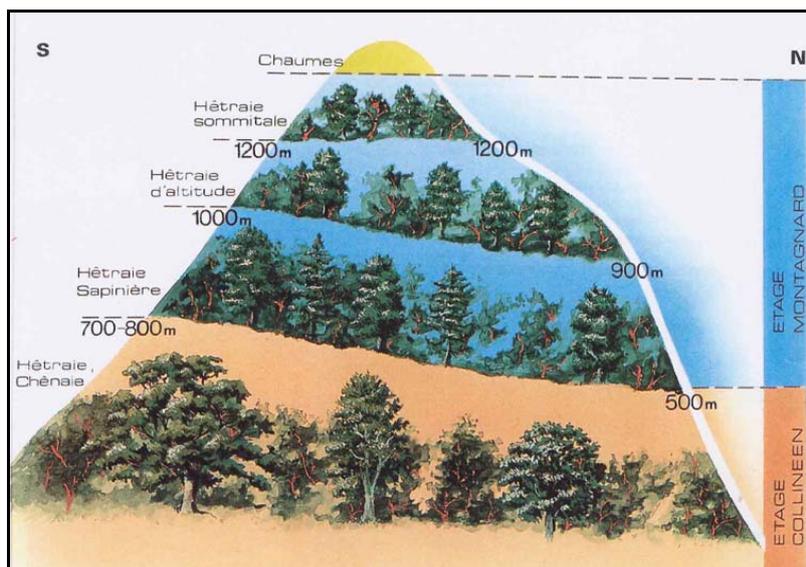


Abb. 7: Die Vegetationstypen unterschiedlicher Höhenzonen in den Vogesen (nach Office Nationale des Fôrets), aus: BÜRGER 2004:14.

Im Schwarzwald ist die Besiedlung erheblich dichter als in den Vogesen. Im Nordschwarzwald findet man an den Hängen Tannen und Fichten, während die Hochflächen fast alle gerodet sind. Die Gneiskuppen des Mittelschwarzwaldes sind ebenfalls mit Nadelhölzern bewachsen und in den Tälern herrscht Weideland vor (GÜNTHER 2010:8). Charakteristisch sind die in den Tälern liegenden Schwarzwaldhöfe. Auf den höchsten Kuppen des Südschwarzwaldes findet man kahles Weideland und vereinzelt verstreute Höfe. Die Wälder bestanden vor der anthropogenen Beeinflussung überwiegend aus Tannen und Buchen (BÜRGER 2004).

In den letzten Jahrzehnten ist der Anteil der Waldflächen an der Bodennutzung wieder deutlich angestiegen und der Anteil der Weidefläche ist zurückgegangen (vergl. Abb. 8).

Ein Unterschied zwischen beiden Gebirgen besteht in der Nutzung. Während der Schwarzwald bis in die Gipfelregionen dauerhaft besiedelt ist, wird in den Vogesen Almwirtschaft betrieben: Die Kühe werden im Winter abgetrieben und die „Fermes“ geschlossen. Die Kammstraße (Route de Crête) wird dann nur teilweise vom Schnee befreit und der Rest wird als Skigebiet genutzt (z.B. Kastelberg). Außerdem ist die Forst- und Weidewirtschaft im Schwarzwald weitaus intensiver als in den Vogesen.

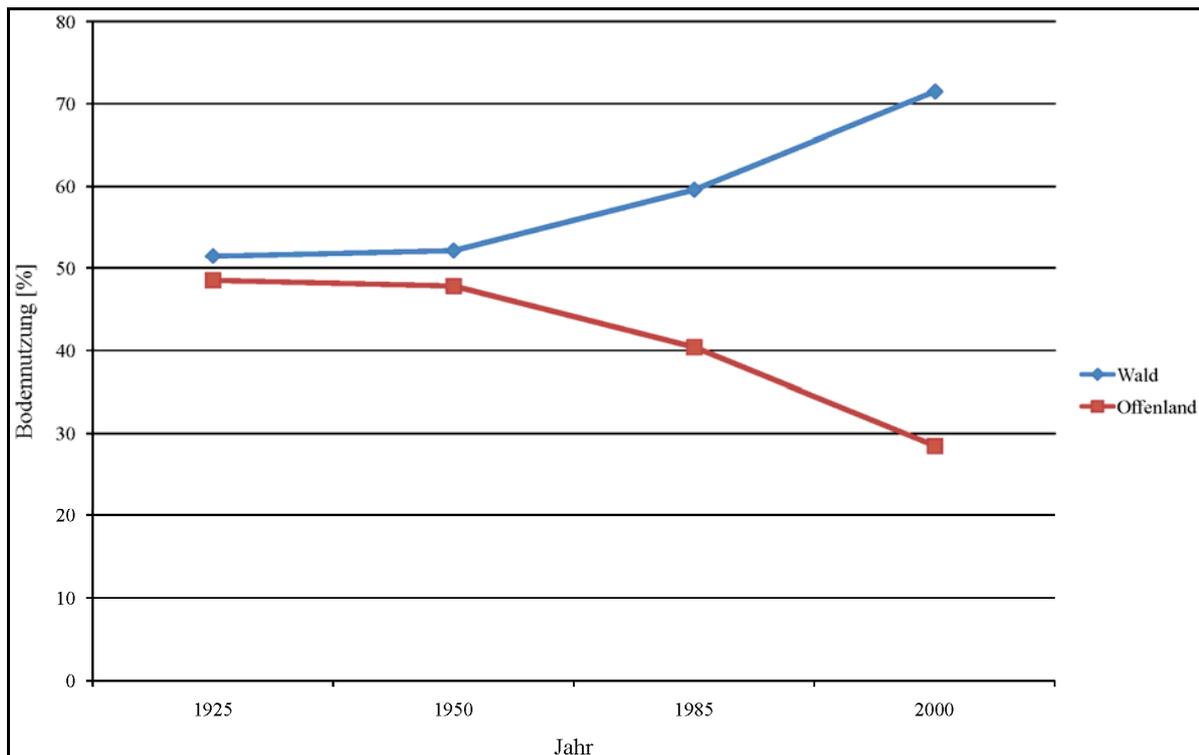


Abb. 8: Nutzungsaufteilung im Schwarzwald zu unterschiedlichen Zeiten; Quelle der Daten: BÜRGER 2004: 20, Diagramm: EIGENE DARSTELLUNG.

3. Methodisches Vorgehen

3.1 Auswahl der Standorte

Die zu beprobenden Quellgewässer wurden nach zwei Kriterien ausgewählt. Ein erstes Kriterium der Standortauswahl war der geologische Untergrund. Aufgrund der Genese und des geologischen Aufbaus beider Untersuchungsgebiete, wurden in den Vogesen Quellen im Granit und im Buntsandstein untersucht. Im Schwarzwald beschränkte sich die Analyse auf Quellen im Granit.

Neben der Geologie spielte das mesoskalige Relief und somit die Lage der Quellen in den beiden Gebirgen eine Rolle.

In den Vogesen wurden Quellen im Luv und im Lee der einzelnen Höhenzüge, sowie innerhalb der Höhenzüge selbst ausgewählt. Die Lage der Quellen im Luv wird als Lage an der Westseite und die Lage der Quellen im Lee als Lage an der Ostseite interpretiert. Die Quellen innerhalb der Höhenzüge befinden sich in Kammlage (vergl. Karte 1).

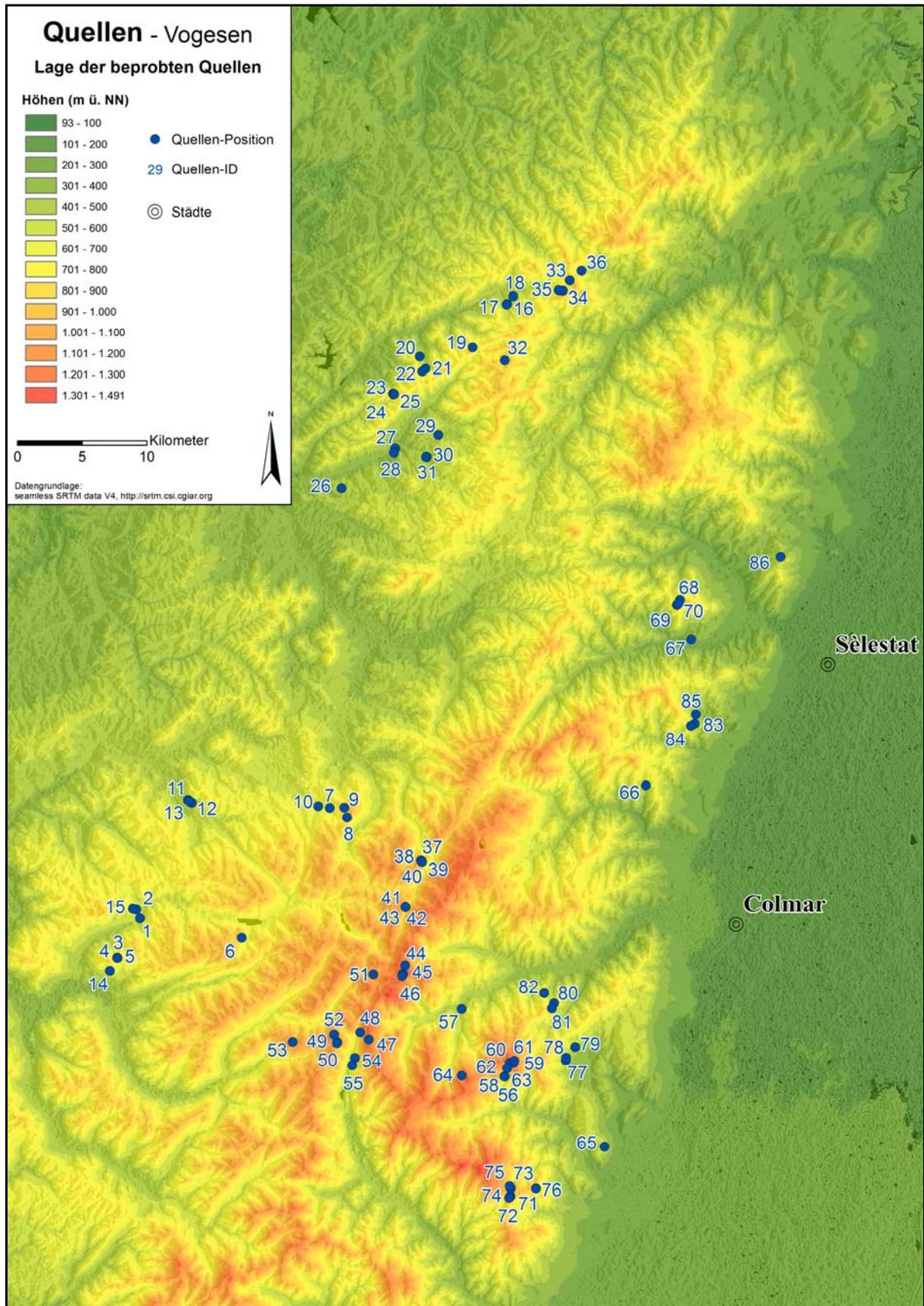
Aufgrund des großräumlichen Untersuchungsansatzes wurden die Ausprägung der Deckschichten und die Mineralzusammensetzung der Gesteine nicht im Detail untersucht, sodass lediglich die Unterscheidung in Granit und Buntsandstein vorgenommen wurde. Auch auf eine genauere Feststellung der Zusammensetzung der Vegetation wurde verzichtet. Im Umfeld der Standorte herrscht zwar größtenteils Mischwald vor und es wurde auf Homogenität geachtet, aber aufgrund der vielfältigen Ausprägungen war die Erreichung einer kompletten Einheitlichkeit nicht möglich.

Die Interpretation der Gebirgslagen ist im Schwarzwald aufgrund dessen mesoskaligen Reliefs schwieriger (vergl. Karte 2). Vor allem im Südschwarzwald ist die Einteilung in Luv-, Lee- und Kammlage nicht immer eindeutig, was eine Regionalisierung der Quellen und Böden erschwert. Daher werden die Quell- und Bodendaten des Schwarzwaldes in erster Linie zum Vergleich mit den Quell- und Bodendaten der Vogesen dienen, um den Einfluss der Kalkungsmaßnahmen zu verdeutlichen.

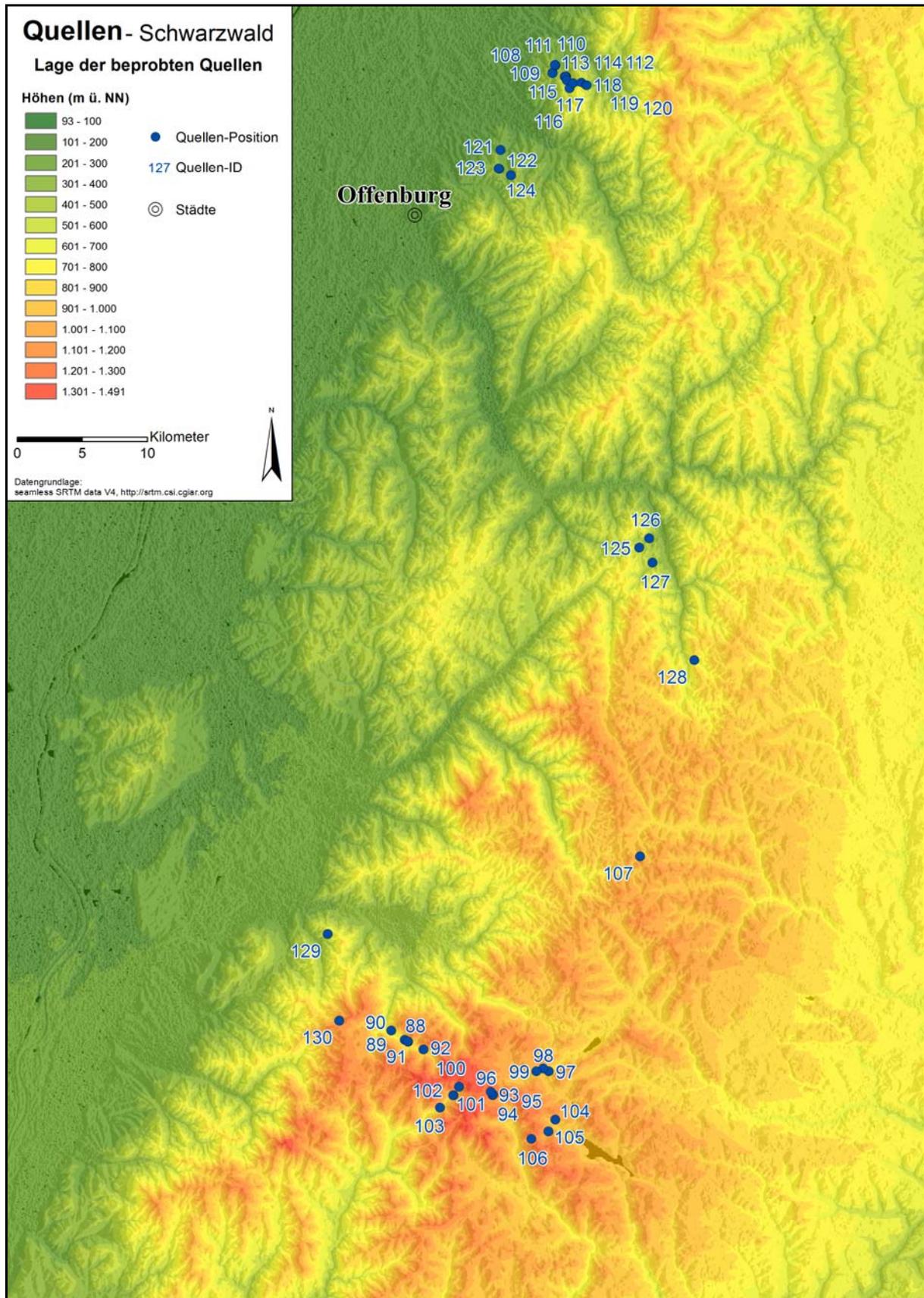
Aufgrund dieser Kriterien wurden in den Vogesen und im Schwarzwald insgesamt 131 Quellgewässer mit der in Tab. 3 aufgelisteten Verteilung ausgewählt.

Tab. 3: Anzahl der beprobten Quellen in den verschiedenen Gebirgslagen.

	Vogesen		Schwarzwald
	Granit	Buntsandstein	Granit
Westseite	15	16	18
Kamm	28	5	14
Ostseite	17	7	11



Karte 1: Lage der beprobten Quellen in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.



Karte 2: Lage der beprobten Quellen im Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

3.2 Beprobungszeitpunkte

Alle Quellen wurden über zwei Jahre (Herbst 2008 bis Sommer 2010) zu den verschiedenen Jahreszeiten beprobt. Dabei erfolgte die Zuteilung der Monate zu den Jahreszeiten entsprechend der meteorologischen Betrachtungsweise (vergl. Tab. 4).

Tab. 4: Zuteilung der Monate und Beprobungen zu den verschiedenen Jahreszeiten.

Jahreszeit	Monate	Jahre	Beprobung
Frühjahr	März, April, Mai	2009; 2010	7. und 3. Beprobung
Sommer	Juni, Juli, August	2009; 2010	4. und 8. Beprobung
Herbst	September, Oktober, November	2008; 2009	1. und 5. Beprobung
Winter	Dezember, Januar, Februar	2008/2009; 2009/2010	2. und 6. Beprobung

Der Abstand der Probenahme einer Quelle betrug drei Monate, sodass jede Quelle insgesamt achtmal beprobt wurde (vergl. Tab. 4). Probenahme-Lücken entstanden durch mangelnde Zugänglichkeit (z.B. durch Schnee) oder Trockenheit.

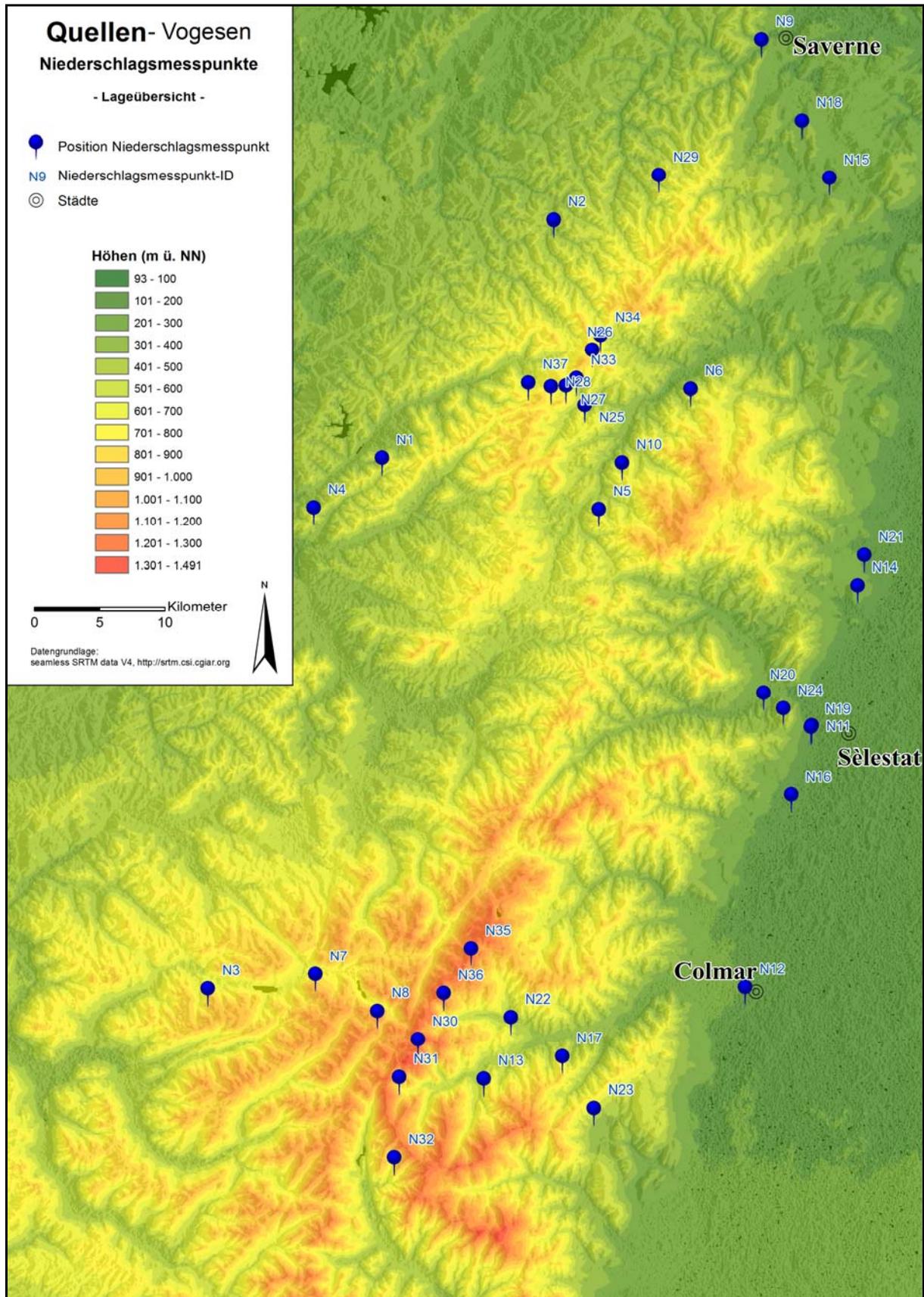
3.3 Feldmethoden

3.3.1 Quellen

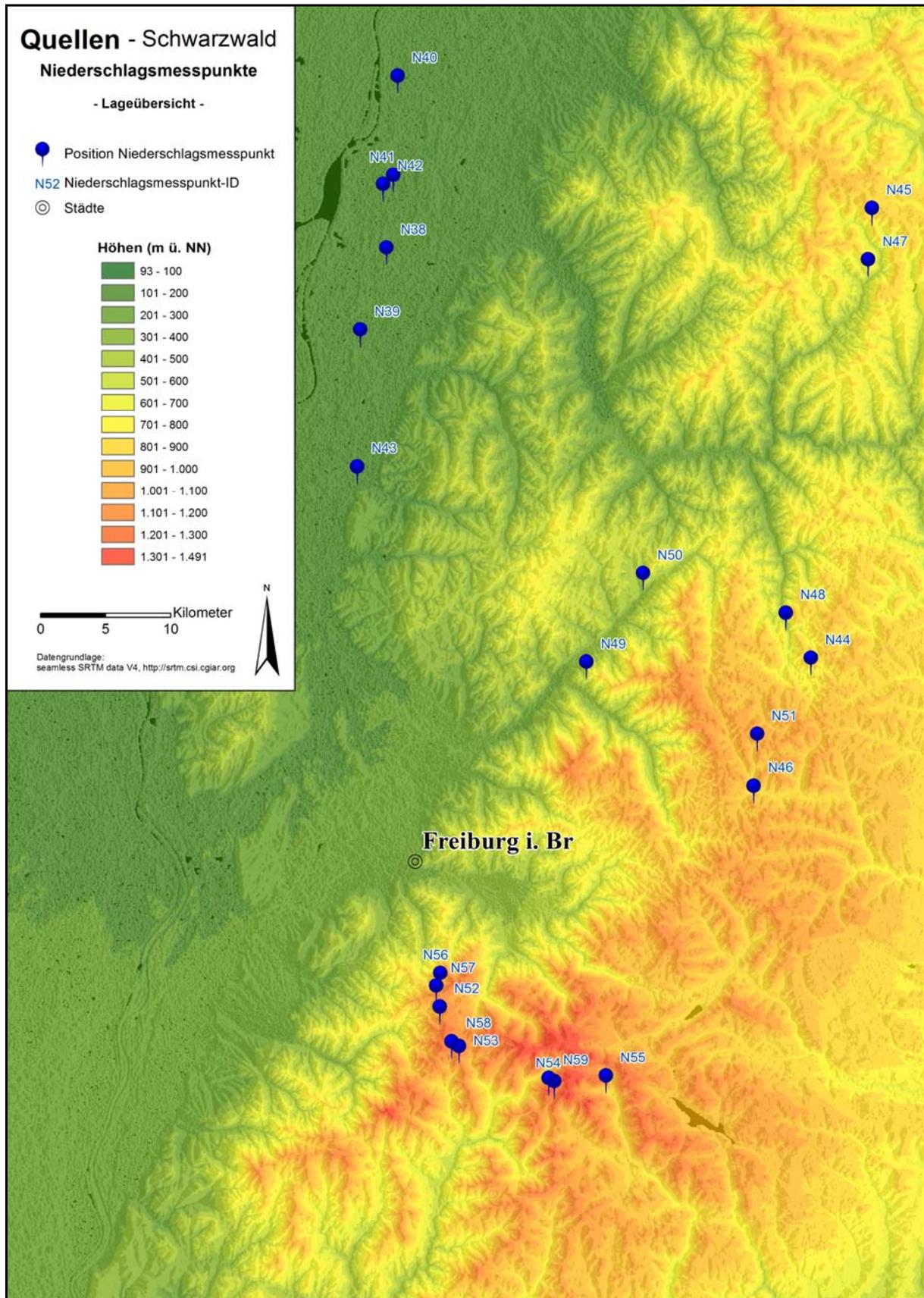
Das Quellwasser wurde in 750ml PE-Flaschen abgefüllt. Die Beprobungsflaschen wurden bei 5°C dunkel gelagert und innerhalb der nächsten 24 Stunden im Labor untersucht. Die Zeitspanne zwischen Beprobungszeitpunkt und labortechnischer Untersuchung war bei allen Beprobungen gleich.

3.3.2 Niederschlag

Die Niederschlagsauffanggefäße wurden zu verschiedenen Zeitpunkten im Gelände ausgebracht und zwei bis sechs Wochen nach der Ausbringung wieder eingesammelt. Bei der Standortauswahl wurde darauf geachtet, dass die Gefäße im Freiland positioniert wurden, damit Einflüsse jeglicher Vegetation ausgeschlossen werden konnten. Zudem war für die Fragestellung der Untersuchung von entscheidender Bedeutung, dass Niederschlagsproben aus den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen untersucht werden (vergl. Karte 3 und Karte 4).



Karte 3: Niederschlagsmesspunkte in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.



Karte 4: Niederschlagsmesspunkte im Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

3.3.3 Boden

In jedem der ca. 2500 m² großen Quelleinzugsgebiete wurden Bodenproben mit einem Bohrstock entnommen. Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden pro Fläche fünf Proben je Bodentiefe entnommen und als Mischproben untersucht (SCHLICHTING ET AL. 1995, DIN 10381-1, 10381-2, 10381-4 und DIN EN ISO 22475-1). Zur Erfassung der Tiefenverteilung der Stoffe wurde im 20cm-Abstand bis in eine Tiefe von einem Meter beprobt.

Zur Analyse der chemischen Vorgänge im oberen Bodenhorizont wurden zudem Proben der Bodentiefen 0-3 cm und 3-10 cm entnommen (Spatenproben).

3.4 Labor

3.4.1 Boden

Probenaufbereitung

Die Probenaufbereitung für die weiteren chemischen Untersuchungen erfolgte nach der DIN ISO 11464. Bevor der Skelettboden mit einem 2mm Sieb vom Feinboden getrennt werden konnte, wurden die Proben bei Raumtemperatur getrocknet. Zur weiteren Analyse wurde nur der Feinboden verwendet.

pH-Wert-Messung

Die Vorbehandlung der Proben und die Messung des pH-Wertes erfolgten nach DIN ISO 10390 (vergl. auch MEIWES ET AL. 1984). Die Messung des pH-Wertes wurde mit dem Gerät PH 330 i / SET von WTW durchgeführt.

Der Boden wurde mit destilliertem Wasser und mit einer KCl-Lösung geschüttelt. Der in der Wasserlösung gemessene pH-Wert gibt den tatsächlichen pH-Wert im Boden an. Die Werte der mit KCl-Lösung versetzten Proben liegen tiefer, da durch den Salzzusatz Kationsäuren, wie z.B. Al-Ionen ausgetauscht werden und in die Lösung gelangen. Je mehr austauschbare Kationsäuren im Boden vorhanden sind, desto stärker nimmt der pH-Wert ab.

Effektive Kationenaustauschkapazität

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurde nach der Methode von MEHLICH bestimmt (KRETSCHMAR 1986:271-276). Das Austauschverfahren ist angelehnt an die DIN 19684. Dabei wurde 5g luftgetrocknete Probe mit 5g Quarzsand vermischt und mit einer 0,2N Bariumchlorid-Lösung perkoliert. Der Rücktausch der Barium-Ionen erfolgte mit einer Magnesiumchlorid-Lösung. Die Konzentration der Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ und Al³⁺-Ionen wurde aus dem Filtrat des Hintausches und die Konzentration der Ba²⁺-Ionen aus dem Filtrat des Rücktausches mit dem Flammen-AAS bestimmt.

Atomadsorptionsspektroskopie (AAS)

Die Messungen mit Hilfe der Atomadsorptionsspektroskopie wurden nach der DIN 38406-3, DIN 38406-13, DIN 38406-14, DIN 38406-25 und DIN 38406-28 durchgeführt. Dies ist eine Methode zur qualitativen und quantitativen Bestimmung mehrerer Elemente in wässriger Lösung. Die Bestimmung der Konzentrationen von Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium und Barium erfolgte mit einer Luft-Acetylen-Flamme, während die Aluminiumionenkonzentration in einer Lachgas-Acetylen-Flamme bestimmt wurde (Funktionsweise und Methodik der AAS vergl. WELZ & SPERLING 1997).

Tonmineralanalyse

Die Bestimmung des Tonmineralbestandes erfolgte durch Beugung von Röntgenstrahlen. Diese besitzen Wellenlängen, die den Abständen der Mineralbausteine entsprechen. Die Röntgenstrahlen, die auf Minerale treffen, werden von den Kristallgitterebenen gebeugt und ergeben charakteristische Interferenzlinien. Nur wenn die BRAGG'sche Reflexionsbedingung erfüllt ist, kommt es zur Beugung der Röntgenstrahlen. So können Interferenzstrahlen mit bestimmten Einfallswinkeln bestimmte Gitterabstände zugeordnet werden. Diese sind wiederum charakteristisch für bestimmte Minerale und werden in nm als d-Werte gemessen. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass bestimmten Basisreflexen solche höherer Ordnung zugeordnet sind. So fällt zum Beispiel der d-Wert zweiter Ordnung (002) der Chlorite mit dem erster Ordnung (001) der Kaolinite zusammen. Eine Unterscheidung innerhalb der Tonminerale kann aufgrund ihrer Quellfähigkeit getroffen werden. Bei quellfähigen Tonmineralen vergrößern sich durch Flüssigkeitseinlagerungen in den Zwischenschichten die Basisabstände.

Desweiteren sind die Tonminerale unterschiedlich temperaturbeständig. Bei Bodenchloriten bricht das Kristallgitter bereits bei 300-400°C zusammen, während der Basisreflex der Kaolinite bei etwa 500°C verschwindet. Trotz allem sind quantitative Aussagen über den Tonmineralbestand problematisch, da sich bei der gleichen Mineralart die Intensität der Basisreflexe beträchtlich unterscheiden kann (vergl. BLUME ET AL. 2011:127).

Die Herstellung der Texturpräparate erfolgte in mehreren Schritten. Es wurde die Fraktion <0,063 mm getrennt und von dieser eine Suspension hergestellt, aus der die Fraktion <2µm gewonnen (Tonfraktion) wurde. Die Tonfraktion wurde auf ein angeätztes Glasblättchen zentrifugiert und bei Zimmertemperatur getrocknet. Nach eigenen Erfahrungen werden durch diese Methode der Sedimentation (beschleunigt durch zentrifugieren) die besten Ergebnisse erzielt. Abschließend wurde ein Röntgendiagramm von 3-70 Å und von 3-30 Å gefahren. Zur Unterscheidung der einzelnen Tonmineralgruppen wurden die Präparate mit Äthylenglycol behandelt und bei unterschiedlichen Temperaturstufen (110°C, 300°C und 600°C) getempert. Nach jeder Behandlung wurde mit dem Röntgendiffraktometer D500 ein Diagramm von 3-30 Å hergestellt.

Da die Tonminerale im Zuge des Versauerungsprozesses der Böden einem Umwandlungsprozess unterworfen sind, stand bei der Auswertung der Diagramme die Betrachtung des Verhältnisses zwischen Drei- und Zweischichttonmineralen im Vordergrund (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Dabei wurden die Dreischichttonminerale Illit/Montmorillonit/Vermiculit und Muskovit zusammen erfasst. Dies geschah durch die Betrachtung aller Peaks zwischen 6 Å und 10 Å. Um durch eine eventuelle Gitterdehnung den Vermiculit nachweisen zu können, wurden das unbehandelte und das behandelte Diagramm übereinandergelegt und alle Peaks der Dreischicht- und Zweischichttonminerale wurden verglichen. Dabei wurde der Kaolinit mit dem Peak bei 12 Å als Zweischichttonmineral herangezogen. Das Verhältnis der Menge an Dreischichttonmineralen zu Zweischichttonmineralen wurde abgeschätzt und in drei Gruppen eingeteilt:

- Mehrheitlich Dreischichttonminerale
- Ausgeglichenes Verhältnis Dreischichttonminerale zu Zweischichttonminerale
- Mehrheitlich Zweischichttonminerale

Aufgrund der Komplexität der Bestimmung kann man allenfalls von einer semiquantitativen Bestimmung sprechen.

3.4.2 Quellen und Niederschlag

Probenaufbereitung

Bei der Probenahme und der anschließenden Konservierung wurde nach der DIN ISO 5667-1, DIN 38402-13, DIN 38402-15 und der DIN EN ISO 5667-3 gearbeitet.

Die Lagerung der Proben erfolgte im Dunkeln bei 5°C, bevor sie gefiltert wurden. Zur Filtration wurden Rundfilter der Firma Macherey und Nagel mit der Seriennummer MN 615 mit einem Durchmesser von 185 mm und einem mittleren Rückhaltevermögen von 4-12 Mikrometer verwendet.

In einem zweiten Schritt wurde jede Probe in zwei Teilproben aufgeteilt, während eine mit HCl und die andere mit HNO₃ zur besseren Konservierung angesäuert wurden.

pH-Wert-Messung

Nach der Filtration der Proben wurde der pH-Wert mit dem PH 330 i / SET von WTW gemessen (angelehnt an DIN 38404-5).

Atomadsorptionsspektroskopie (AAS)

Wie im Boden wurden in den Quellen die Elementkonzentrationen mit Hilfe der AAS bestimmt.

3.5 Analysegenauigkeit der Untersuchungsmethode

Um die Genauigkeit der gemessenen Werte zu überprüfen, wurden in jeder Messreihe Proben mit einem mittleren Standard der Eichreihe angereichert (vergl. Tab. 6). Bei der Betrachtung der Werte wird deutlich, dass die Wiederfindungsrate der jeweiligen Elementkonzentrationen bei allen Messungen der angereicherten Proben im Bereich des tolerierbaren Messfehlers von 10% liegt (vergl. Tab. 5).

Tab. 5: Messwerte mit und ohne Anreicherung in den Vogesen- und Schwarzwaldquellen (Bsp. 1. Beprobung)

Quellnr.	Al ³⁺ [mg/l]		Na ⁺ [mg/l]		K ⁺ [mg/l]		Ca ²⁺ [mg/l]		Mg ²⁺ [mg/l]	
	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.
1	0,9	2,8	8,1	8,8	0,7	1,7	4,4	6,2	2,3	4,2
7	1,1	3,3	5,9	7,0	0,8	1,7	2,3	4,2	1,4	3,3
21	1,6	3,5	2,4	3,6	1,7	2,5	11,9	12,2	5,7	7,5
23	1,6	3,6	3,2	3,9	1,9	2,9	13,8	14,1	5,9	7,9
27	1,3	3,1	2,0	2,8	1,5	2,4	4,6	6,5	4,5	6,5
44	0,4	1,5	2,8	3,9	0,2	1,3	1,9	3,7	1,1	3,0
56	0,5	1,5	2,1	3,1	1,3	2,3	3,5	5,1	2,0	4,0
34	1,3	2,1	4,1	4,8	1,9	2,8	3,1	4,9	1,8	3,6
75	1,0	2,0	4,3	5,2	0,7	1,6	8,0	9,7	3,6	5,3
67	0,9	1,8	3,9	5,0	2,1	3,2	25,6	26,8	6,3	7,9
108	1,9	3,7	5,2	5,9	1,0	2,0	3,0	4,8	1,8	3,7
117	0,7	2,7	5,0	5,7	2,4	3,3	4,3	6,2	2,3	4,1
100	1,0	3,0	1,8	2,8	0,1	1,1	3,2	5,0	1,3	3,3
125	1,3	3,2	7,3	8,0	0,6	1,5	10,8	11,5	3,6	5,5
98	1,2	3,2	5,8	6,7	0,6	1,6	4,6	6,3	1,3	3,2

Tab. 6: Anreicherungskonzentrationen

	Al ³⁺ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]
Anreicherungen	2	1	1	2	2

3.6 Verwendete Geräte im Überblick

Tab. 7: Verwendete Geräte bei der Laboranalytik.

Gerät	Verwendung
- Perkin-Elmer 3100 (Na ²⁺ -, K ⁺ -, Ca ²⁺ -, Mg ²⁺ -, Ba ²⁺ - Ionen) - Perkin-Elmer 3030 (Al ³⁺ -Ionen)	AAS
WTW: PH 330 i / SET	pH-Wert
D500 Röntgendiffraktometer von Siemens	Röntgendiffraktometer (zur Tonmineralbestimmung)

3.7 Bestimmungs- und Nachweisgrenzen

Die Bestimmungs- und Nachweisgrenze sind Parameter, die bei jedem analytischen Verfahren eine Rolle spielen und eine Aussage über die Verlässlichkeit der erhobenen Werte zulassen. Die Bestimmungsgrenze ist die kleinste Menge oder Konzentration eines Stoffes, die mit der geforderten statistischen Sicherheit bei einmaliger Analyse quantitativ mit einem Fehlerrisiko $\leq 5\%$ bestimmt werden kann. Dem gegenüber ist die Nachweisgrenze jene kleinste Menge oder Konzentration eines Stoffes, die mit einer geforderten statistischen Sicherheit bei einmaliger Analyse mit einem Fehlerrisiko von 5% qualitativ nachgewiesen werden kann. Bei gemessenen Konzentrationen, die in dem Bereich zwischen Bestimmungsgrenze und Nachweisgrenze liegen, ist das Fehlerrisiko größer als 5% (FUNK ET AL. 1985:61).

Tab. 8: Bestimmungs- und Nachweisgrenze für die Elemente Aluminium, Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium, Ausrechnung nach FUNK ET AL. 1985.

	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Anzahl der Konzentrationsstufen der Eichreihe	N = 17	N = 10	N = 8	N = 8	N = 10
Mittelwert der Eichkonzentration	X = 1,96	X = 2,38	X = 0,94	X = 0,94	X = 1,6
Mittelwert der Informationswerte	Y = 0,16	Y = 0,15	Y = 0,48	Y = 0,22	Y = 0,25
Achsenabschnitt der Eichgerade	$a_0 = 0$	$a_0 = 0,07$	$a_0 = 0,019$	$a_0 = 0,004$	$a_0 = 0,006$
Steigung der Eichgerade	$a_1 = 0,08$	$a_1 = 0,06$	$a_1 = 0,52$	$a_1 = 0,24$	$a_1 = 0,16$
Reststreuung/Reststandardabweichung	$s_y = 0,0038$	$s_y = 0,0046$	$s_y = 0,0069$	$s_y = 0,0047$	$s_y = 0,0014$
Verfahrensstandardabweichung	$s_{x_0} = 0,05$	$s_{x_0} = 0,08$	$s_{x_0} = 0,01$	$s_{x_0} = 0,02$	$s_{x_0} = 0,01$
Student-t-Faktor	$t = 1,75$ (F = 90%; f = N-2)	$t = 1,86$ (F = 90%; f = N-2)	$t = 1,94$ (F = 90%; f = N-2)	$t = 1,94$ (F = 90%; f = N-2)	$t = 1,86$ (F = 90%; f = N-2)
Bestimmungsgrenze	$x_B = 0,28$	$x_B = 0,50$	$x_B = 0,38$	$x_B = 0,14$	$x_B = 0,06$
Nachweisgrenze	$x_N = 0,10$	$x_N = 0,30$	$x_N = 0,10$	$x_N = 0,09$	$x_N = 0,04$

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird deutlich, dass die Elementkonzentrationen der Erdalkalimetalle zum größten Teil über der Bestimmungsgrenze und Nachweisgrenze liegen. Lediglich bei der Aluminiumionenkonzentration in den Quellen muss festgestellt werden, dass sich einige Werte unter der Bestimmungsgrenze, aber noch über der Nachweisgrenze, befinden. Anzumerken wäre, dass die Verfahrensstandardabweichung bei der Bestimmung aller Elemente sehr gering ist (vergl. Tab. 8).

3.8 Auswertung der Daten

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS (VERSION IBM SPSS STATISTICS 20) und Excel (VERSION 2007).

Um Zusammenhänge zwischen zwei Variablen nachzuweisen, wurde die Korrelationsanalyse durchgeführt. Besteht ein Zusammenhang zwischen zwei Variablen, bedeutet dies, dass „eine systematische Verbindung zwischen der Veränderung der einen Variablen und der Veränderung der anderen Variablen besteht.“ (HUIB 2011:29) Die Berechnung basiert „auf Wertepaaren, die aus den zugrunde liegenden abhängigen Stichproben gebildet werden.“ (BÜHL 2008:345) Die Stärke der Korrelation zwischen beiden Variablen wird mit dem Korrelationskoeffizienten angegeben. Dieser liegt zwischen -1 und +1, wobei ein Betrag nahe 1 einen starken und ein Betrag nahe 0 einen schwachen Zusammenhang zwischen den Variablen bedeutet (vergl. Tab. 9). Die Feststellung der Korrelation erfolgte zweiseitig auf einem Signifikanz-Niveau von mindestens 5%. Im Falle einer Intervallskalierung und Normalverteilung beider Variablen wurde der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach Pearson gebildet. War mindestens eine Variable nicht normalverteilt oder ordinalskaliert kam der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman zum Einsatz (BÜHL 2008, WALSER 2011). Zur Überprüfung der Normalverteilung einer Stichprobenmenge wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test zur Überprüfung der Verteilungsform durchgeführt. Eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung kann nachgewiesen werden, wenn die asymptotische Signifikanz $p < 0,05$ ist (BÜHL 2008).

Tab. 9: Abstufungen der Korrelationskoeffizienten zur verbalen Beschreibung, nach: BÜHL 2008.

Wert	Interpretation
bis 0,2	sehr geringe Korrelation
bis 0,5	geringe Korrelation
bis 0,7	mittlere Korrelation
bis 0,9	hohe Korrelation
über 0,9	sehr hohe Korrelation

Neben der Korrelationsprüfung wurde die Signifikanz-Prüfung durchgeführt. Dabei sollte untersucht werden, ob auftretende Mittelwertunterschiede auf zufällige Schwankungen zurückgehen oder nicht zufällig, sondern signifikant sind. Je nachdem, ob die Stichproben normalverteilt sind oder nicht, wurden verschiedene Testverfahren durchgeführt. Sind die Stichproben normalverteilt, wurde der t-Test für unabhängige Stichproben angewendet, waren die Stichproben nicht normalverteilt, wurde der U-Test nach Mann und Whitney durchgeführt. Bei beiden Untersuchungen wurde ein Signifikanz-Niveau bzw. eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% angesetzt.

4. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

4.1 Allgemeine Feststellungen

4.1.1 Bedeutung der untersuchten Parameter für Pflanzen und Umwelt

Jeder untersuchte chemische Parameter hat Einfluss auf die Pflanzen und die Umwelt im Einzugsgebiet der Quelle und darüber hinaus.

„Der pH-Wert beschreibt die Konzentration der Wasserstoff (H^+)-Ionen in der Bodenlösung und gibt den negativen dekadische Logarithmus der H^+ -Ionenkonzentration an: $pH = -\log [H^+]$ “ (GLAWION ET AL. 2009:367). Er ist das Maß der sauren oder alkalischen Reaktion einer wässrigen Lösung. Je größer die H^+ -Ionenkonzentration ist, desto tiefer ist der pH-Wert und desto saurer die Lösung. So besitzen Böden eine unterschiedlich große Kapazität Säuren abzupuffern. Die Säureneutralitätskapazität (SNK) wird umso schneller verbraucht, je mehr Protonen (H^+ -Ionen) dem Boden zugeführt werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:156). So besteht im Boden und in den Quellen ein sensibles System zwischen zugeführten Protonen, Pufferungsprozessen und einer eventuell eintretenden Versauerung.

Neben dem pH-Wert wurde die Konzentration verschiedener Kationen untersucht. Die Natriumionenkonzentration in Boden und Quellen ist für die Regelung des Wasserhaushaltes der Pflanzen wichtig. Vor allem die Na^+ -Konzentration der Bodenlösung und der Gehalt an austauschbarem Na^+ spielt eine Rolle (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:430). Da Natrium nur sehr schwach gebunden und daher leicht auswaschbar ist, erfolgt auch bei hoher Natriumzufuhr keine stärkere Anreicherung im Boden.

Kalium ist vor allem in Feldspäten und Glimmern gebunden. Im Boden liegt Kalium in verschiedenen Formen vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:423).

Magnesium wird von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und an die höheren Glieder der Nahrungskette weitergegeben. Es ist für alle Lebewesen ein essenzielles Makronährelement (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:428). Zudem reguliert es das Kationen/Anionen-Gleichgewicht in der Pflanze, ist Baustein wichtiger Pflanzeninhaltsstoffe und aktiviert viele Enzyme. Vor allem die Magnesiumionenkonzentration in der Bodenlösung und die Menge an austauschbarem Magnesium im Boden sind von Bedeutung.

Calcium ist für Pflanzen, Tiere und Menschen ein wichtiges Element. Die Calciumionenkonzentration in den Böden schwankt je nach pH-Wert sehr stark. In Oberböden mit pH-Werten um 7 beträgt der Calciumionenanteil an den austauschbaren Kationen über 80%, während er in extrem versauerten Waldböden nur noch weniger als 1-5% beträgt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:427).

Aluminium ist in gebundener Form als Aluminiumoxid für die Pflanzen nicht problematisch. Bei pH-Werten zwischen 5,0 und 4,5 werden die Aluminiumoxide aufgelöst, Tonminerale zerstört und aus den Silikaten werden Al^{3+} -Ionen freigesetzt, was zu einer irreversiblen

Degradierung der Böden führt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Die freigesetzten Al^{3+} -Ionen können zwar durch Komplexbildung festgesetzt und in die Zwischenschichten von aufgeweiteten Tonmineralen eingebaut werden, sind jedoch die Kapazitäten der Einbaumöglichkeiten ausgeschöpft, bleiben die Al^{3+} -Ionen frei. In dieser freien Form wirken sie toxisch auf die Pflanzen, besonders auf deren Feinwurzeln. Somit weist die Aktivität der Al^{3+} -Ionen die engste Korrelation zu Pflanzenschäden auf (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Vor allem Kulturpflanzen reagieren empfindlich auf Al-Species in der Bodenlösung, während Waldbäume oft besser an höhere Al-Konzentrationen angepasst sind (ELLING ET AL. 2013). Trotzdem führt die Mobilisierung von Al^{3+} -Ionen zu auffälligen Wurzelschäden (Wurzelfäulnis) und zur Konzentration der Feinwurzeln in den obersten Bodenschichten bei der Buche (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2012).

Das molare Ca/Al-Verhältnis spielt in Waldökosystemen eine entscheidende Rolle, da es ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von Säuretoxizität ist (MEIWES ET AL. 1984:41). Mehrere Studien konnten nachweisen, dass das Ca/Al-Molverhältnis in der Nährlösung für verschiedene Pflanzenkeimlinge der entscheidende Parameter zur Einschätzung der toxischen Wirkung ist (vgl. u.a. ROST-SIEBERT 1984, HÜTTERMANN 1983, BAUCH & SCHRÖDER 1982). Zudem werden die Ca/Al-, Mg/Al- und Ca+Mg+K/Al- Molverhältnisse „als Indikatoren für die Belastung von Bäumen durch Versauerung und für die Ableitung von Critical Loads verwendet.“ (ELLING ET AL 2013:150). Die Critical Loads stellen die höchsten Belastungen dar, die langfristig zu keinen schädlichen Effekten in Ökosystemen führen, da die Eintragsraten die Strukturen und Funktionen des Ökosystems nicht gefährden und von diesem toleriert werden (NAGEL & GREGOR 1999). Sie stellen eine langfristig ausgerichtete Eintragungsschwelle dar, die auf den Zeitraum von ca. 100 Jahren ausgerichtet ist (ELLING ET AL. 2013:329). Auch eine Studie in Schweden stellt die Wichtigkeit des Ca+Mg+K/Al-Molverhältnisse für die Beurteilung der Bodenversauerung heraus (SVERDRUP & WARFVINGE 1993).

Die Tonminerale spielen in Böden eine wichtige Rolle. Zwar kann man aufgrund von anderen Messergebnissen (wie z.B. der KAK der silikatischen Feinerde) Vermutungen über den Tonmineralbestand äußern, eine genaue Aussage ist jedoch nur mit größerem apparativem Aufwand möglich (vergl. BLUME ET AL. 2011:127; SCHLICHTING ET AL. 1995:153). „Die wichtigsten in Böden vorkommenden Tonminerale sind Kaolinite (bzw. die Kaolingruppe), Illite, Vermiculite und Chlorite (bzw. die Chloritgruppe).“ (BLUME ET AL 2011:126). Zusätzlich gibt es zwischen diesen noch viele Wechsellagerungen.

In vielen Böden sind aus den Verwitterungsprodukten primärer Silikate gebildete Tonminerale zu finden, die in der Regel in der Tonfraktion ($< 2\mu\text{m}$) vorkommen. Sie sind mit den Phyllosilicaten verwandt und verleihen Tongesteinen und tonigen Boden ihre Plastizität, ihre Quellfähigkeit und ihr Vermögen Ionen und Moleküle zu sorbieren (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:14). Die Tonminerale werden in Zweischicht- und

Dreischichttonminerale unterteilt, wobei die unterschiedliche Besetzung des Zwischenschichttraumes entscheidend ist.

Tab. 10: Einteilung und Eigenschaften der wichtigsten Tonminerale, nach: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:15.

Strukturtyp	Beispiel	Höhe der negativen Schichtladung pro Formeleinheit	Besetzung des Zwischenschichttraums
1:1- oder Zweischicht-Minerale	Kaolinit	0	–
	Halloysit	0	H ₂ O
	Serpentin	0	–
2:1- oder Dreischicht-Minerale	Illit	>0,6	K
	Vermiculit	0,6...0,9	austauschbare Kationen
	Smectit	0,2..0,6	austauschbare Kationen
	Chlorit	variabel	Hydroxid-Schicht

Wie in Tab. 10 deutlich wird, ist der entscheidende Unterschied zwischen den Zwei- und Dreischichttonmineralen, dass sich innerhalb der Zwischenschichten der Dreischichttonminerale austauschbare Kationen anlagern können und somit der Bodenversauerung entgegengewirkt wird.

Durch verschiedene Faktoren kann es zu Neubildungen und Umwandlungen der Tonminerale kommen. Bei dem Prozess der Veränderung der Zwischenschicht-Besetzung bleiben die Silicatschichten selbst erhalten und es verändert sich lediglich die Besetzung des Zwischenraumes. So können aus den Glimmern die K⁺-Ionen herausgelöst werden und durch andere Kationen, wie Ca²⁺- und Mg²⁺- Ionen ersetzt werden (vergl. Abb. 9).

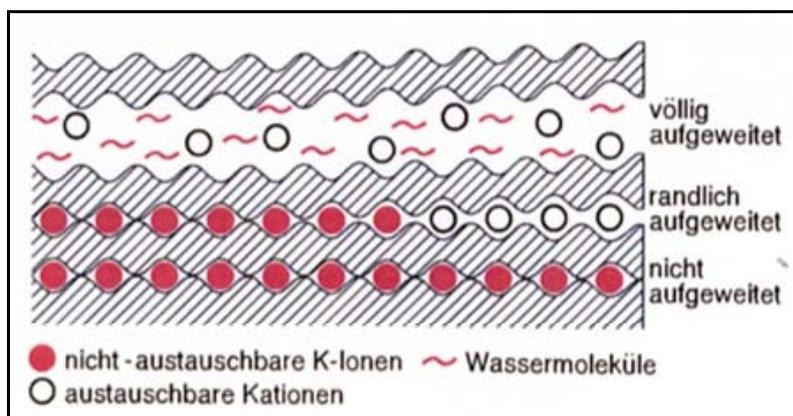


Abb. 9: Schema eines Glimmers mit einer nicht aufgeweiteten, einer randlich aufgeweiteten und einer durchgehend aufgeweiteten vermiculitischen oder smectitischen Schicht, aus: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:20.

4.1.2 Beobachtungen innerhalb der Bodenprofile

Zunächst werden einige Beobachtungen innerhalb der einzelnen Bodenprofile dargestellt, die unabhängig von Lage und Geologie in beiden Gebirgen und in den meisten Profilen nachweisbar sind.

Die H^+ -Ionenmenge nimmt mit der Bodentiefe in allen Profilen ab. Das bedeutet, dass mit zunehmender Bodentiefe die pH-Werte ansteigen und die Alkalität zunimmt. Diese Entwicklung innerhalb der Bodenprofile ist beispielhaft an drei Standorten in den Vogesen dargestellt (vergl. Abb. 10). Dabei wurde aus jeder Vogesenlage ein Standort ausgesucht: Standort 1 liegt am Vogesenkamm, Standort 2 an der Vogesenwestseite und Standort 3 an der Vogesenostseite.

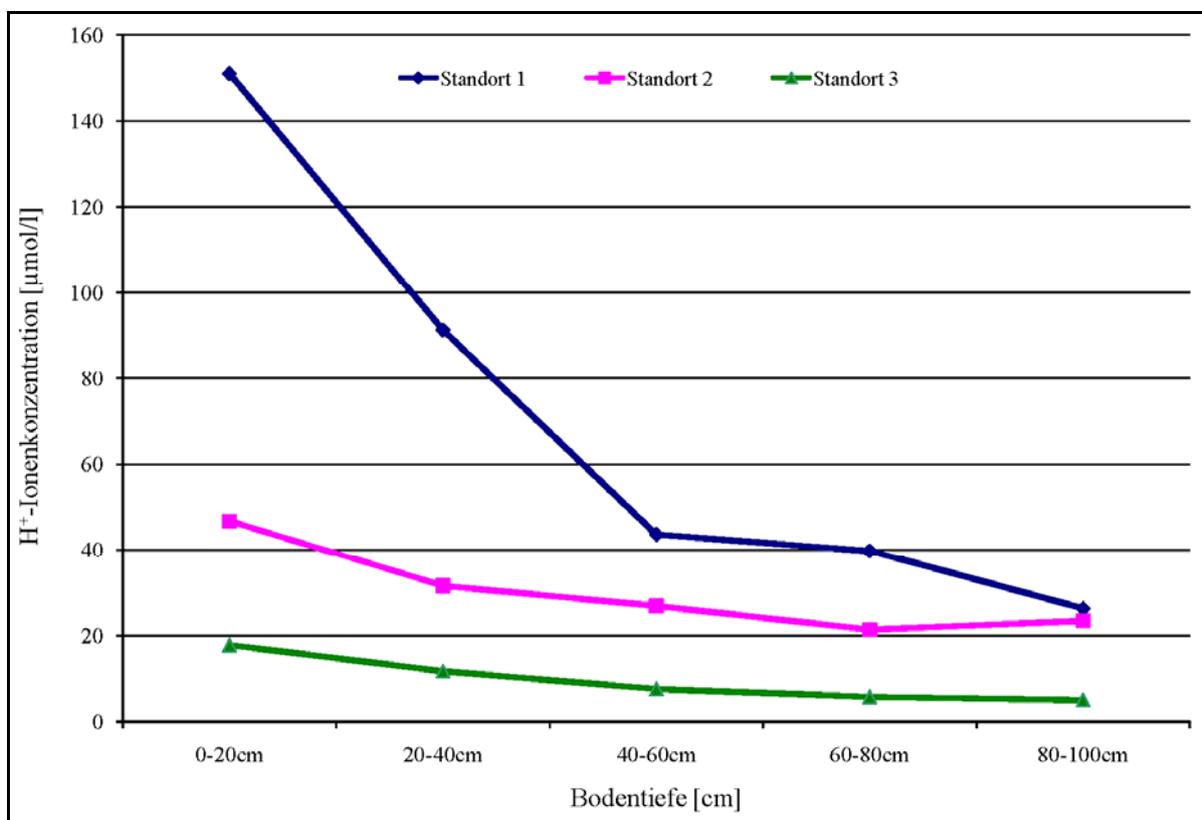


Abb. 10: H^+ -Ionenkonzentration in den verschiedenen Bodentiefen am Beispiel von drei ausgewählten Vogesenstandorten.

Die höchste Menge an H^+ -Ionen im Oberboden lässt sich durch zwei Vorgänge im Bodenprofil erklären. Zum einen fallen im Oberboden durch die mikrobielle Zersetzung toter Biomasse die meisten H^+ -Ionen an (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010) und zum anderen setzen mit zunehmender Bodentiefe die Pufferungsprozesse ein. Unter Pufferungsprozessen versteht man Prozesse, die die anfallenden Säuren wieder verbrauchen und somit der Versauerung entgegenwirken (STAHR ET AL. 2008:57). Innerhalb dieser chemischen Prozesse werden H^+ -Ionen reversibel oder irreversibel in eine undissoziierte Form überführt und somit abgepuffert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Dabei sind die verschiedenen

Puffersysteme in unterschiedlichen pH-Wertbereichen wirksam (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010 und STAHR ET AL. 2008:57-59). Hinzu kommt, dass der Oberboden durch den Eintrag von H^+ -Ionen im Niederschlag zusätzlich unter Stress gerät.

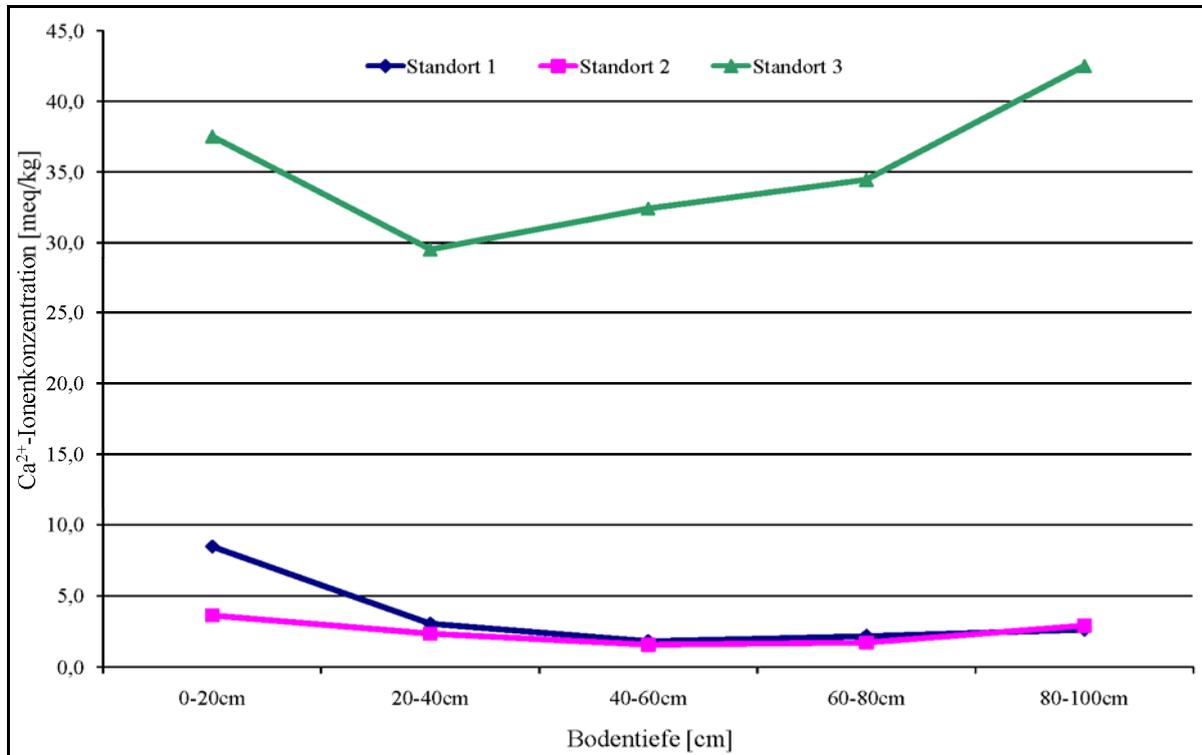


Abb. 11: Ca^{2+} -Ionenkonzentration in den verschiedenen Bodentiefen am Beispiel von drei ausgewählten Vogesenstandorten

Die Wirkung der Pufferungssysteme lässt sich auch anhand des Verlaufes der Kationenkonzentrationen innerhalb der Bodenprofile zeigen. Bis in eine gewisse Bodentiefe nimmt zum Beispiel die Ca^{2+} -Ionenkonzentration ab, um dann wieder anzusteigen (vergl. Abb. 11). Gleiches ist bei der Mg^{2+} -Ionenkonzentration zu beobachten.

In den Bodentiefen, in denen die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration abnimmt, sind Pufferungsprozesse aktiv, innerhalb derer Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen zur Bindung von H^+ -Ionen verwendet werden. Daher nimmt die Menge der freien Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen ab. In den tieferen Bodentiefen fallen weniger H^+ -Ionen an, die gepuffert werden müssen und die Menge an freien Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen steigt wieder an.

Eine wichtige Größe, um den Zustand der Böden festzustellen, ist die Kationenaustauschkapazität (KAK). Innerhalb dieser Untersuchung wurde die effektive Kationenaustauschkapazität bestimmt. „Die effektive Kationenaustauschkapazität KAK_{eff} ist die Kationenaustauschkapazität beim jeweiligen pH-Wert des Bodens.“ (STAHR ET AL. 2008:61). Die potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) wird bei pH-Werten zwischen 7,5 und 8,2 gemessen und ist die höchste Austauschkapazität, die in natürlichen Böden

erwartet wird. Je mehr sich der pH-Wert 7 nähert, desto mehr nähern sich die KAK_{eff} und die KAK_{pot} an (vergl. Abb. 12).

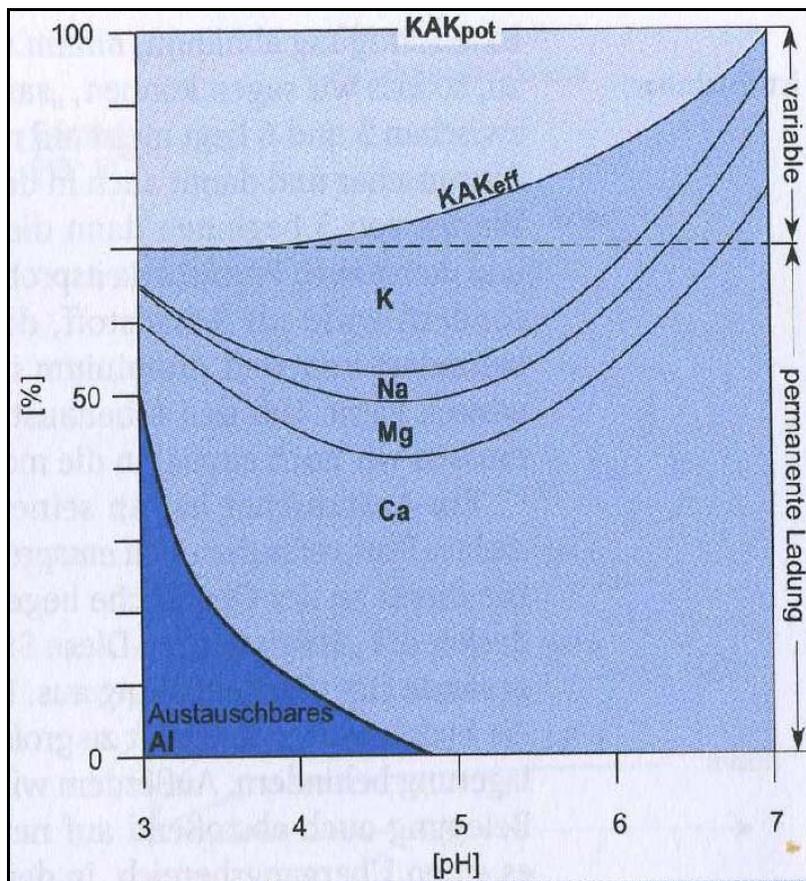


Abb. 12: Schematische Darstellung der KAK_{eff} und des Kationenbelages (in% von $KAK_{pot.}$) eines schluffig-lehmigen Bodenhorizontes mit 2-3 % organischer Substanz (frei nach Schachtschabel), aus: STAHR ET AL. 2008:61.

Neben der KAK_{eff} wurde die Lage der Versauerungsfront in den Bodenprofilen betrachtet. Dabei wurde der Verlauf der Mg^{2+} - und Ca^{2+} -Ionenkonzentration mit zunehmender Bodentiefe näher untersucht. In der Bodentiefe, in der die Ca^{2+} - und/oder Mg^{2+} -Ionenkonzentration wieder ansteigt, lässt sich die Versauerungsfront lokalisieren (vergl. u.a. ULRICH 1989). Bis in diese Bodentiefe werden die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen zur Abpufferung der anfallenden H^+ -Ionen genutzt. Als Folge sinkt die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration ab. Je tiefgründiger die Böden versauert sind, desto tiefer ist die Versauerungsfront vorgerückt.

Unter Berücksichtigung des Problems der Bodenversauerung spielt der Prozess der Tonmineralumwandlung eine besondere Rolle. Dabei wird unter sich durch die fortschreitende Verwitterung ändernden Bedingungen aus verschiedenen Mineralen Aluminium freigesetzt und zwischen den Schichten aufgeweiteter Dreischichttonminerale eingelagert. In Abb. 13 sind die wichtigsten Bildungs- und Umbildungspfade der Tonminerale dargestellt.

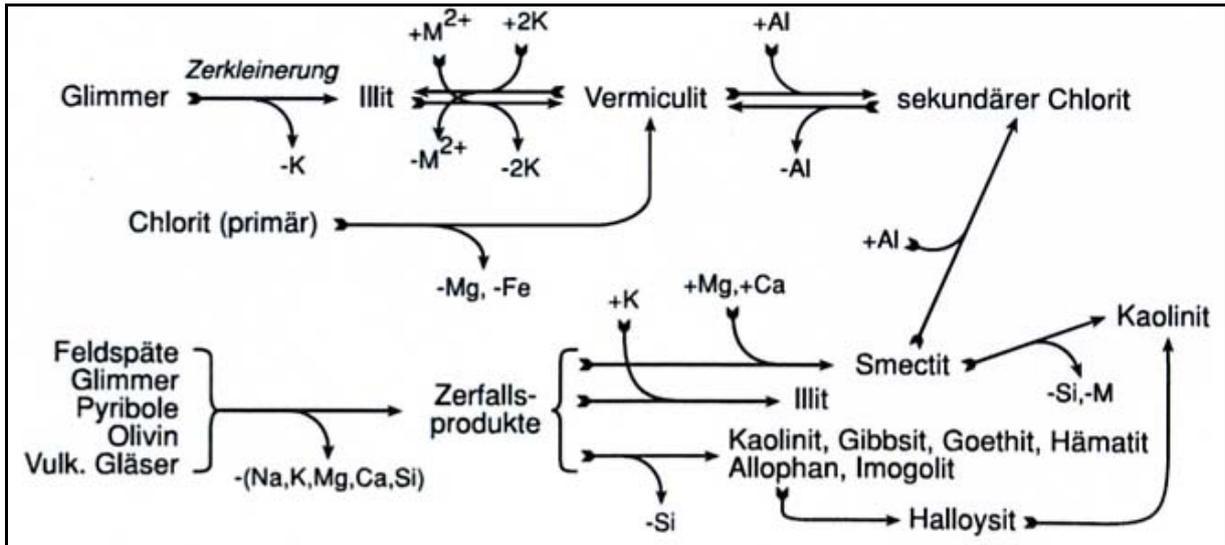


Abb. 13: Bildungs- und Umbildungspfade der Tonminerale (M = Metallkation), aus: SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:21.

4.2 Einfluss des Reliefs in den Vogesen

4.2.1 Einfluss des Reliefs auf den Quellgewässerchemismus

Die topographische Lage der Quellen in den Vogesen hat einen großen Einfluss auf deren chemische Parameter.

Die H^+ -Ionenkonzentration ist in den verschiedenen Lagen sehr unterschiedlich (vergl. Abb. 14). In den Granitquellen an der Westseite beträgt die mittlere H^+ -Ionenkonzentration $3,9 \mu\text{mol/l}$, am Kamm $3,7 \mu\text{mol/l}$ und an der Ostseite $0,6 \mu\text{mol/l}$. Somit sind die pH-Werte an der Westseite und am Kamm deutlich niedriger als an der Ostseite. In den Buntsandsteinquellen lassen sich an der Westseite im Mittel $1,0 \mu\text{mol/l}$, am Kamm $19,6 \mu\text{mol/l}$ und an der Ostseite $0,3 \mu\text{mol/l}$ nachweisen. Die pH-Werte sind am Kamm deutlich am niedrigsten und an der Ostseite am höchsten (vergl. Tab. A. 27 im Anhang). Die Unterschiede zwischen den Lagen sind auf beiden geologischen Untergründen auf einem Signifikanzniveau von 95% signifikant.

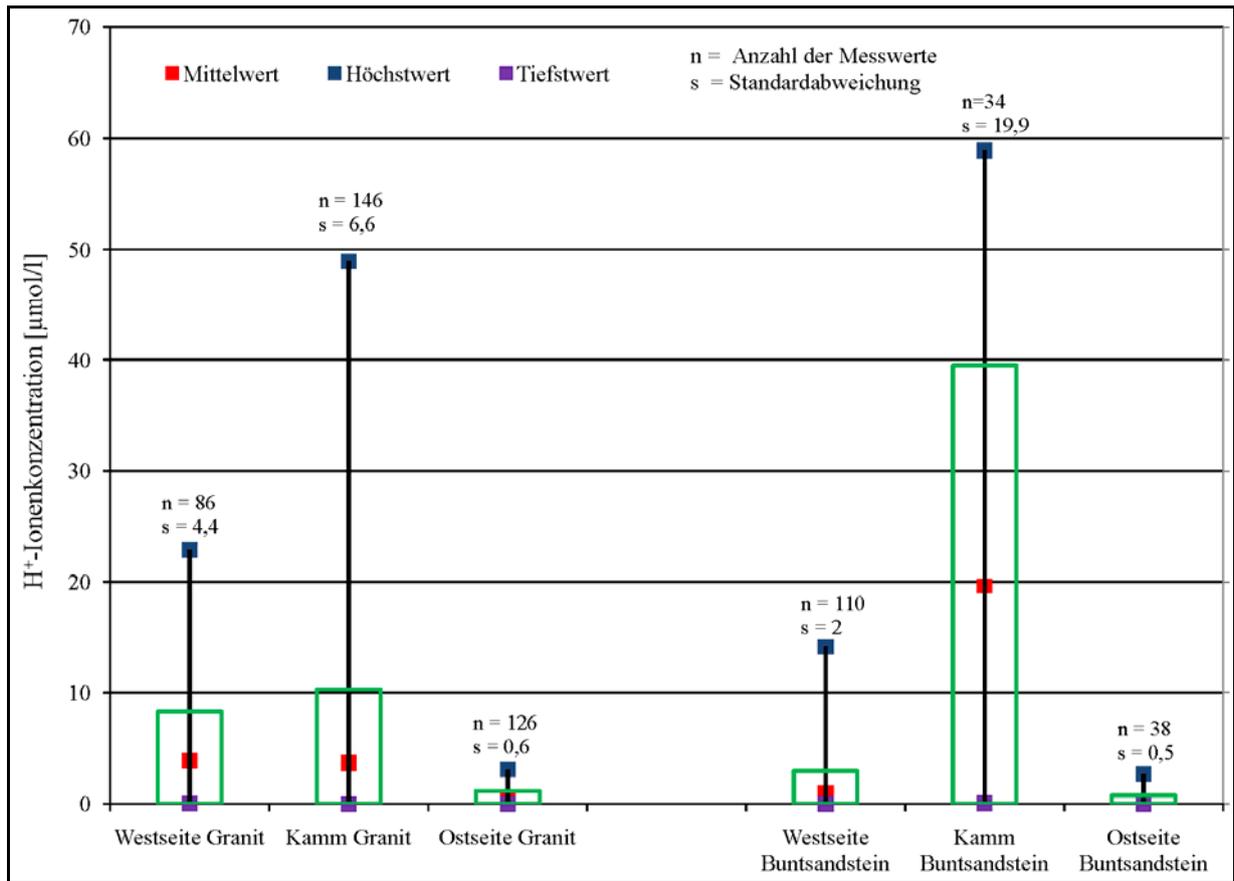


Abb. 14: H⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Neben der H⁺-Ionenkonzentration zeigen auch die Elementmengen deutliche Unterschiede je nachdem in welcher Vogesenlage sich die Quelle befindet.

Die Al³⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen der Westseite liegt im Mittel bei 1,0 mg/l, am Kamm bei 0,7 mg/l und an der Ostseite bei 1,2 mg/l (vergl. Abb. 15). Ähnlich ist die Situation im Buntsandstein. Die Al³⁺-Ionenkonzentration ist an der Ostseite mit einer mittleren Konzentration von 1,7 mg/l deutlich am höchsten, während sie am Kamm und an der Westseite mit einem mittleren Wert von 0,9 mg/l deutlich niedriger ist. Die Unterschiede zwischen den Granitquellen der Westseite und des Kammes, sowie des Kammes und der Ostseite sind signifikant, während im Buntsandstein die Unterschiede zwischen den Quellen der West- und Ostseite, sowie des Kammes und der Ostseite signifikant sind.

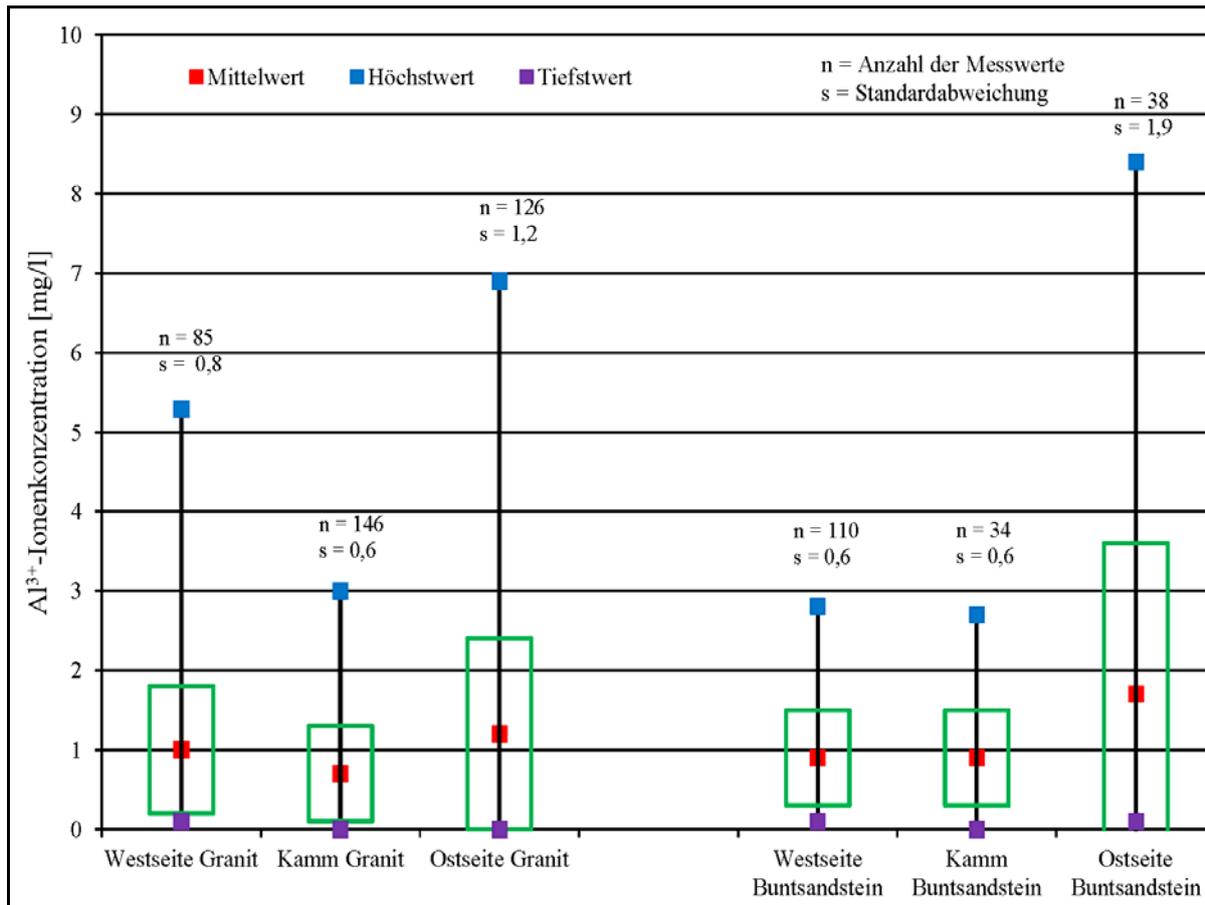


Abb. 15: Al³⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Die K⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen an der Westseite beträgt im Mittel 0,5 mg/l, am Kamm 0,4 mg/l und an der Ostseite 1,1 mg/l, womit an der Ostseite die höchsten K⁺-Ionenkonzentrationen nachgewiesen werden konnten. In den Buntsandsteinquellen liegt die K⁺-Ionenkonzentration bei einem Mittelwert von 1,2 mg/l an der Westseite und am Kamm und bei 1,9 mg/l an der Ostseite, sodass auch in den Buntsandsteinquellen die Konzentrationen an der Ostseite am höchsten sind (vergl. Abb. 16). Die Unterschiede sind in den Granitquellen zwischen allen Lagen signifikant. Im Buntsandstein lassen sich nur zwischen den Quellen an der Westseite und am Kamm keine signifikanten Unterschiede nachweisen.

Die Na⁺-Ionenkonzentration beträgt in den Granitquellen im Mittel an der Westseite 4,8 mg/l, am Kamm 2,9 mg/l und an der Ostseite 6,3 mg/l. Somit lassen sich an der Ostseite die höchsten Na⁺-Ionenkonzentrationen nachweisen und am Kamm die niedrigsten. In den Buntsandsteinquellen ist die Na⁺-Ionenkonzentration an der Westseite mit einer mittleren Konzentration von 1,9 mg/l am niedrigsten und am Kamm mit 5,7 mg/l am höchsten (vergl. Abb. 17). Die Unterschiede sind auf beiden geologischen Untergründen zwischen allen Lagen signifikant.

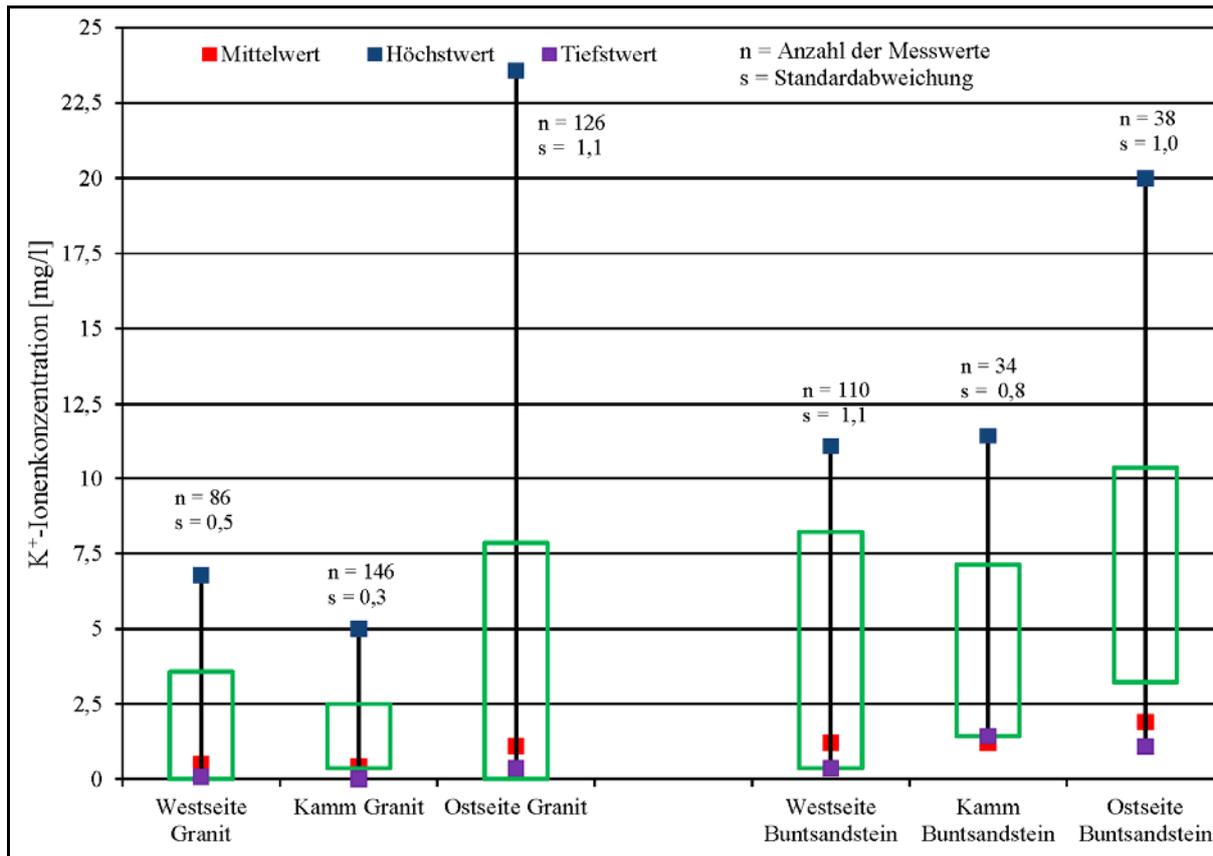


Abb. 16: K⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Auch die Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Quellen lassen den Schluss zu, dass die Topographie einen erheblichen Einfluss auf den chemischen Zustand der Quellen hat (vergl. Abb. 18 und Abb. 19).

Die Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen an der Westseite beträgt im Mittel 2,8 mg/l und ist am niedrigsten, während die mittlere Konzentration an der Ostseite bei 7,8 mg/l liegt. In den Buntsandsteinquellen lässt sich an der Westseite eine mittlere Konzentration von 11,8 mg/l und am Kamm von 4,7 mg/l nachweisen, während die Konzentrationen an der Ostseite mit einem Mittelwert von 14,7 mg/l deutlich höher sind. Die Unterschiede sind im Granit zwischen den Quellen der West- und Ostseite, sowie zwischen den Quellen des Kammes und der Ostseite signifikant. Im Buntsandstein hingegen sind die Unterschiede zwischen den Quellen der Westseite und des Kammes, sowie des Kammes und der Ostseite signifikant.

Die Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen ist an der Westseite mit 2,2 mg/l im Mittel am niedrigsten und an der Ostseite mit 11,0 mg/l am höchsten. Auch in den Buntsandsteinquellen lassen sich an der Ostseite mit 19,6 mg/l die höchsten Ca²⁺-Ionenkonzentrationen nachweisen. An der Westseite und am Kamm sind die Mittelwerte mit 11,0 mg/l bzw. 3,7 mg/l am niedrigsten. Die Unterschiede sind auf beiden geologischen Untergründen zwischen allen Lagen auf einem Signifikanzniveau von 95% signifikant.

Interaktion von Böden und Quellgewässern

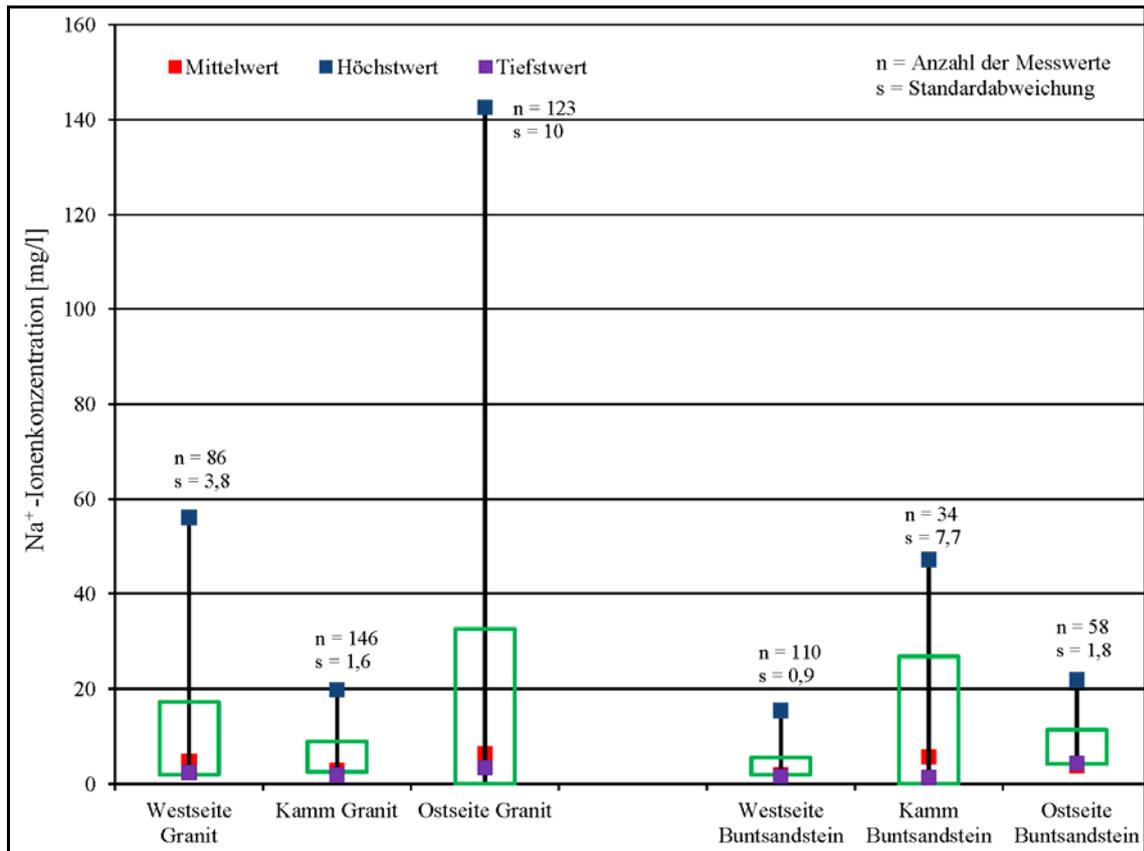


Abb. 17: Na⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

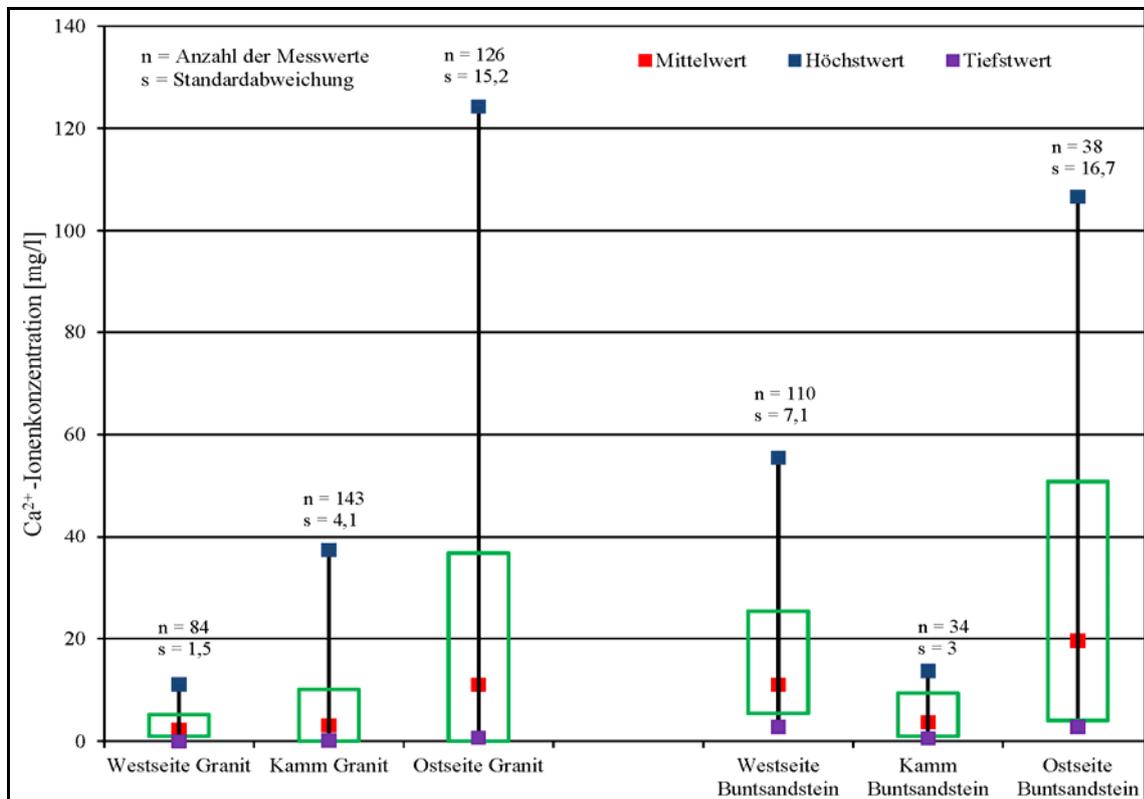


Abb. 18: Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

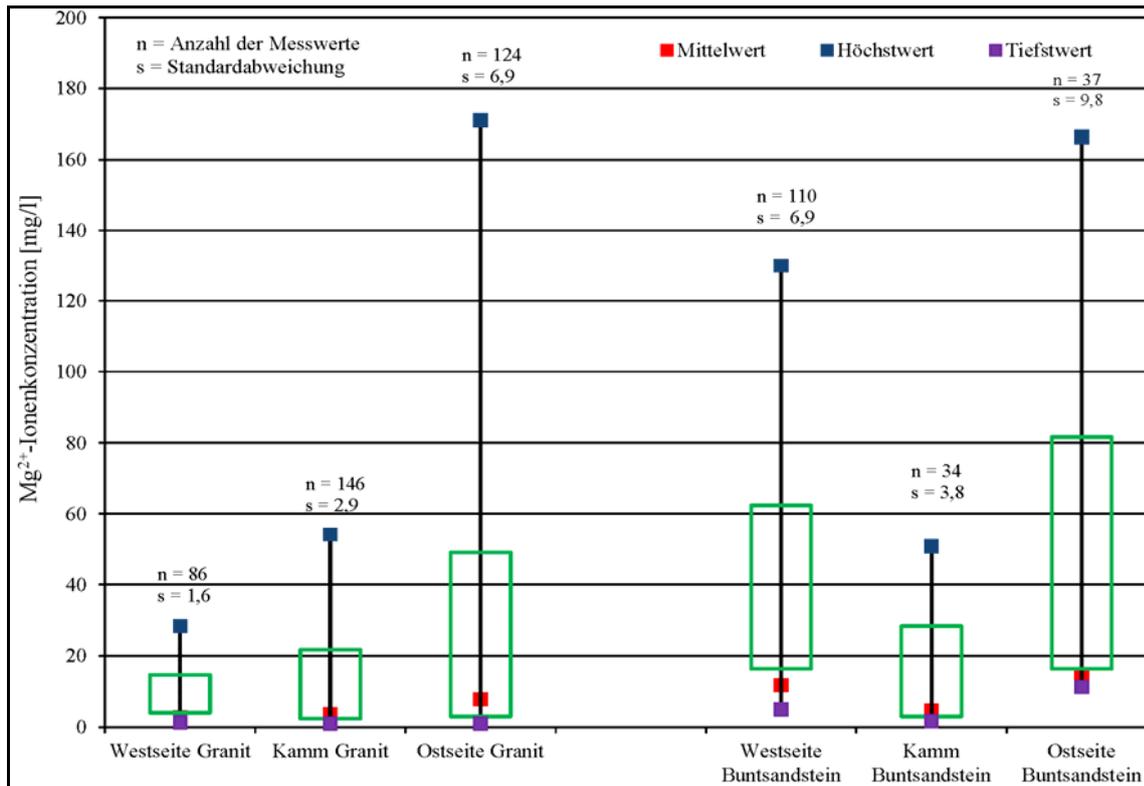


Abb. 19: Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Tab. 11: Mittelwerte (mg/l bzw. µmol/l) und Standardabweichungen der Elementkonzentrationen und der H⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
H ⁺ -Ionenkonzentration	3,9	4,4	3,7	6,6	0,6	0,6	1,0	2,0	19,6	19,9	0,3	0,5
Na ⁺ -Ionenkonzentration	4,8	3,8	2,9	1,6	6,3	10,0	1,9	0,9	5,7	7,7	3,9	1,8
K ⁺ -Ionenkonzentration	0,5	0,5	0,4	0,3	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	0,8	1,9	1,0
Ca ²⁺ -Ionenkonzentration	2,2	1,5	3,1	4,1	11,0	15,2	11,0	7,1	3,7	3,0	19,6	16,7
Mg ²⁺ -Ionenkonzentration	2,8	1,6	3,6	2,9	7,8	6,9	11,8	6,9	4,7	3,8	14,7	9,8
Al ³⁺ -Ionenkonzentration	1,0	0,8	0,7	0,6	1,2	1,2	0,9	0,6	0,9	0,6	1,7	1,9

Die Tatsache, dass die Unterschiede verschiedener chemischer Parameter in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen in den meisten Fällen auf einem Niveau von 95% signifikant sind, lässt den Schluss zu, dass das Relief der Vogesen einen entscheidenden Einfluss auf den chemischen Zustand der Quellgewässer hat.

Auch die genauere Betrachtung der Ionenkonzentrationen bei einer Beprobung zeigt den Einfluss des Reliefs. In Abb. 20 sind die Mittelwerte der Ionenkonzentrationen der Vogesenquellen in den verschiedenen Lagen innerhalb der 3. Beprobung dargestellt (Zuordnung der 3. Beprobung vergl. Tab. 4).

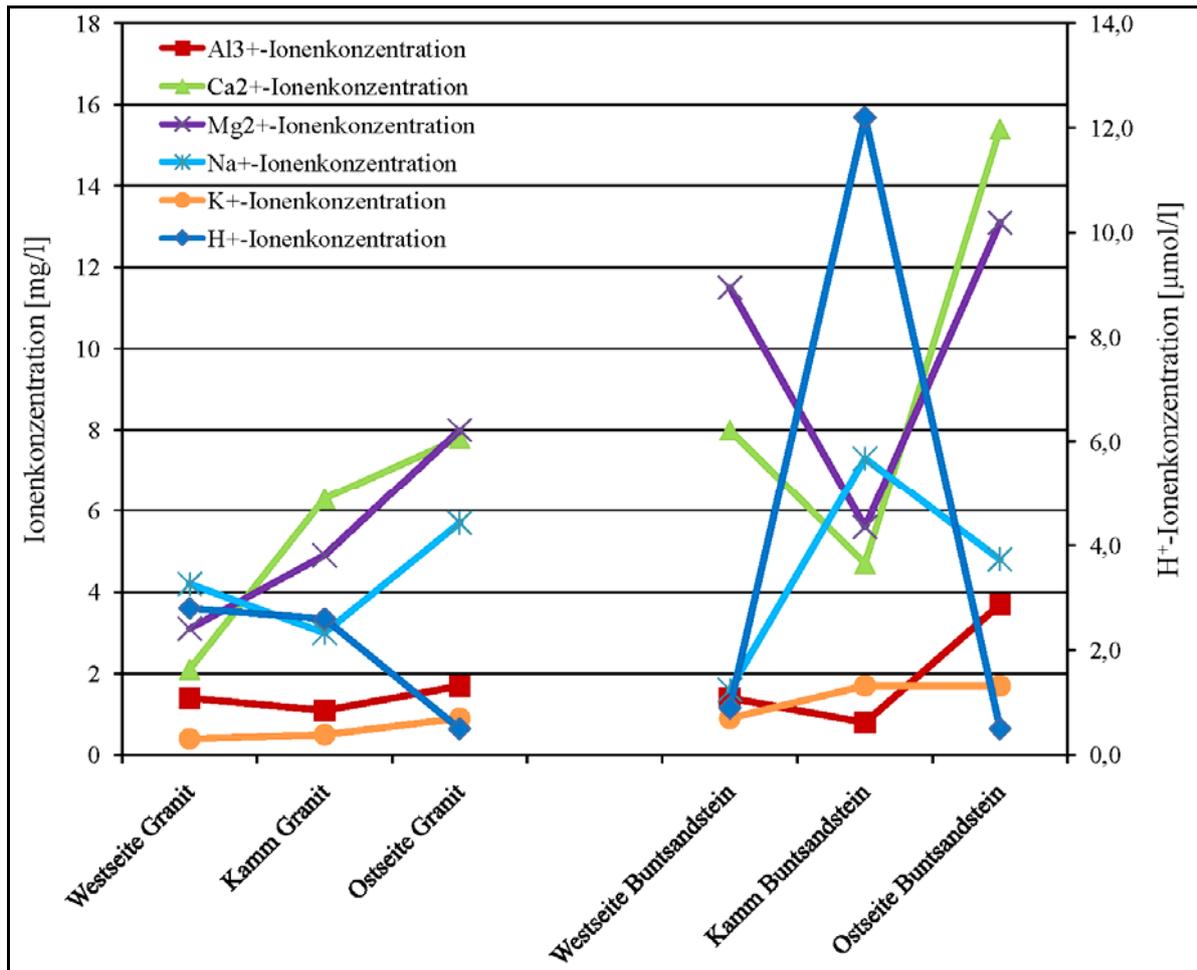


Abb. 20: Ionenkonzentrationen in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen (3. Beprobung).

Es wird deutlich, dass die Ca²⁺- und die Mg²⁺-Ionenkonzentration an der Ostseite am höchsten sind. Die H⁺-Ionenkonzentration hingegen ist am Kamm am höchsten und an der Vogesenostseite am niedrigsten. Somit wird der signifikante Einfluss des Reliefs auch bei einer Einzelbeprobung deutlich (vergl. Tab. 12).

Tab. 12: Ionenkonzentrationen in den Vogesenquellen (MW der verschiedenen Lagen) innerhalb der 3. Beprobung.

	H ⁺ -Ionen [μmol/l]	Al ³⁺ -Ionen [mg/l]	Ca ²⁺ -Ionen [mg/l]	Mg ²⁺ -Ionen [mg/l]	Na ⁺ -Ionen [mg/l]	K ⁺ -Ionen [mg/l]
Westseite Granit	2,8	1,4	2,1	3,1	4,2	0,4
Kamm Granit	2,6	1,1	6,3	4,9	3	0,5
Ostseite Granit	0,5	1,7	7,8	8	5,7	0,9
Westseite Buntsandstein	0,9	1,4	8	11,5	1,6	0,9
Kamm Buntsandstein	12,2	0,8	4,7	5,6	7,3	1,7
Ostseite Buntsandstein	0,5	3,7	15,4	13,1	4,8	1,7

4.2.2 Einfluss des Reliefs auf den Bodenchemismus

Die Böden in den Quellgebieten weisen pH-Werte zwischen 3 und 6 auf. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen dem Zustand der Böden innerhalb der verschiedenen Vogesenlagen, was auch anhand der Kationenkonzentrationen nachgewiesen werden konnte. Somit zeigt die räumliche Verbreitung der unterschiedlichen Bodenzustände den Einfluss der Topographie auf.

Die H^+ -Ionenkonzentration in den Granitböden an der Westseite beträgt im Oberboden im Mittel 146,2 $\mu\text{mol/l}$ und in 80-100 cm Bodentiefe 43,8 $\mu\text{mol/l}$ (vergl. Tab. 13, Abb. 21 und Abb. 22). Dies entspricht nach STAHR ET AL. einem Säuregrad von stark bis sehr stark sauer (STAHR ET AL. 2008:55). Im Buntsandstein lassen sich im Oberboden 108,6 $\mu\text{mol/l}$ H^+ -Ionen und in 80-100cm Bodentiefe 29,8 $\mu\text{mol/l}$ nachweisen, was eine Einstufung des Säuregrades von stark sauer bedeutet. Somit sind die Böden an der Westseite im Oberboden sehr stark bis stark und in 80-100 cm Bodentiefe stark sauer. Tendenziell liegt also eine starke Versauerung mit pH-Werten von unter 4 vor.

Am Kamm lassen sich im Granit im Oberboden im Mittel H^+ -Ionenkonzentrationen von 154,5 $\mu\text{mol/l}$ nachweisen und im Unterboden beträgt die mittlere H^+ -Ionenkonzentration 32,0 $\mu\text{mol/l}$. Im Buntsandstein ist die mittlere H^+ -Ionenkonzentration mit 139,7 $\mu\text{mol/l}$ im Oberboden und auch in 80-100 cm (im Mittel 31,8 $\mu\text{mol/l}$) etwas geringer als im Granit. Die Böden sind mit stark sauer einzustufen (STAHR ET AL. 2008:55).

An der Ostseite beträgt die mittlere H^+ -Ionenkonzentration im Granit im Oberboden 41,5 $\mu\text{mol/l}$ und in 80-100 cm Bodentiefe 13,9 $\mu\text{mol/l}$. Im Buntsandstein lässt sich eine mittlere H^+ -Ionenkonzentration im Oberboden von 55,7 $\mu\text{mol/l}$ und in 80-100 cm von 17,9 $\mu\text{mol/l}$ nachweisen, was einer Einstufung als stark sauer entspricht.

Bei der Betrachtung der H^+ -Ionenmenge im Boden in den verschiedenen Vogesenlagen wird deutlich, dass die Böden im Granit und im Buntsandstein an der Westseite und am Kamm deutlich mehr H^+ -Ionen enthalten als die Böden an der Ostseite und somit stärker versauert sind. Die Unterschiede sind im Oberboden am größten und nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab. Zwischen der H^+ -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesenwest- und der Vogesenostseite, sowie des Vogesenkamms und der Vogesenostseite sind die Unterschiede sowohl im Ober- als auch Unterboden signifikant. In den Buntsandsteinböden hingegen lassen sich sowohl im Ober- als auch im Unterboden zwischen keiner der Lagen signifikante Unterschiede nachweisen.

Insgesamt ist der Säuregrad der Böden auf beiden geologischen Untergründen an der Westseite und am Kamm als sehr stark sauer und an der Ostseite als stark sauer einzustufen.

Tab. 13: H⁺-Ionenkonzentration (µmol/l) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	146,2	123,8	154,5	123,4	41,5	35,9	108,6	90,3	139,7	90,8	55,7	50,5
80-100 cm	43,8	47,6	32,0	29,4	13,9	9,5	29,8	38,6	31,8	26,5	17,9	21,0

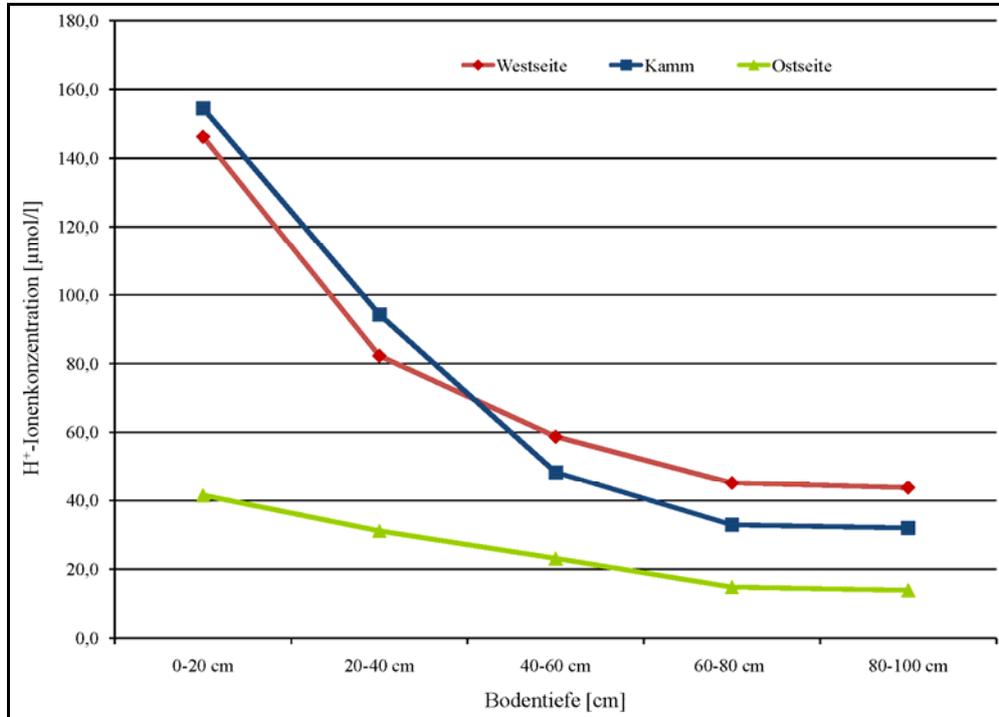


Abb. 21: H⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

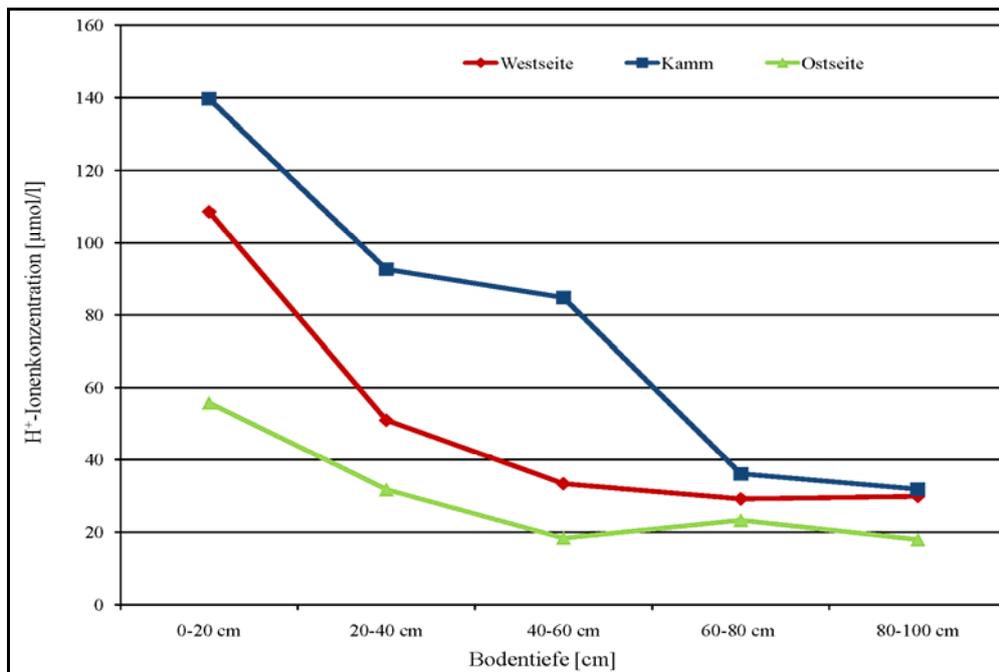


Abb. 22: H⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

Auch die Elementkonzentrationen zeigen die Abhängigkeit vom Vogesenrelief.

Die Al^{3+} -Ionenkonzentration an der Westseite in den Böden auf Granit beträgt im Oberboden im Mittel 23,1 meq/kg und in 80-100 cm Bodentiefe 6,4 meq/kg. In den Böden auf Buntsandstein lassen sich im Oberboden mittlere Konzentrationen von 15,8 meq/kg und in 80-100 cm Bodentiefe von 6,9 meq/kg nachweisen (vergl. Tab. 14, Abb. 23 und Abb. 24).

Am Kamm sind die Konzentrationen in den Granit- und Buntsandsteinböden im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe mit 47,9 meq/kg und 16,1 meq/kg bzw. 19,6 meq/kg und 13,2 meq/kg deutlich höher als an der Westseite.

Die Böden an der Ostseite hingegen enthalten sowohl im Granit als auch im Buntsandstein im Ober- und Unterboden deutlich weniger Al^{3+} -Ionen als die Böden an der Westseite und am Kamm.

Tab. 14: Al^{3+} -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	23,1	10,2	47,9	18,0	17,3	13,3	15,8	9,9	19,6	8,3	9,4	9,0
80-100 cm	6,4	5,6	16,1	10,8	7,7	7,5	6,9	5,7	13,2	7,8	6,9	8,6

Auffällig ist die Anreicherung von Al^{3+} -Ionen in den Granitböden der Vogesenwestseite in 40-60 cm Bodentiefe (vergl. Abb. 23 und Tab. 15).

Tab. 15: Al^{3+} -Ionenkonzentration (meq/kg) in den Bodentiefen der verschiedenen Standorte an der Vogesenwestseite.

Standortnummer	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
A	4,8	21,3	13,0	0,0	0,0
B I	13,5	10,3		7,7	7,9
B II	26,7	17,4	81,0	5,9	6,2
B III	17,7	13,8	129,0	8,8	5,1
C I	23,5	15,6	109,0	6,3	9,3
C II	20,8	10,0	73,0	6,8	
C III	18,7	16,5	152,0	13,5	7,5
D	25,9	10,1	72,0	4,4	0,3
E	12,0	8,9	55,0	5,0	5,1
F I	37,6	26,6	202,0	4,0	2,7
F II	26,7	19,8	78,0	3,4	23,8
G I	21,1	20,2	85,0	3,6	4,3
G II	38,0	24,5	55,0	5,0	8,6
G III	22,1	13,3	68,0	5,9	6,1
U	17,1	12,2	86,0	5,9	6,9
AY	44,0	34,7	268,0	0,0	2,8

Diese Anreicherung in allen Bodenprofilen der Granitböden an der Westseite lässt sich damit erklären, dass in diesem Bereich bereits weit entwickelte Podsolböden vorzufinden sind. Bei dem Prozess der Podsolierung handelt es sich um eine „abwärts gerichtete Umlagerung gelöster organischer Stoffe, oft zusammen mit komplex gebundenem Aluminium und Eisen.“ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010:289) Die Podsolierung läuft bei stark saurer Reaktion ab und auch ein kühlfeuchtes Klima kann zum Ablauf von Podsolierungsprozessen führen, da die Organismenaktivität gehemmt wird und Nährstoffmangel herrscht. Die umgelagerten Stoffe werden innerhalb von Ausfällungsprozessen im Unterboden angereichert und ausgeschieden, sodass in bestimmten Bodentiefen eine erhöhte Al^{3+} -Ionenkonzentration nachweisbar ist.

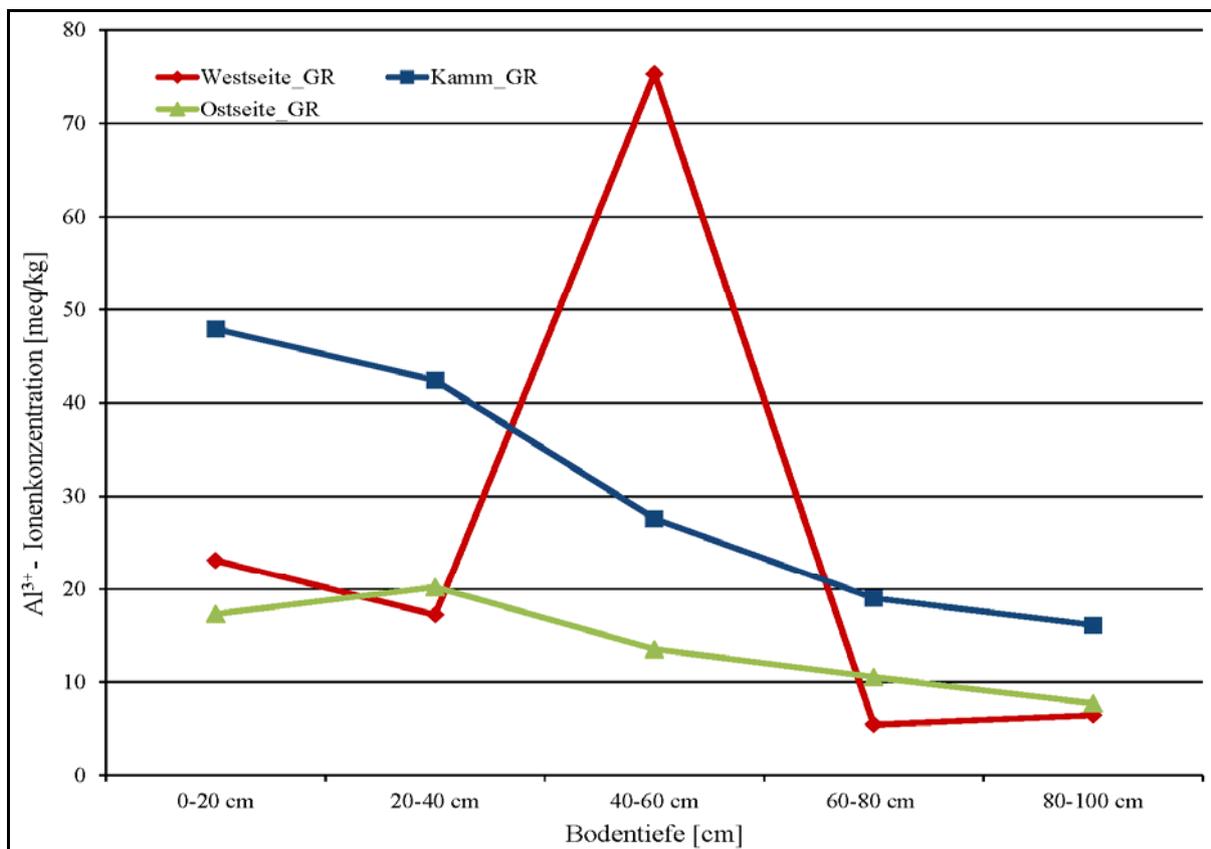


Abb. 23: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

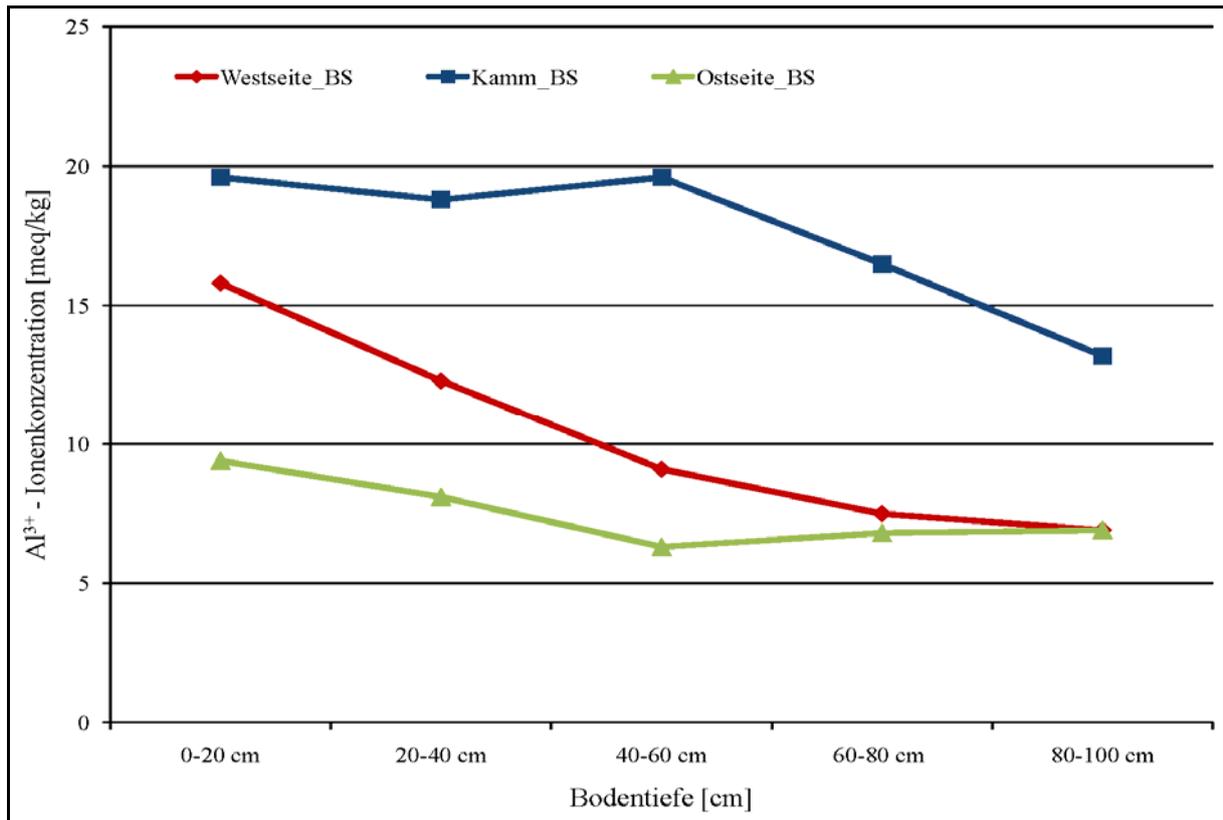


Abb. 24: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

Somit wird deutlich, dass im Granit und im Buntsandstein am Kamm in allen Bodentiefen die höchsten Al^{3+} -Ionenkonzentrationen nachgewiesen werden konnten. An der Ostseite sind die Konzentrationen vor allem im Oberboden deutlich niedriger. Die Unterschiede sind zwischen Westseite und Kamm, sowie Kamm und Ostseite signifikant.

Die K^+ -Ionenkonzentration in den Granitböden an der Westseite beträgt im Oberboden im Mittel 2,1 meq/kg und in 80-100 cm Bodentiefe 0,6 meq/kg. In den Buntsandsteinböden an der Westseite ist die Kaliumkonzentration im Oberboden mit einem Mittelwert von 1,0 meq/kg und in 80-100 cm Bodentiefe von 0,5 meq/kg geringer als in den Granitböden.

Am Kamm lassen sich in den Granitböden im Oberboden K^+ -Konzentrationen im Mittel von 1,2 meq/kg nachweisen und in 80-100cm Bodentiefe von 0,4 meq/kg. Auch hier sind in den Buntsandsteinböden die mittleren K^+ -Konzentrationen im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe geringer (0,6 meq/kg und 0,2 meq/kg) (vergl. Tab. 16, Abb. 25 und Abb. 26).

An der Ostseite lassen sich im Oberboden der Granitstandorte mittlere K^+ -Ionenkonzentration von 1,3 meq/kg nachweisen und in 80-100cm Bodentiefe mittlere Werte von 0,7 meq/kg, während in den Buntsandsteinböden die mittleren Konzentrationen im Oberboden mit 1,5 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe mit 1,1 meq/kg höher sind. In den meisten Fällen sind die Unterschiede jedoch nicht signifikant.

Tab. 16: K⁺-Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	2,1	0,8	1,2	0,3	1,3	0,8	1,0	0,8	0,6	0,2	1,5	1,4
80-100 cm	0,6	0,5	0,4	0,2	0,7	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	1,1	0,9

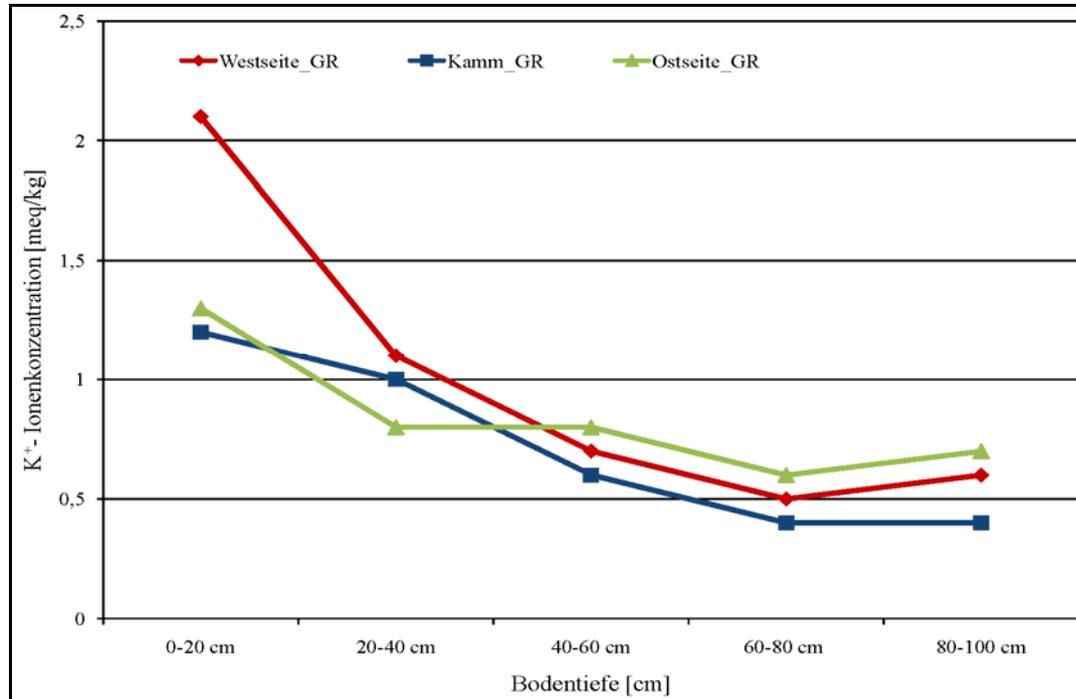


Abb. 25: K⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

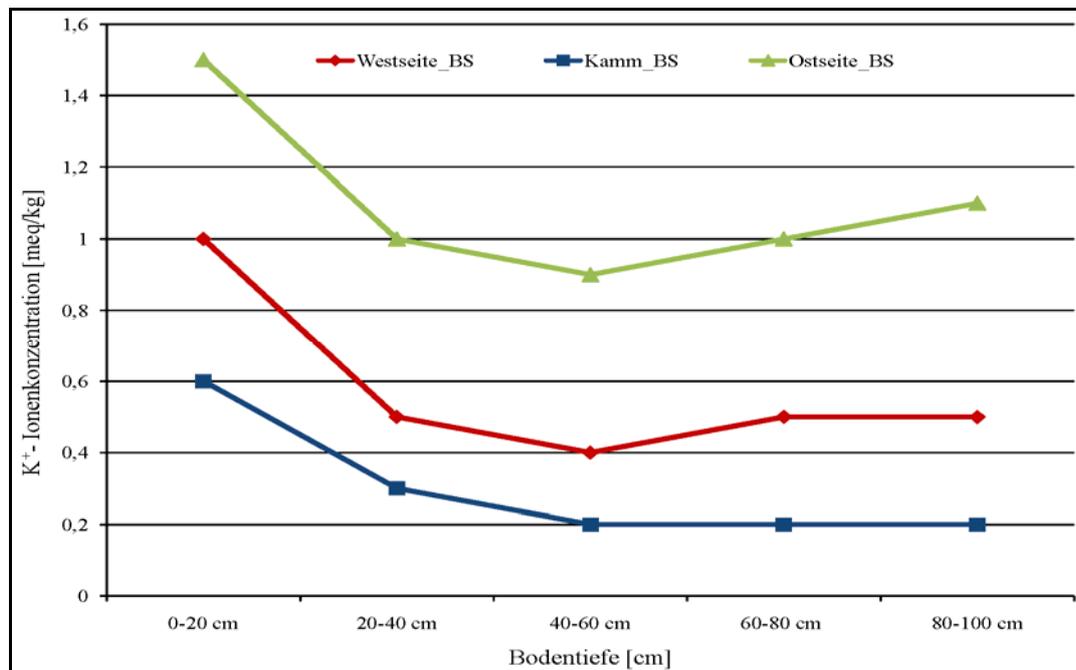


Abb. 26: K⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

In den Granitböden an der Westseite liegt die Na⁺-Ionenkonzentration im Oberboden im Mittel bei 2,9 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe bei 2,5 meq/kg. In den Buntsandsteinböden liegen die Werte im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe mit Werten von 2,8 meq/kg und 2,5 meq/kg in ähnlichen Konzentrationsbereichen.

Am Kamm lässt sich in den Granitböden im Oberboden ebenfalls eine mittlere Na⁺-Konzentration von 2,8 meq/kg nachweisen und in 80-100cm Bodentiefe eine mittlere Menge von 2,6 meq/kg. In den Buntsandsteinböden sind die Werte mit 2,6 meq/kg im Oberboden und 2,3 meq/kg in 80-10cm Bodentiefe ebenfalls in ähnlichen Konzentrationsbereichen.

An der Ostseite liegen die Na⁺-Konzentrationen in den Granitböden im Oberboden im Mittel bei 4,0 meq/kg und in 80-10cm Bodentiefe bei 4,3 meq/kg und in den Buntsandsteinböden bei 2,7 meq/kg bzw. 2,8 meq/kg (vergl. Tab. 17, Abb. 27 und Abb. 28).

Es wird deutlich, dass in den Böden auf beiden geologischen Untergründen am Kamm im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe die niedrigsten Na⁺-Ionenkonzentrationen nachweisbar sind. Allerdings sind die Unterschiede in den Bodentiefen der verschiedenen Vogesenlagen nicht signifikant.

Tab. 17: Na⁺-Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	2,9	1,1	2,8	1,2	4,0	3,3	2,8	0,9	2,6	1,0	2,7	0,9
80-100 cm	2,5	1,7	2,6	1,3	4,3	4,2	2,5	0,8	2,3	0,6	2,8	1,0

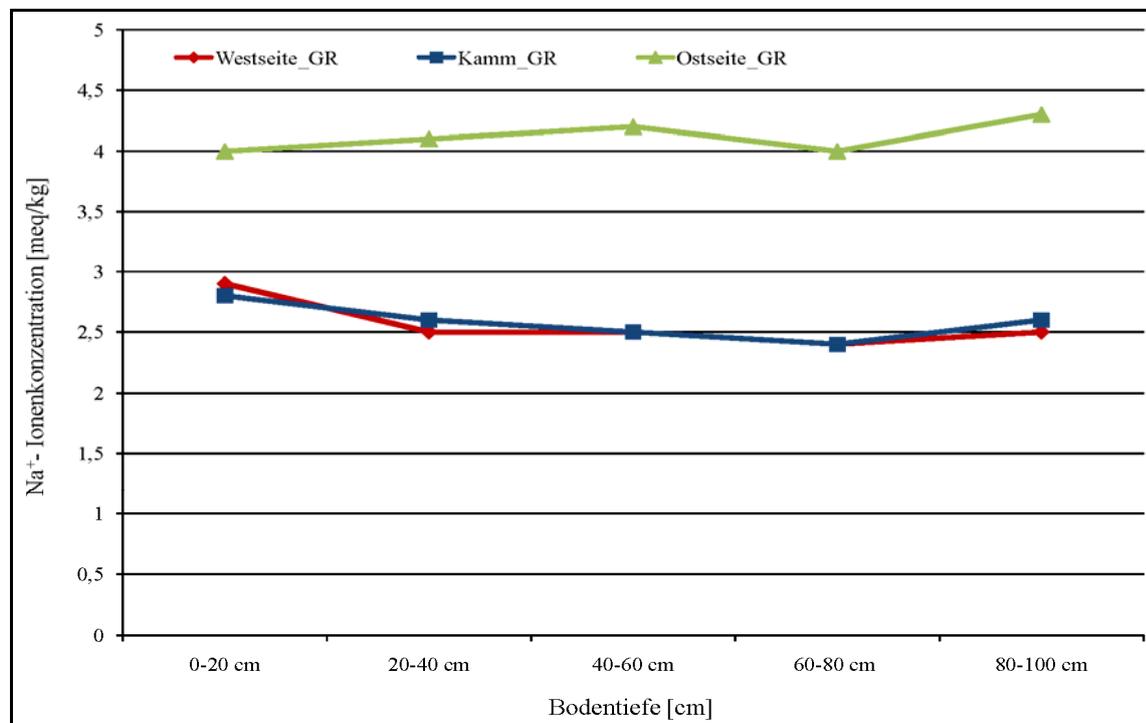


Abb. 27: Na⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

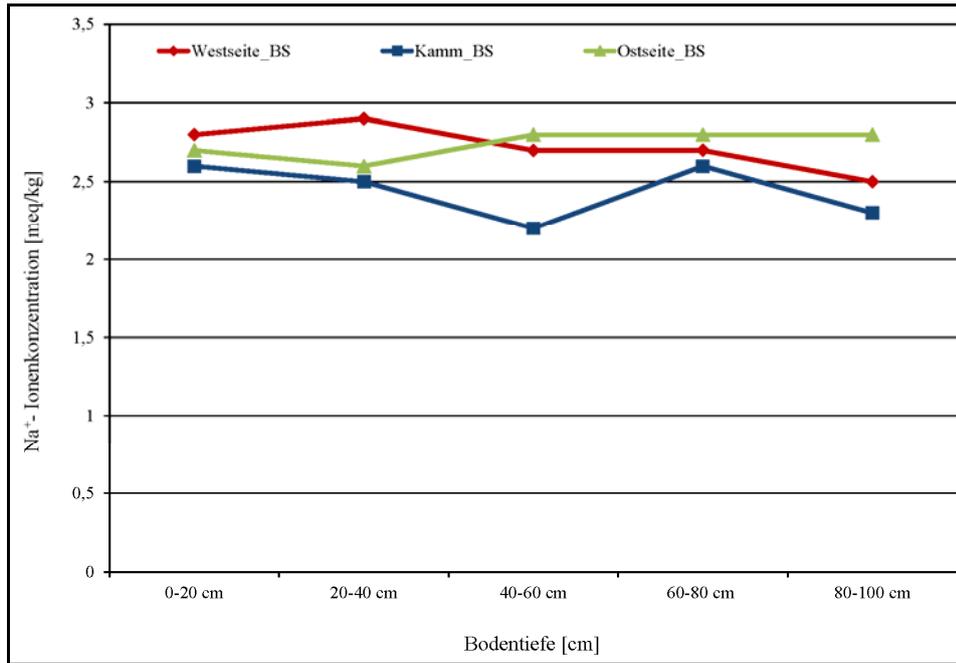


Abb. 28: Na⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

Die Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden an der Westseite beträgt im Oberboden im Mittel 6,8 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe 4,5 meq/kg. In den Buntsandsteinböden liegen die Werte im Oberboden im Mittel bei 11,7 meq/kg und in 80-100 cm bei 10,9 meq/kg. Am Kamm sind die Mg²⁺-Ionenkonzentrationen mit 14,0 meq/kg im Oberboden der Granitstandorte und 13,2 meq/kg in den Buntsandsteinstandorten höher als an der Westseite, aber niedriger als an der Ostseite, wo die Konzentrationen im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe in den Granit- und Buntsandsteinstandorten deutlich höher sind (vergl. Abb. 29 und Abb. 30).

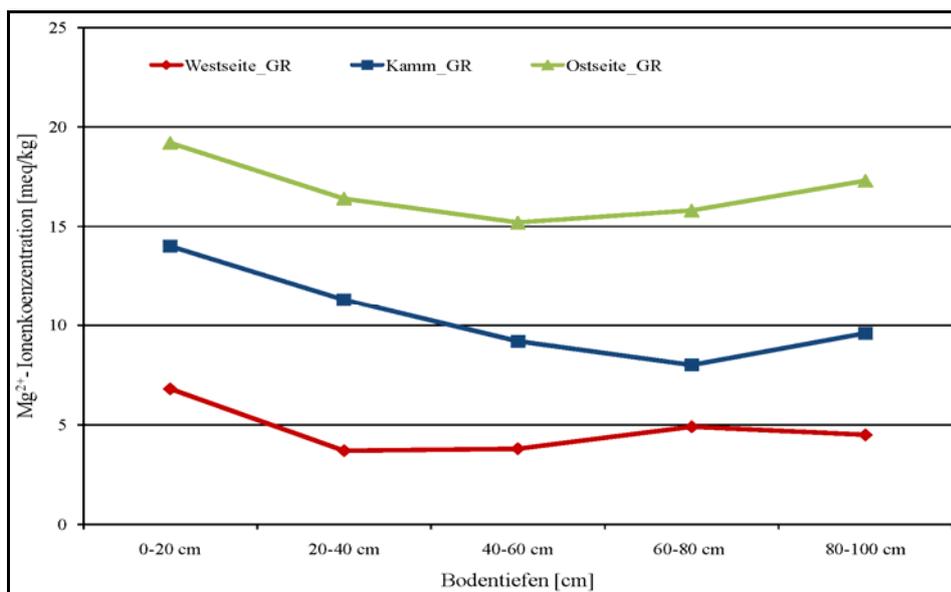


Abb. 29: Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

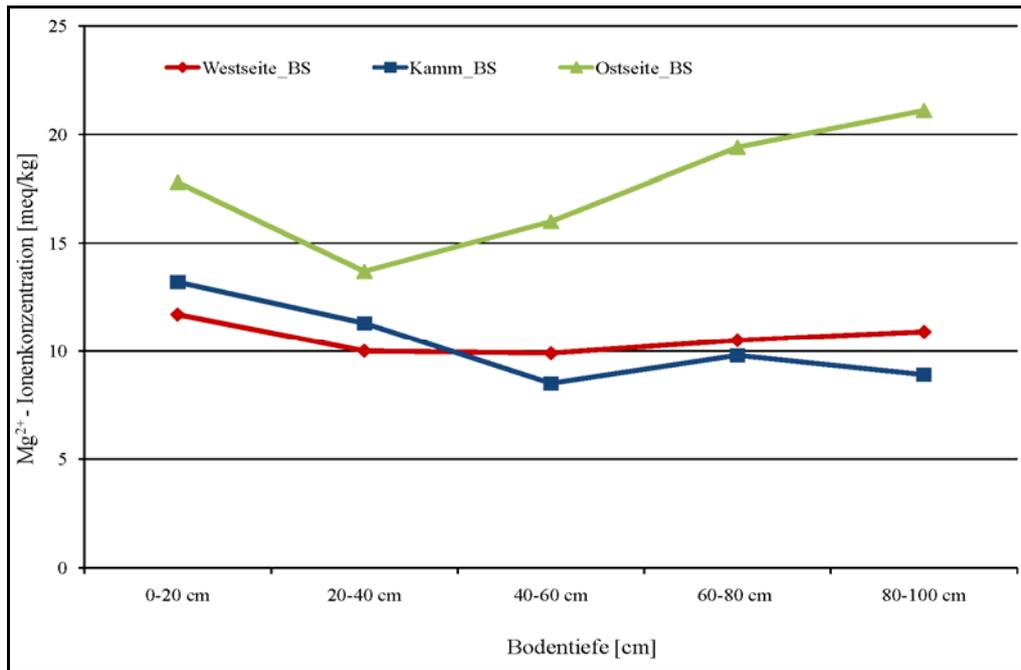


Abb. 30: Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

Tab. 18: Mg²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	6,8	10,2	14,0	8,0	19,2	11,5	11,7	6,5	13,2	8,0	17,8	6,5
80-100 cm	4,5	8,9	9,6	8,7	17,3	10,2	10,9	7,1	8,9	6,0	21,1	14,7

Auf beiden geologischen Untergründen ist die Mg²⁺-Ionenkonzentration an der Ostseite in allen Bodentiefen am höchsten. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Buntsandsteinstandorten nicht signifikant. Im Granit gelten die Unterschiede zwischen den Konzentrationen der West- und Ostseite als signifikant.

Die Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden an der Westseite liegt im Oberboden im Mittel bei 14,2 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe bei 7,8 meq/kg, während sich in den Buntsandsteinböden im Oberboden im Mittel eine Ca²⁺-Ionenkonzentration von 26,8 meq/kg und in 80-100cm von 21,0 meq/kg nachweisen lässt.

Am Kamm liegt in den Granitböden die mittlere Konzentration im Oberboden bei 20,6 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe bei 11,9 meq/kg, während in den Buntsandsteinböden im Oberboden eine mittlere Ca²⁺-Konzentration von 11,5 meq/kg zu finden ist, beträgt die mittlere Konzentration in 80-100cm Bodentiefe nur noch 5,8 meq/kg.

An der Ostseite liegt die mittlere Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Granitböden im Oberboden bei 42,2 meq/kg und in 80-100cm Bodentiefe bei 32,0 meq/kg, während sie in den Buntsandsteinböden im Mittel 27,2 meq/kg im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe 27,9 meq/kg beträgt (vergl. Tab. 19, Abb. 31 und Abb. 32).

In den Böden auf beiden geologischen Untergründen wird deutlich, dass am Kamm und an der Westseite im Bodenprofil deutlich weniger Ca^{2+} -Ionen nachweisbar sind, als an der Ostseite. Im Granit sind vor allem die Unterschiede zwischen der Westseite und der Ostseite, sowie zwischen dem Kamm und der Ostseite signifikant.

Tab. 19: Mg^{2+} -Ionenkonzentration (meq/kg) im Oberboden und in 80-100cm Bodentiefe in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
0-20 cm	14,2	12,9	19,0	13,0	42,2	27,1	14,9	9,9	11,5	12,2	32,0	40,1
80-100 cm	7,8	9,5	11,9	12,2	32,0	27,7	12,5	8,6	5,8	5,9	32,1	29,6

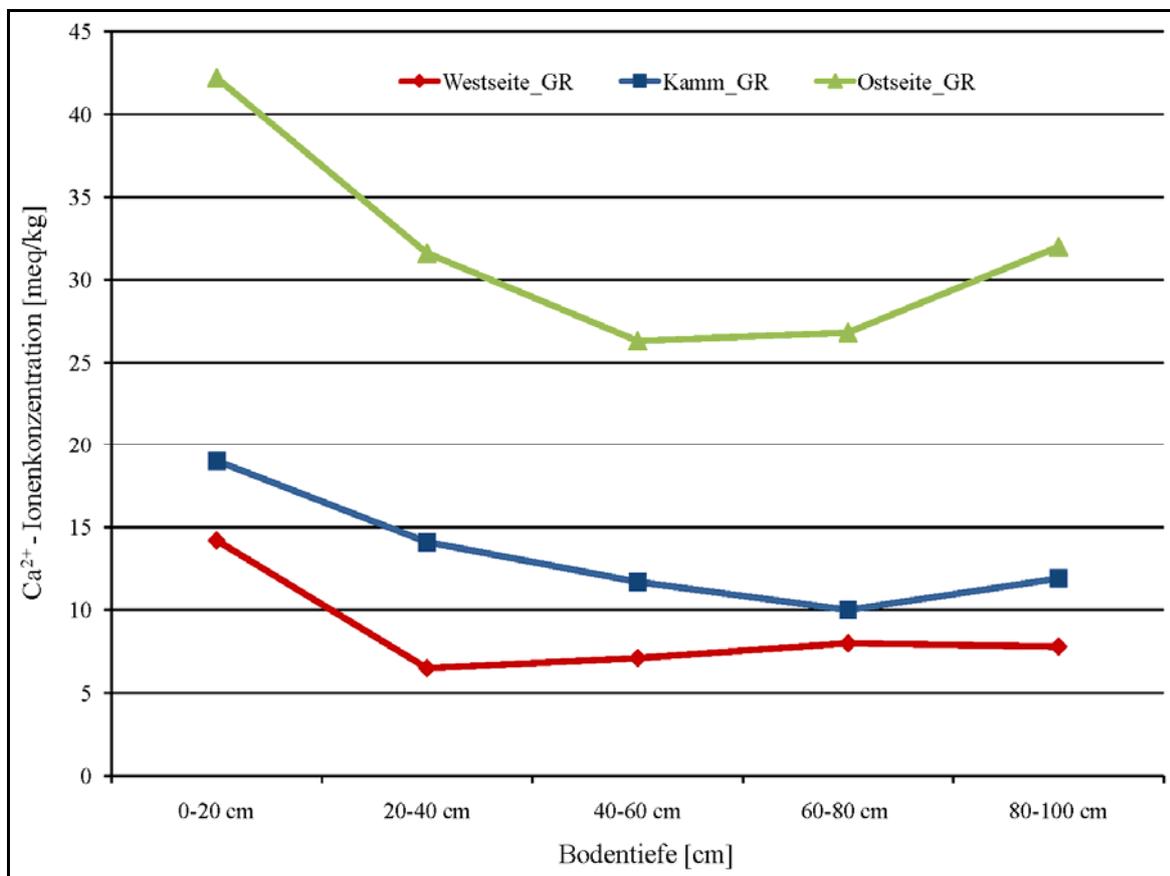


Abb. 31: Ca^{2+} -Ionenkonzentration in den Granitböden der Vogesen.

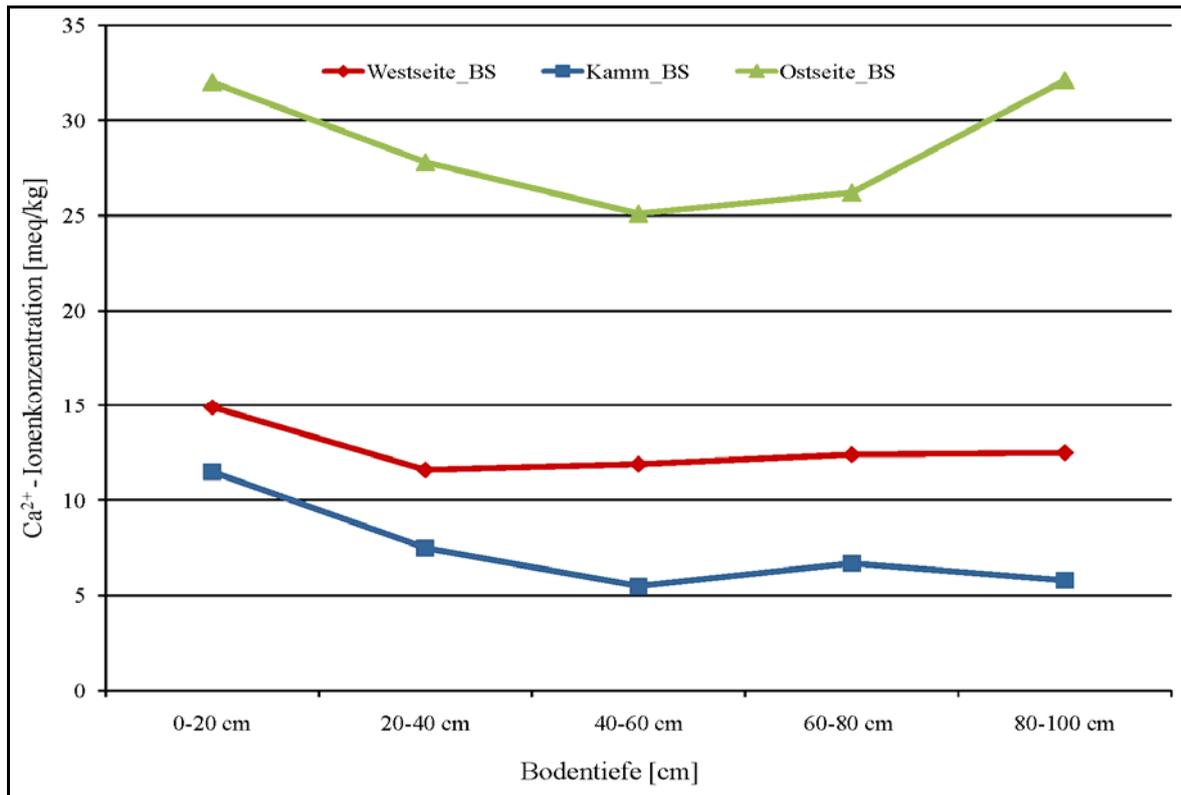


Abb. 32: Ca^{2+} -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden der Vogesen.

Die untersuchten chemischen Parameter zeigen in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen deutliche Unterschiede. Die Böden am Kamm sind stärker versauert als die Böden an der Ostseite, was die hohe H^+ - Ionenkonzentration bei gleichzeitig niedriger Kationenkonzentration (vor allem Mg^{2+} - und Ca^{2+} -Konzentration) in den Kammböden deutlich beweist. Die Unterschiede sind zwar nicht zwischen allen Lagen signifikant, aber vorhanden. Folglich hat die topographische Lage in den Vogesen und somit das Relief einen erheblichen Einfluss auf den chemischen Zustand der Böden.

Neben den einzelnen Elementkonzentrationen ist die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) ein wichtiger Faktor, mit Hilfe dessen der Zustand der Böden charakterisiert wird. Dabei spielt der Anteil der Basen und Säuren eine wichtige Rolle. Nur wenn in einem Boden genügend Basen vorhanden sind, können anfallende H^+ -Ionen abgepuffert werden. Da das Relief einen Einfluss auf die Konzentration der verschiedenen Elemente hat, wurde untersucht, ob auch die KAK_{eff} dessen Einfluss zeigt.

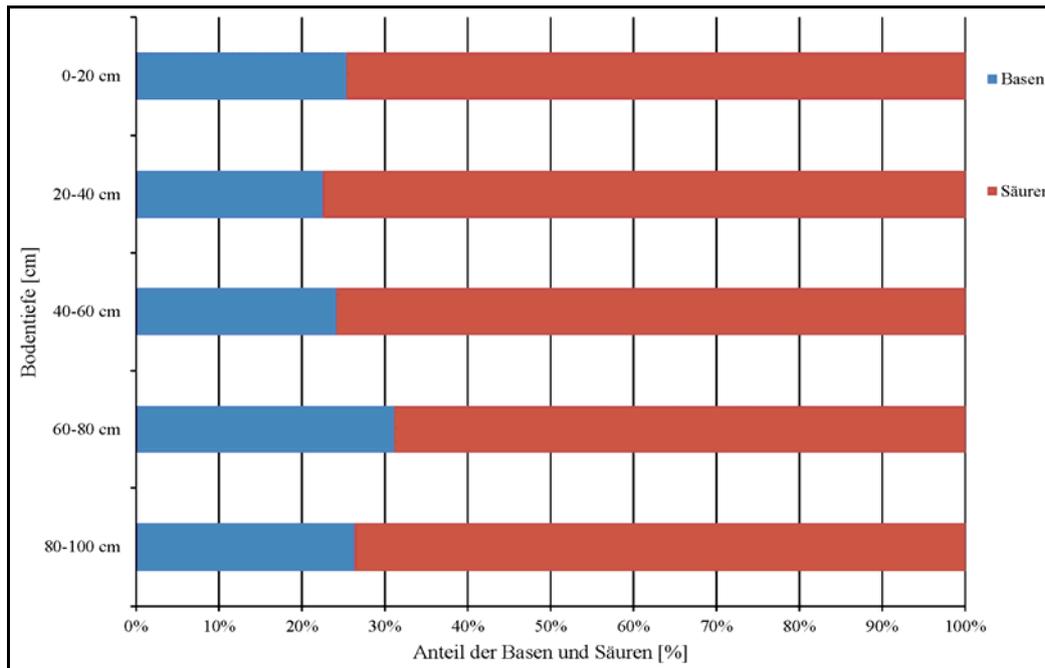


Abb. 33: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden der Vogesenwestseite.

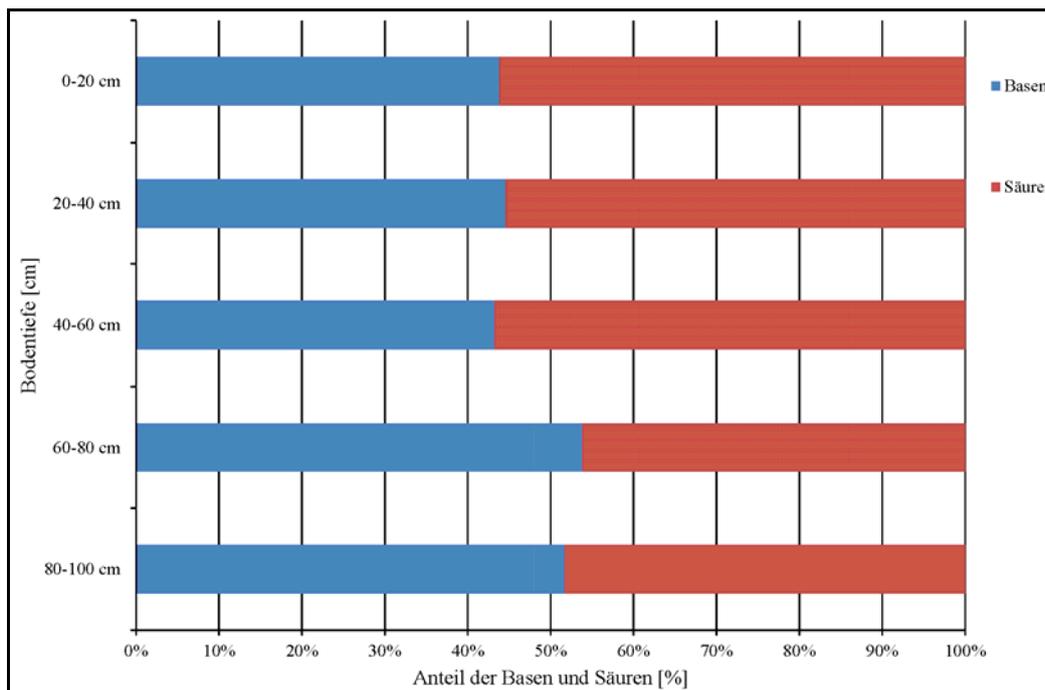


Abb. 34: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite

An der Vogesenwestseite lässt sich im Granit eine Basensättigung zwischen 25% und 26% je nach Bodentiefe nachweisen. Im Buntsandstein ist sie höher und bewegt sich zwischen 43% und 51% (vergl. Tab. 20 und Abb. 33, Abb. 34)

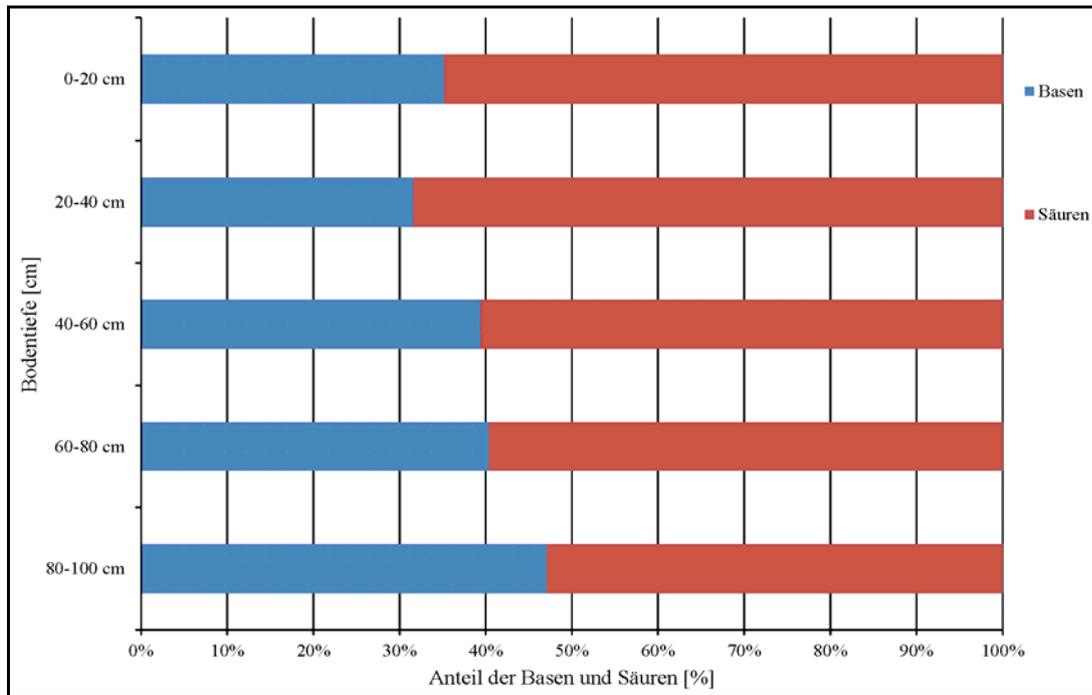


Abb. 35: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden des Vogesenkamms.

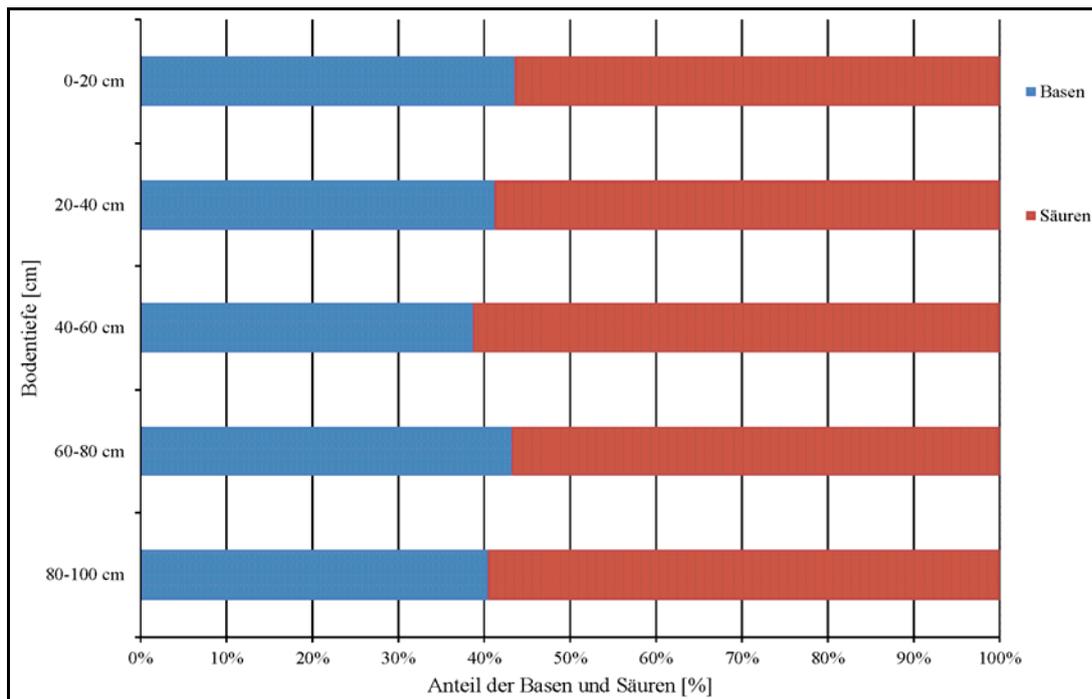


Abb. 36: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden des Vogesenkamms.

Am Vogesenkamm liegt der Anteil der Basen im Granit zwischen 35% und 47% und im Buntsandstein zwischen 44% und 48% (vergl. Tab. 20, Abb. 35 und Abb. 36).

An der Vogesenostseite zeigt sich eine Basensättigung von 57% und 68% im Granit und zwischen 70% und 79% im Buntsandstein (vergl. Tab. 20, Abb. 37 und Abb. 38).

Interaktion von Böden und Quellgewässern

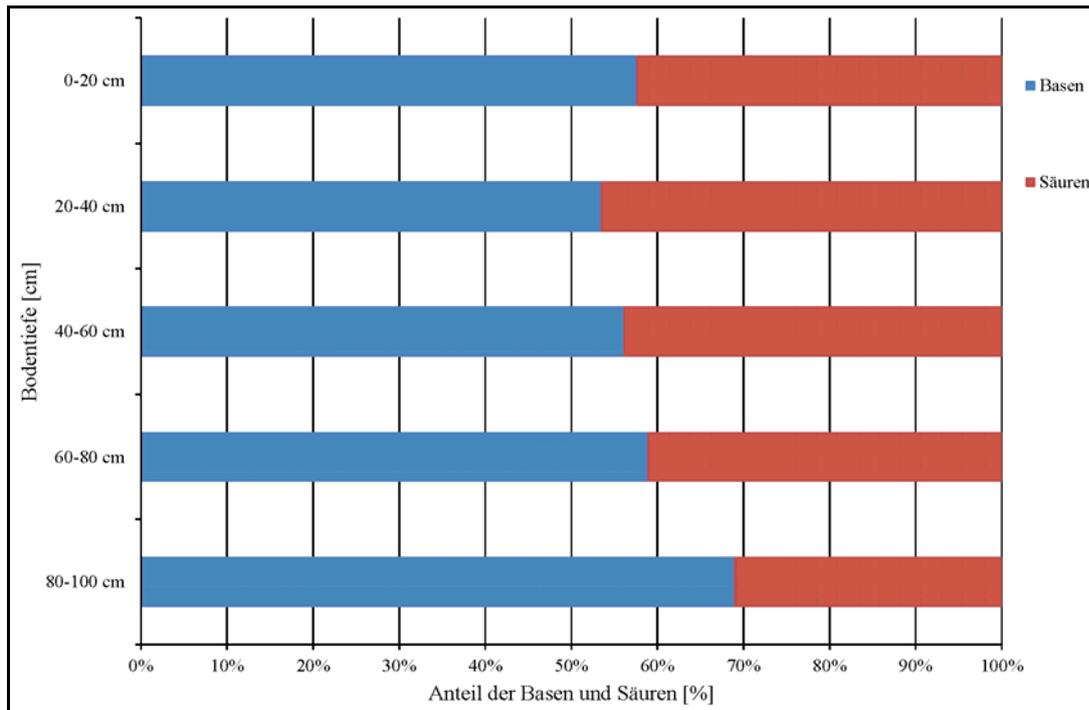


Abb. 37: Anteil der Basen und Säuren in den Granitböden der Vogesenostseite.

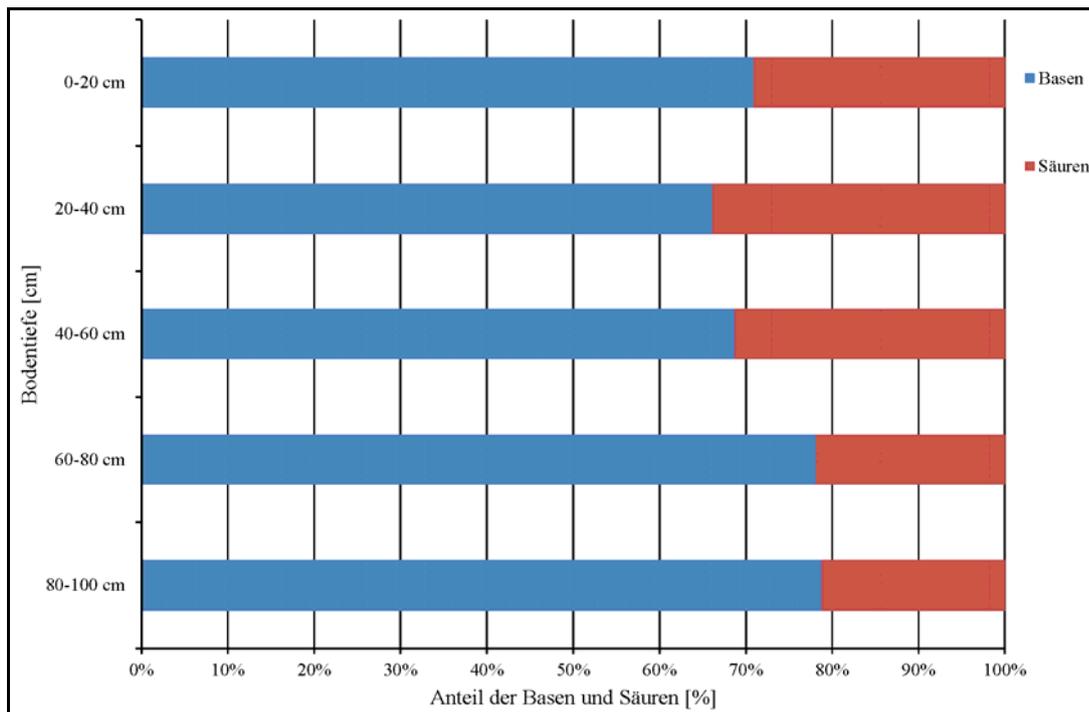


Abb. 38: Anteil der Basen und Säuren in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.

Somit wird deutlich, dass am Kamm und der Westseite in allen Bodentiefen deutlich mehr Säuren nachweisbar sind, als an der Ostseite. Die Basensättigung ist also am Kamm und an der Westseite deutlich geringer als an der Ostseite.

Tab. 20: Anteil der Basen und Säuren (%) im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe in den Vogesenlagen.

	WS_GR		K_GR		OS_GR		WS_BS		K_BS		OS_BS	
	Anteil Basen	Anteil Säuren										
0-20cm Bodentiefe	25,4	74,6	35,2	64,8	57,6	42,4	43,8	56,2	43,5	56,5	70,9	29,1
80-100 cm Bodentiefe	26,4	73,6	47,1	52,9	68,9	31,1	51,7	48,3	40,4	59,6	78,8	21,2

Zusammenfassend können aufgrund der Daten in Bezug auf die Basensättigung folgende Aussagen getroffen werden:

- An der Vogesenwestseite ist die Basensättigung in den Granitböden im Oberboden mit 25,4% am geringsten
- An beiden Kämmen wird im Oberboden eine Basensättigung von 35,2% bzw. 43,5% erreicht, was ebenfalls als eher gering eingeschätzt werden muss.
- Die Vogesenostseite profitiert von ihrer geschützten Lage am Oberrheingraben und den Böden auf Löss, sodass dort eine Basensättigung von deutlich über 50% erreicht wird.
- Bei der geringen Basensättigung am Kamm konnte in 80-100 cm Bodentiefe in den Granitböden eine deutliche Zunahme der Basensättigung nachgewiesen werden.

4.2.3 Zusammenfassende Betrachtung

Aufgrund der Daten konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass das Relief einen signifikanten Einfluss auf den chemischen Zustand der Quellgewässer und der Böden im Quellgebiet hat. In Bezug auf die verschiedenen chemischen Elemente sind die Unterschiede zwischen den Vogesenlagen zwar nicht in allen Fällen signifikant, aber vorhanden. Am größten sind die Unterschiede zwischen den chemischen Parametern beider Untersuchungsmedien an der Vogesenostseite und am Vogesenkamm.

Tab. 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der Elementmengen in den Quellen der Vogesenostseite und des Vogesenkammes

	K_GR		OS_GR		K_BS		OS_BS	
	MW	s	MW	s	MW	s	MW	s
H⁺-Ionenkonzentration	3,7	6,6	0,6	0,6	19,6	19,9	0,3	0,5
Na⁺-Ionenkonzentration	2,9	1,6	6,3	10,0	5,7	7,7	3,9	1,8
K⁺-Ionenkonzentration	0,4	0,3	1,1	1,1	1,2	0,8	1,9	1,0
Ca²⁺-Ionenkonzentration	3,1	4,1	11,0	15,2	3,7	3,0	19,6	16,7
Mg²⁺-Ionenkonzentration	3,6	2,9	7,8	6,9	4,7	3,8	14,7	9,8
Al³⁺-Ionenkonzentration	0,7	0,6	1,2	1,2	0,9	0,6	1,7	1,9

In der Tab. 21 wird deutlich, dass die H^+ -Ionenkonzentration in den Quellen der Vogesenostseite im Mittel deutlich niedriger ist als in den Quellen des Vogesenkammes und die Kationenkonzentrationen hingegen deutlich höher sind. Folglich sind auf beiden geologischen Untergründen die Quellen der Vogesenostseite weniger stark versauert, als die Quellen des Vogesenkammes. Ein ähnliches Bild ergibt sich in den Böden. In Tab. 22 ist der Anteil der Basen und Säuren in den Böden der Vogesenostseite und des Vogesenkammes im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe dargestellt.

Tab. 22: Anteil der Basen und Säuren (%) im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe in den Böden der Vogesenostseite und des Vogesenkammes.

	K_GR		OS_GR		K_BS		OS_BS	
	Anteil Basen	Anteil Säuren						
0-20cm Bodentiefe	35,2	64,8	57,6	42,4	43,5	56,5	70,9	29,1
80-100 cm Bodentiefe	47,1	52,9	68,9	31,1	40,4	59,6	78,8	21,2

Es wird deutlich, dass in den Böden der Vogesenostseite im Oberboden und in 80-100 cm Bodentiefe auf beiden geologischen Untergründen der Anteil der Basen deutlich höher ist als in den Böden des Vogesenkammes. Folglich sind die Böden am Kamm stärker versauert als die Böden an der Ostseite.

4.3 Regionalisierung der Vogesenquellen und Vogesenböden

Da aus den erhobenen Daten gefolgert werden kann, dass beide Untersuchungsmedien am Vogesenkamm und an der Vogesenwestseite signifikant stärker von Versauerungsprozessen betroffen sind als an der Vogesenostseite wurde innerhalb dieser Arbeit eine Regionalisierung der Quellgewässer und der Böden aufgrund ihres chemischen Zustandes angestrebt.

Im Zusammenhang mit hydrologischen Daten definieren KLEEBERG & CEMUS die Regionalisierung als die „Ausweisung von Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften“ (KLEEBERG & CEMUS 1992: 1). Auf diese Untersuchung übertragen bedeutet dies, dass durch eine Regionalisierung der Quellgewässer und Böden, Standorte mit gleichen bzw. ähnlichen chemischen Eigenschaften herausgestellt werden, um eventuell vorhandenen Versauerungsproblemen entgegenwirken zu können.

Sinnvoll erscheint nur die Betrachtung der Vogesen, da die Kalkungsmaßnahmen im Schwarzwald die Versauerung der Quellen und Böden erheblich beeinflussen (vergl. u.a. HÖCKE 2006, FVA 2000, VGL. AUCH DIE ERHOBENEN DATEN INNERHALB DIESER UNTERSUCHUNG).

Als Indikatoren wird die H^+ -Ionenkonzentration sowie die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Quellen und im Boden betrachtet.

Im Falle einer hohen H^+ -Ionenkonzentration konnte nur eine geringe Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Quellen nachgewiesen werden. Im Granit ist die Versauerung an der Westseite und am Kamm deutlich am größten, da dort die höchsten H^+ -Ionenkonzentrationen (also die niedrigsten pH-Werte) und die niedrigsten Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentrationen vorhanden sind. An der Ostseite hingegen sind die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentrationen am höchsten und die pH-Werte deutlich höher, sodass gefolgert werden kann, dass die Ostseite am wenigsten von Versauerungsprozessen betroffen ist. Im Buntsandstein zeigt sich die gleiche Tendenz. Zudem ist am Buntsandsteinkamm die starke Versauerungsgefahr erkennbar (vergl. Abb. 39).

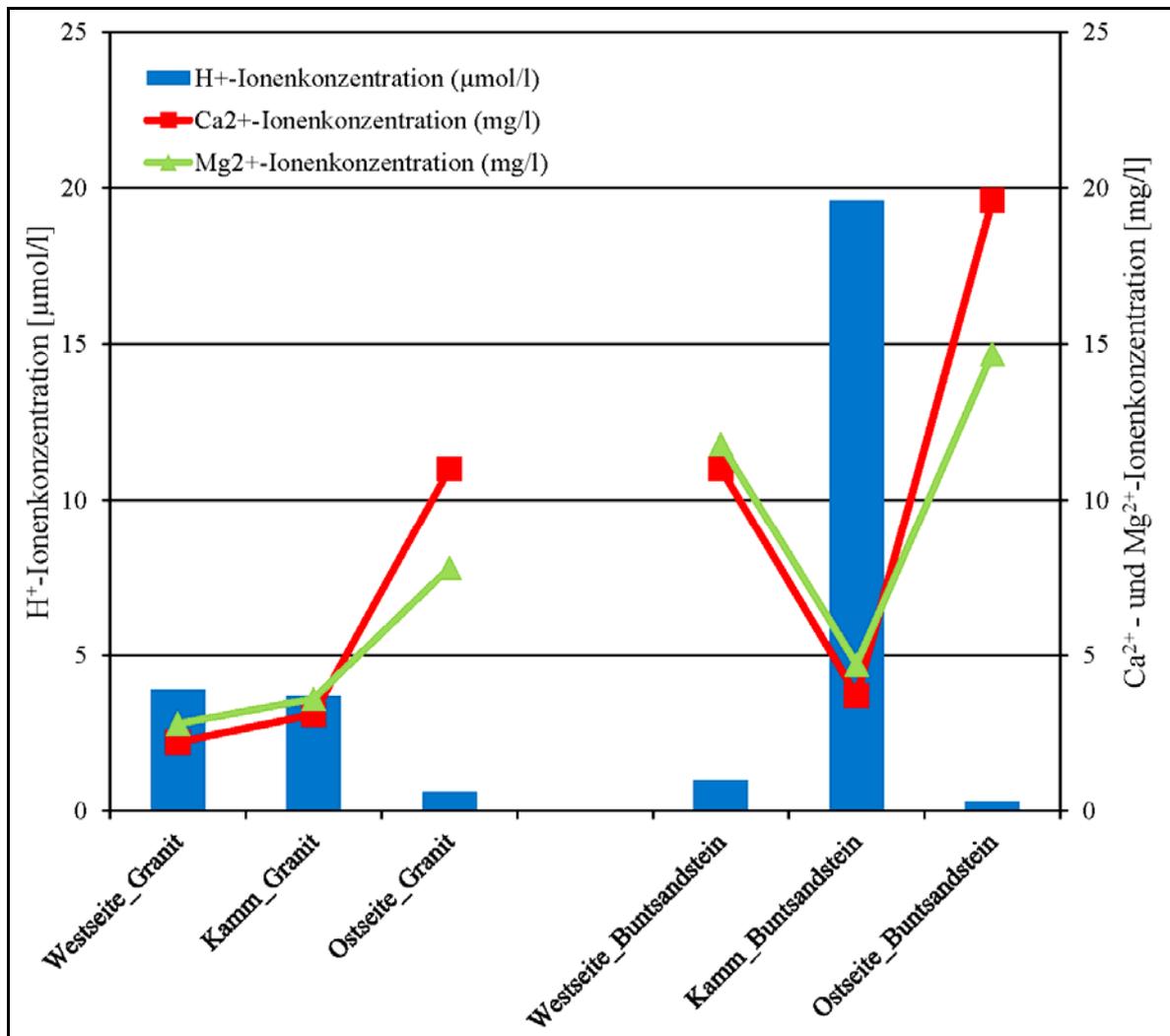


Abb. 39: H^+ -Ionenkonzentration ($\mu\text{mol/l}$), Ca^{2+} -Ionenkonzentration (mg/l) und Mg^{2+} -Ionenkonzentration (mg/l) in den Quellen der Granit- und Buntsandsteinstandorte der Vogesen.

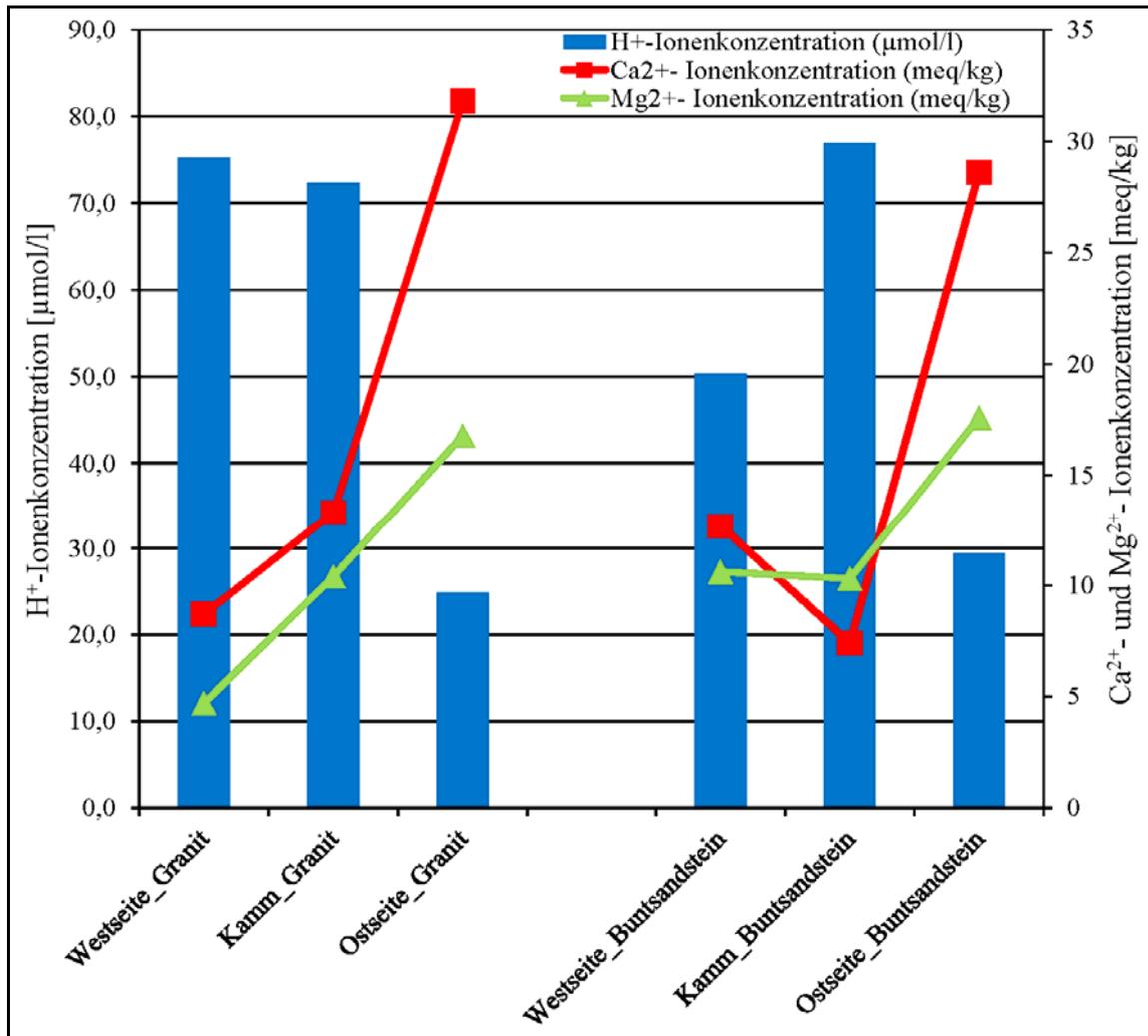


Abb. 40: H⁺-Ionenkonzentration (µmol/l), Ca²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg) und Mg²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesen (MW 0-100cm).

Im Boden ist die Situation ähnlich. Im Granit nimmt die Versauerung der Böden von der Westseite bis zur Ostseite ab, sodass an der Ostseite die niedrigsten H⁺-Ionenkonzentrationen und die höchsten Ca²⁺- und Mg²⁺- Ionenkonzentrationen nachgewiesen werden konnten. In den Böden auf Buntsandstein ist die Situation ähnlich. Neben der nicht so stark versauerten Ostseite mit niedrigen H⁺-Ionenkonzentrationen und hohen Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionenkonzentrationen fällt, wie schon bei den Quellanalysen, der stark versauerte Kamm auf. Die dem Buntsandsteinkamm zugeordneten Quellen liegen am Donon. Die klimatische Besonderheit dieses Beprobungsgebietes wird durch das kuppige Relief der Nordvogesen hervorgerufen. Der Donon bewirkt, anders als der sich über mehrere Kilometer erstreckende Granitkamm, als isolierte Erhebung, dass sich die Niederschläge dort punktuell stärker abregnen und dadurch zu den erheblichen Versauerungsprozessen beitragen (vergl. Abb. 40).

Die Regionalisierung der Vogesenböden lässt sich auch durch die Zuordnung der Böden in die verschiedenen Puffersystemen nachweisen. Zur Einteilung wurde der Mittelwert der pH-

Werte der verschiedenen Bodentiefen herangezogen und die Einordnung in das jeweilige Puffersystem erfolgte anhand der Kategorien, wie sie in Tab. 23 aufgeführt sind.

Tab. 23: pH-Werte in den verschiedenen Pufferbereichen; verändert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010, ULRICH 1981¹.

Pufferbereich	pH-Wert
Kohlensäure-Carbonat-Pufferbereich	8,6-6,2
Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich	6,2-5,0
Austauscher-Pufferbereich	5,0-4,2
Aluminium-Pufferbereich	4,2-3,0
Eisen-Pufferbereich	< 3,0

Tab. 24: Anzahl der Böden in den verschiedenen Pufferbereichen je nach Vogesenlage.

Lage	Pufferbereich		
	Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich	Austauscher-Pufferbereich	Aluminium-Pufferbereich
Westseite Granit	1	6	4
Kamm Granit	1	7	8
Ostseite Granit	4	8	1
Westseite Buntsandstein	0	8	1
Kamm Buntsandstein	0	3	2
Ostseite Buntsandstein	2	2	1

In Tab. 24 wird deutlich, dass sich die Böden in den stärker versauerten Gebirgslagen, also dem Kamm, sowie der Vogesenwestseite, größtenteils im Aluminium-Puffer- oder im Austauscher-Puffer-Bereich befinden. Dem entgegengesetzt sind die Böden der weniger stark versauerten Vogesenostseite z.T. sogar noch dem Kohlesäure-Silikat-Pufferbereich zuzuordnen.

Auch das molare Ca/Al-Verhältnis in den Quellen spiegelt deren Regionalisierung wider. Je kleiner der Quotient, desto mehr überwiegt die Al^{3+} -Ionenkonzentration und desto stärker versauert ist eine Quelle.

Tab. 25: Mittelwerte der Quotienten in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Vogesenwestseite	Vogesenkamm	Vogesenostseite
5,0	3,2	6,6

Es wird deutlich, dass die Quotienten an der Vogesenostseite deutlich größer sind als an der Vogesenwestseite und am Kamm (vergl. Tab. 25). Das bedeutet, dass an der Ostseite die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration in Relation zur Al^{3+} -Ionenkonzentration größer ist als in den anderen beiden Lagen. Daraus kann man folgern, dass die Versauerung dort nicht so weit fortgeschritten ist als am Kamm und der Westseite.

Die Tatsache, dass die Unterschiede verschiedener chemischer Parameter in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen in den meisten Fällen signifikant sind, lässt den Schluss zu, dass das Relief der Vogesen einen entscheidenden Einfluss auf den chemischen Zustand der Quellgewässer hat. Dies wird untermauert durch die Tatsache, dass auf beiden geologischen Untergründen in Bezug auf verschiedene Parameter signifikante Unterschiede nachgewiesen werden konnten. Neben den unterschiedlichen Ionenkonzentrationen zeigt auch der Ca/Al-Quotient in den verschiedenen Vogesenlagen deutlich unterschiedliche Ausprägungen, was den signifikanten Einfluss des Reliefs auf den chemischen Zustand der Quellwässer und Böden untermauert.

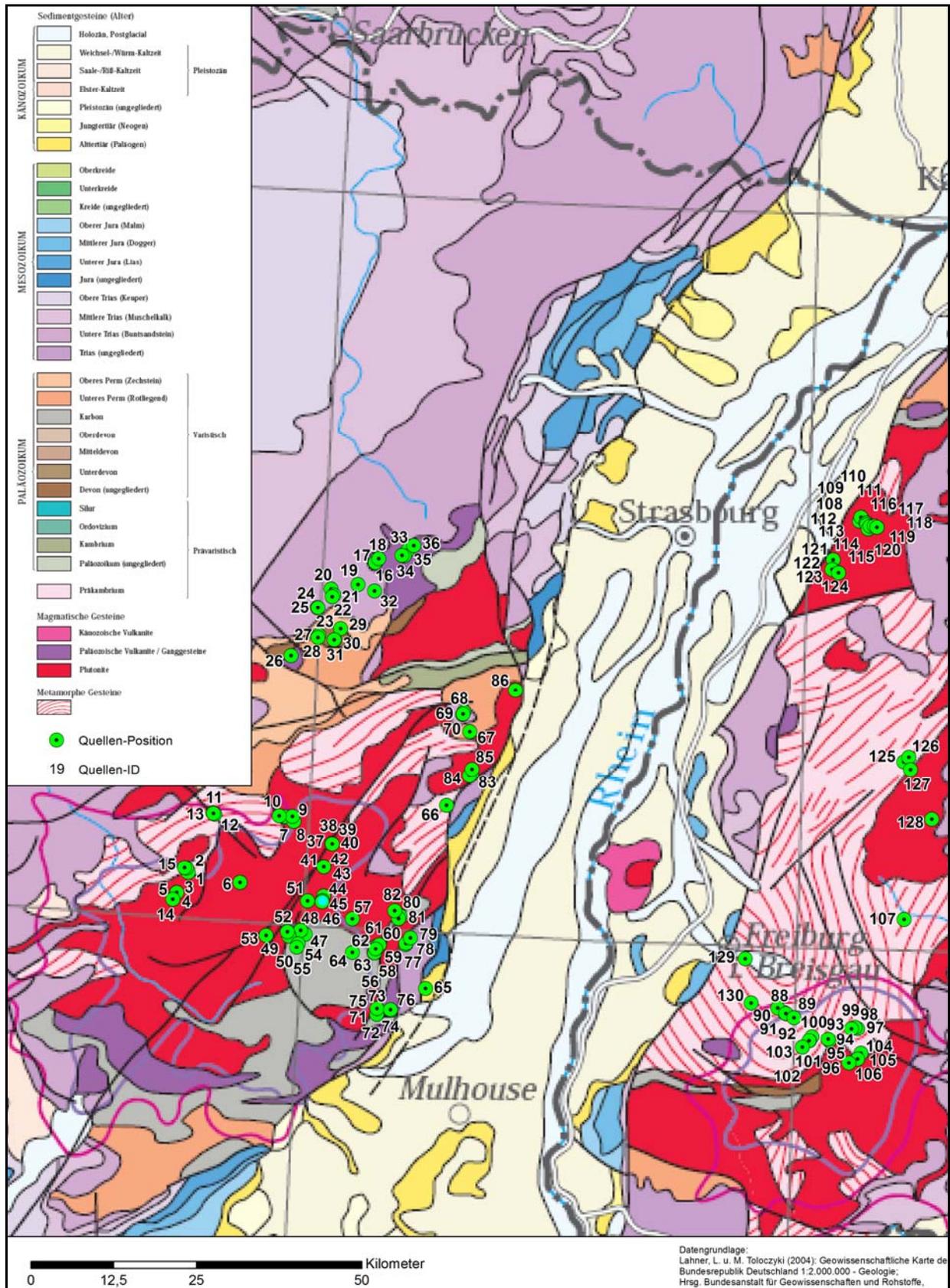
Die Regionalisierung der Quellen und der Böden lässt sich mit zwei Einflüssen erklären: Der West- bzw. Südwestwind hat im Pariser Becken Schadstoffe aufnehmen können und stößt dann auf die in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Vogesen. Diese bilden einen Riegel und zwingen die Luftmassen zum Aufsteigen und Abregnen. Daher sind die Vogesenwestseite und der Vogesenkamm aufgrund der Niederschlagsverhältnisse stärkeren Versauerungsprozessen unterworfen. Die Vogesenostseite hingegen liegt geschützt am Rande des Oberrheingrabens im Regenschatten der Vogesen, was eine geringere Belastung durch die Niederschläge und weniger starke Versauerungsprozesse zur Folge hat. Ein weiterer wichtiger Faktor, der den chemischen Zustand der Quellen und Böden beeinflusst ist der Löss, der sich am Rande des Oberrheingrabens abgelagert hat. Auf diesem fruchtbaren Flugsand haben sich Böden gebildet, die eine hohe Pufferkapazität besitzen und weniger stark von Versauerungsprozessen betroffen sind.

4.4 Einfluss der Geologie in den Vogesen

4.4.1 Einfluss der Geologie auf den Quellgewässerchemismus

Neben dem nachgewiesenen Einfluss des Reliefs wurde untersucht, ob aufgrund des geologischen Untergrundes signifikante Unterschiede des Chemismus der Vogesenquellen nachgewiesen werden können.

Im Schwarzwald wurde dieser Forschungsansatz nicht verfolgt, da nur Quellen im Granit oder Gneis auf ihre chemischen Eigenschaften untersucht wurden.



Karte 5: Lage der Vogesen- und Schwarzwaldquellen auf den verschiedenen geologischen Untergründen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

Die H^+ -Ionenkonzentration ist im Mittel in den Quellen an der West- und Ostseite im Granit höher als im Buntsandstein. Nur am Kamm lassen sich in den Quellen im Buntsandstein höhere Konzentrationen als in den Granitquellen nachweisen (vergl. Tab. 28 und Abb. 42). In allen Vogesenlagen sind die Unterschiede signifikant.

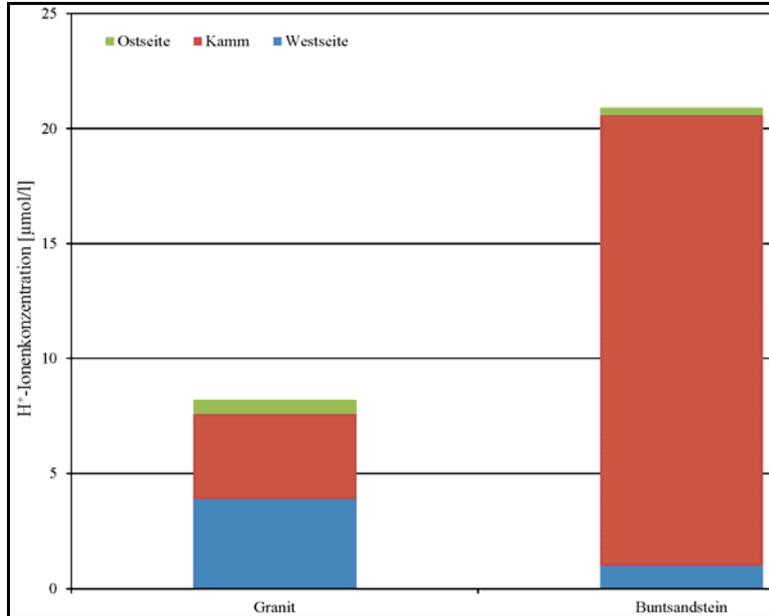


Abb. 41: H^+ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.

An der Ostseite und am Kamm lassen in den Buntsandsteinquellen höhere mittlere Al^{3+} -Ionenkonzentrationen nachweisen als in den Granitquellen (vergl. Tab. 28 und Abb. 42). Nur am Kamm sind die Unterschiede signifikant.

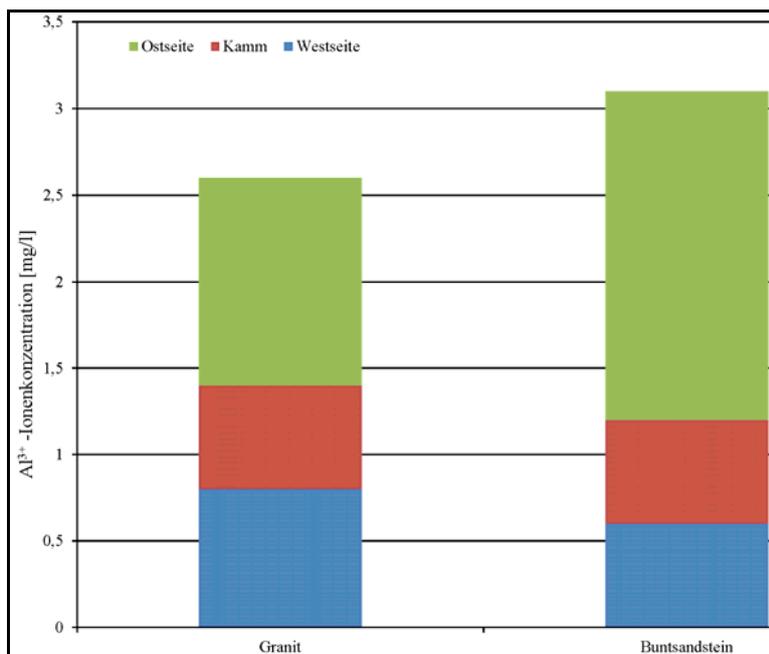


Abb. 42: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.

In Bezug auf die mittlere K^+ -Ionenkonzentration in den Vogesenquellen auf den verschiedenen geologischen Untergründen kann man eine eindeutige Aussage treffen: In allen Lagen konnten in den Buntsandsteinquellen signifikant höhere Konzentrationen nachgewiesen werden als in den Granitquellen (vergl. Tab. 28 und Abb. 43).

An der West- und an der Ostseite ist die mittlere Na^+ -Ionenkonzentration in den Granitquellen höher als in den Buntsandsteinquellen. Nur am Kamm lässt sich in den Buntsandsteinquellen eine höhere Konzentration nachweisen als in den Granitquellen (vergl. Tab. 28 und Abb. 43). In allen Vogesenlagen sind die Unterschiede signifikant.

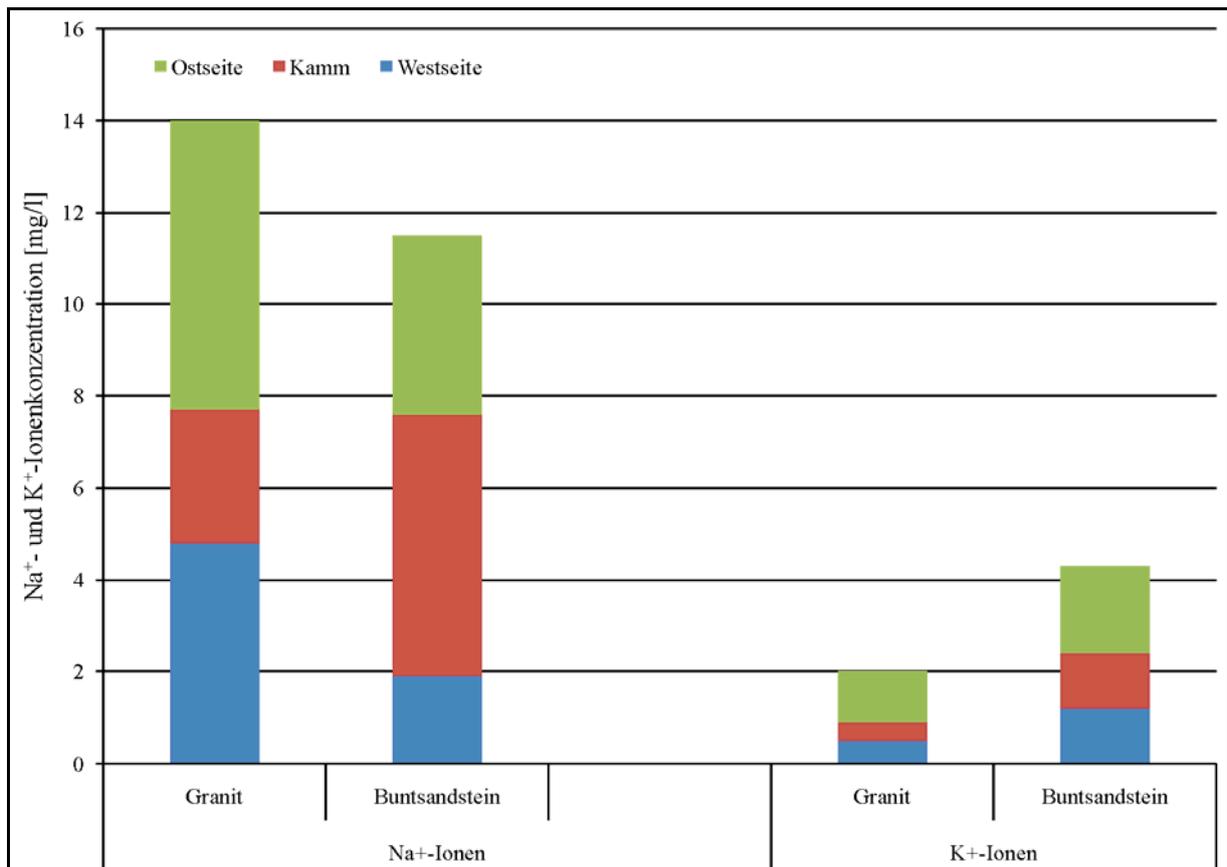


Abb. 43: Na^+ - und K^+ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.

Auch die mittlere Ca^{2+} -Ionenkonzentration zeigt auf den unterschiedlichen geologischen Untergründen verschieden hohe Werte. In allen drei Vogesenlagen ist die Konzentration in den Buntsandsteinquellen höher als in den Granitquellen (vergl. Tab. 28 und Abb. 44). Die Unterschiede sind signifikant.

Die Unterschiede zwischen der mittleren Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Quellen auf den verschiedenen geologischen Untergründen sind eindeutig. In den Buntsandsteinquellen sind die Konzentrationen höher als in den Granitquellen (vergl. Tab. 28 und Abb. 44). Die Unterschiede sind an der West- und Ostseite signifikant, während am Kamm keine Signifikanz nachgewiesen werden konnte.

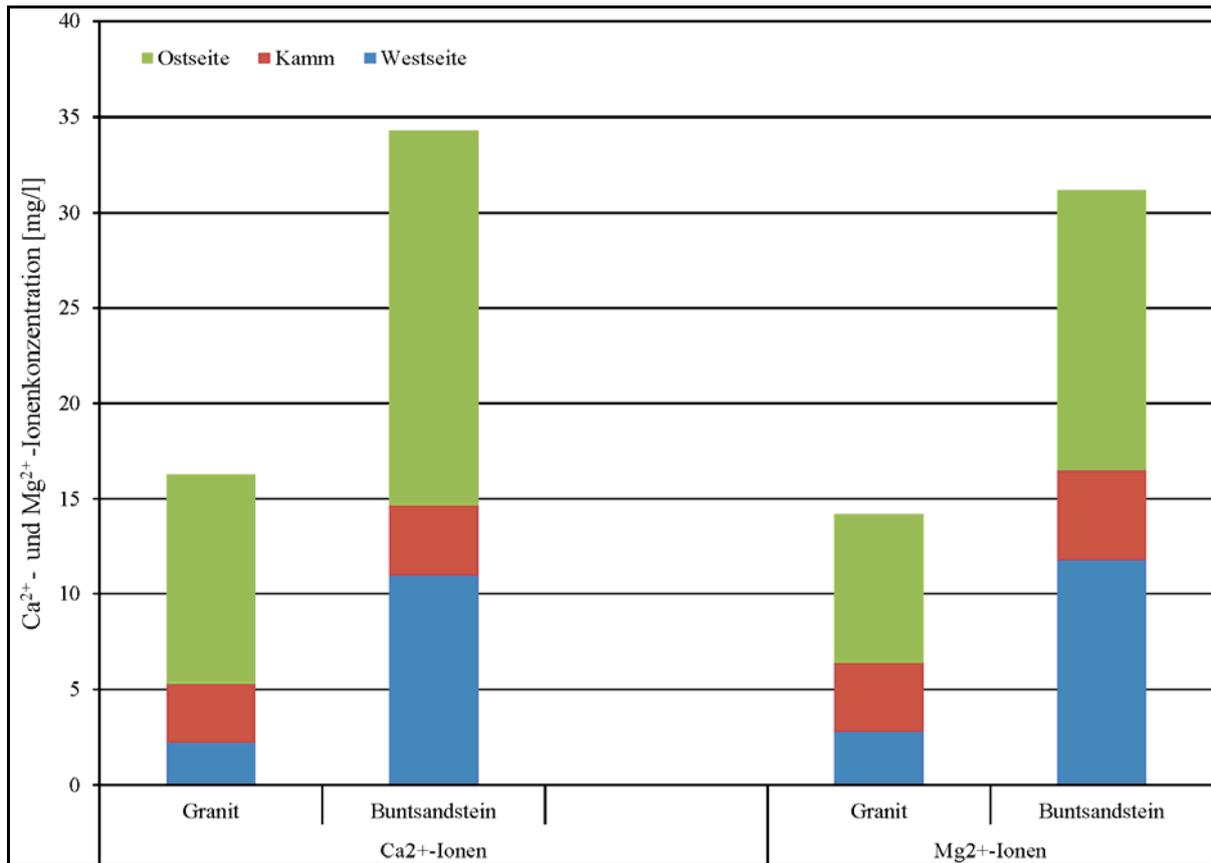


Abb. 44: Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen.

Tab. 26: Anzahl der Messwerte.

	Ca ²⁺ -Ionen		Mg ²⁺ -Ionen		Na ⁺ -Ionen		K ⁺ -Ionen		H ⁺ -Ionen		Al ³⁺ -Ionen	
	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS
WS	84	110	86	110	86	110	86	110	86	110	85	110
K	143	34	146	34	146	34	146	34	146	34	146	34
OS	126	38	124	37	123	38	126	38	126	38	126	38

Tab. 27: Standardabweichungen.

	Ca ²⁺ -Ionen		Mg ²⁺ -Ionen		Na ⁺ -Ionen		K ⁺ -Ionen		H ⁺ -Ionen		Al ³⁺ -Ionen	
	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS
WS	1,5	7,1	1,6	6,9	3,8	0,9	0,5	1,1	4,4	2	0,8	0,6
K	4,1	3	2,9	3,8	1,6	7,7	0,3	0,8	6,6	19,9	0,6	0,6
OS	15,2	16,7	6,9	9,8	10	1,8	1,1	1	0,6	0,5	1,2	1,9

Es wird deutlich, dass in den meisten Vogesenlagen die Elementkonzentrationen in den Buntsandsteinquellen höher sind als in den Granitquellen. Da vor allem die Konzentration der Erdalkalimetalle in den Buntsandsteinquellen höher und die H⁺-Ionenkonzentration niedriger ist, sind die Quellen im Granit stärker versauert als die Quellen im Buntsandstein. Nur am

Kamm lassen sich in den Buntsandsteinquellen höhere H^+ -Ionenkonzentrationen nachweisen, was den Schluss auf eine stärkere Versauerung zulässt.

Tab. 28: Mittelwerte der H^+ -Ionenkonzentration ($\mu\text{mol/l}$) und der Elementmengenkonzentration (mg/l) in den Granit- und Buntsandsteinquellen der Vogesenlagen.

	Granit						Buntsandstein					
	H^+ -Ionen ($\mu\text{mol/l}$)	Na^+ - Ionen (mg/l)	K^+ - Ionen (mg/l)	Ca^{2+} - Ionen (mg/l)	Mg^{2+} - Ionen (mg/l)	Al^{3+} - Ionen (mg/l)	H^+ -Ionen ($\mu\text{mol/l}$)	Na^+ - Ionen (mg/l)	K^+ - Ionen (mg/l)	Ca^{2+} - Ionen (mg/l)	Mg^{2+} - Ionen (mg/l)	Al^{3+} - Ionen (mg/l)
WS	3,9	4,8	0,5	2,2	2,8	0,8	1,0	1,9	1,2	11,0	11,8	0,6
K	3,7	2,9	0,4	3,1	3,6	0,6	19,6	5,7	1,2	3,7	4,7	0,6
OS	0,6	6,3	1,1	11,0	7,8	1,2	0,3	3,9	1,9	19,6	14,7	1,9

4.4.2 Einfluss der Geologie auf den Bodenchemismus

Neben dem Einfluss des Reliefs auf den chemischen Zustand der Böden ist auch die Auswirkung des geologischen Untergrundes von Bedeutung.

Die mittlere H^+ -Ionenkonzentration ist in den Buntsandsteinböden am Kamm und an der Ostseite größer als in den Granitböden, sodass die pH-Werte niedriger sind. An der Westseite lässt sich hingegen in den Granitböden eine höhere H^+ -Ionenkonzentration nachweisen (vergl. Tab. 29 und Abb. 45). In allen Vogesenlagen sind die Unterschiede nicht signifikant.

Die mittlere Al^{3+} -Ionenkonzentration ist in allen Vogesenlagen im Granit größer als im Buntsandstein (vergl. Tab. 29 und Abb. 46). Die Unterschiede sind am Kamm und an der Westseite signifikant.

An der Westseite ist die mittlere Na^+ -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinböden höher als in den Granitböden. An der Ostseite und am Kamm ist es umgekehrt: In den Granitböden lassen sich höhere Na^+ -Ionenkonzentrationen nachweisen als in den Buntsandsteinböden (vergl. Tab. 29 und Abb. 47). Die Unterschiede sind in allen Lagen nicht signifikant.

An der Westseite und am Kamm lässt sich in den Granitböden eine höhere mittlere K^+ -Ionenkonzentration nachweisen als in den Buntsandsteinböden. An der Ostseite sind die Konzentrationen in den Buntsandsteinböden größer (vergl. Tab. 29 und Abb. 47). Die Unterschiede sind an der Westseite und am Kamm signifikant.

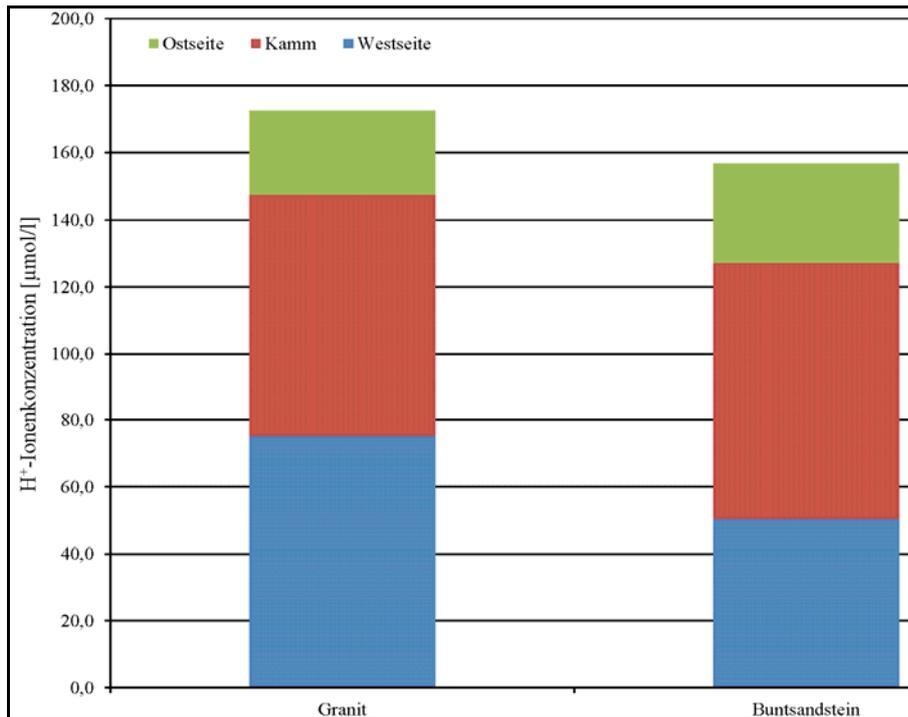


Abb. 45: H⁺-Ionenkonzentrationen der Bodentiefen in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.

Die mittlere Ca²⁺-Ionenkonzentration ist am Kamm und an der Ostseite in den Granitböden höher als in den Buntsandsteinböden. An der Westseite ist es umgekehrt (vergl. Tab. 29 und Abb. 48). Die Unterschiede sind in allen Lagen nicht signifikant.

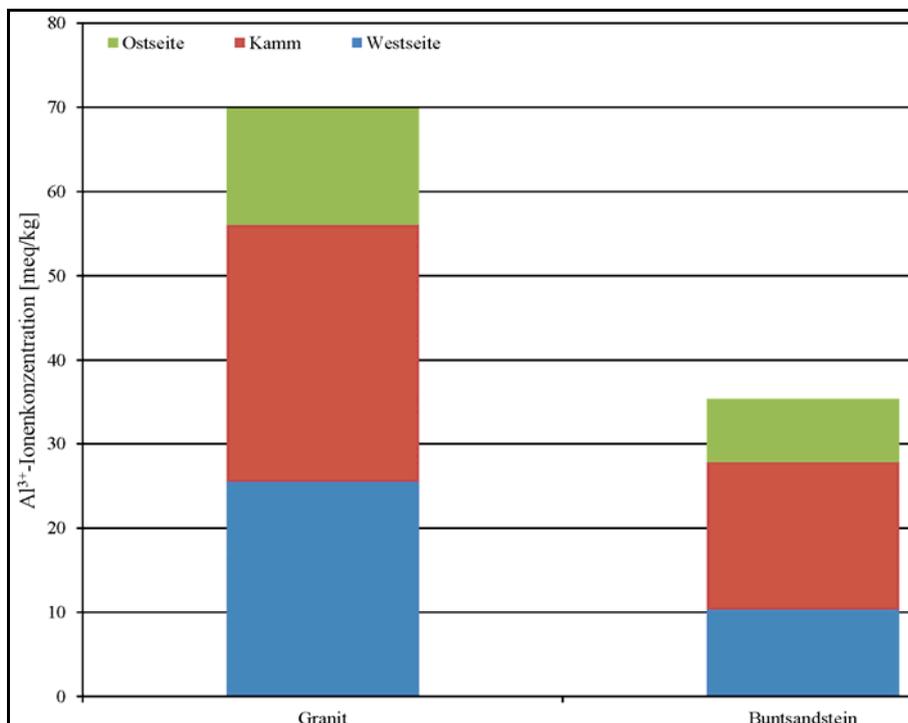


Abb. 46: Al³⁺-Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.

Die mittlere Mg^{2+} -Ionenkonzentration ist an der West- und Ostseite in den Buntsandsteinböden höher als in den Granitböden. Am Kamm ist die mittlere Konzentration gleich hoch. Die Unterschiede sind an der Westseite signifikant (vergl. Tab. 29 und Abb. 48).

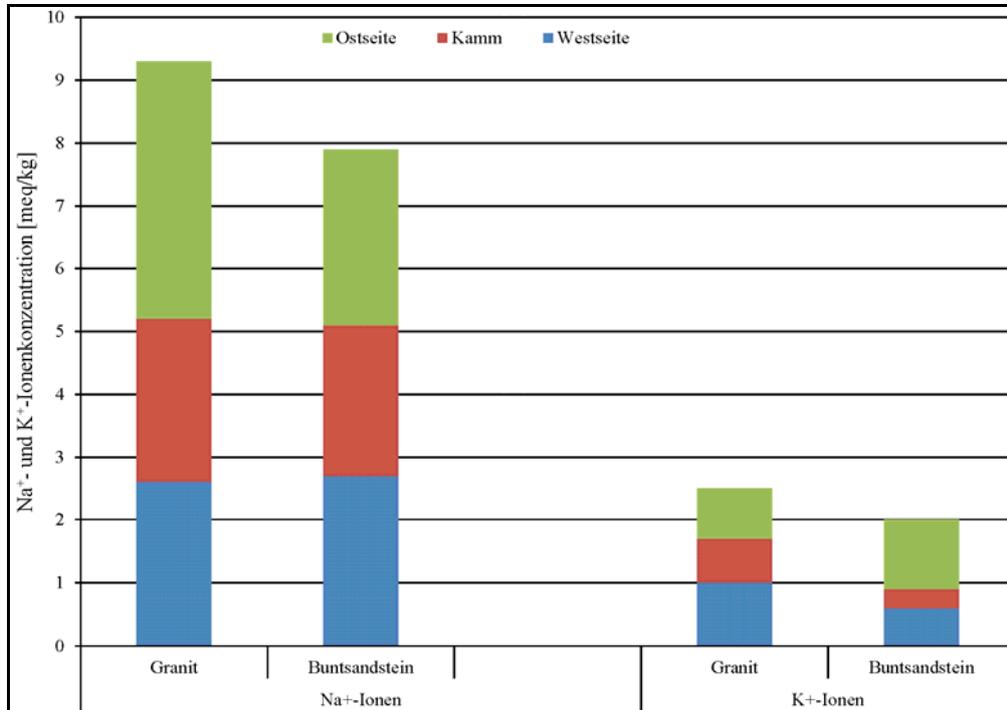


Abb. 47: Na⁺- und K⁺-Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.

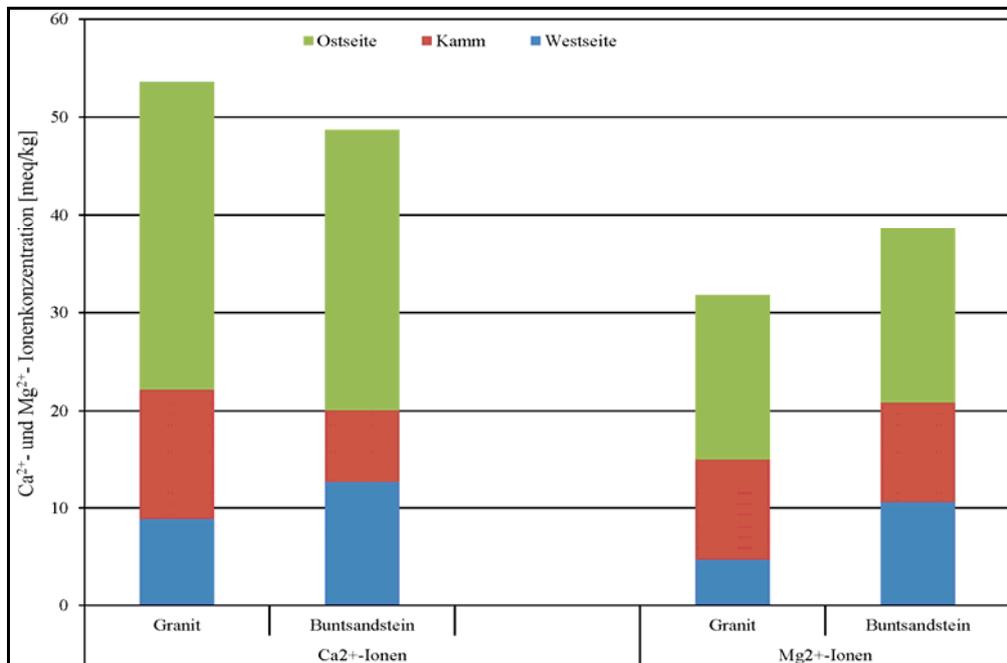


Abb. 48: Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionenkonzentration in den verschiedenen Vogesenlagen im Granit und Buntsandstein.

Tab. 29: Mittelwerte der H⁺-Ionenkonzentration (µmol/l) und der Elementmengenkonzentration (meq/kg) in den Granit- und Buntsandsteinböden (MW der Bodentiefen) der Vogesenlagen.

	Granit						Buntsandstein					
	H ⁺ -Ionen µmol/l	Na ⁺ -Ionen meq/kg	K ⁺ -Ionen meq/kg	Ca ²⁺ -Ionen meq/kg	Mg ²⁺ -Ionen meq/kg	Al ³⁺ -Ionen meq/kg	H ⁺ -Ionen µmol/l	Na ⁺ -Ionen meq/kg	K ⁺ -Ionen meq/kg	Ca ²⁺ -Ionen meq/kg	Mg ²⁺ -Ionen meq/kg	Al ³⁺ -Ionen meq/kg
WS	75,2	2,6	1	8,9	4,7	25,5	50,3	2,7	0,6	12,7	10,6	10,3
K	72,4	2,6	0,7	13,3	10,3	30,6	77,0	2,4	0,3	7,4	10,3	17,5
OS	24,9	4,1	0,8	31,4	16,8	13,8	29,4	2,8	1,1	28,6	17,6	7,5

Tab. 30: Anzahl der Messwerte.

	Ca ²⁺ -Ionen		Mg ²⁺ -Ionen		Na ⁺ -Ionen		K ⁺ -Ionen		H ⁺ -Ionen		Al ³⁺ -Ionen	
	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS
WS	16	9	16	9	16	9	16	9	16	9	16	9
K	16	6	16	6	16	6	16	6	16	6	16	6
OS	15	7	15	7	15	7	15	7	15	7	15	7

Tab. 31: Standardabweichungen.

	Ca ²⁺ -Ionen		Mg ²⁺ -Ionen		Na ⁺ -Ionen		K ⁺ -Ionen		H ⁺ -Ionen		Al ³⁺ -Ionen	
	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS	GR	BS
WS	9,3	8,6	8,1	6,6	1,2	0,8	0,5	0,4	70,5	40,9	18	6,8
K	12,1	7,6	8,1	6,8	1,1	0,9	0,3	0,2	55,1	60,9	14,1	10,6
OS	23,9	31,6	9,7	9,9	3,7	0,9	0,7	1	19,6	27,3	11,1	6,8

Neben der Betrachtung der Konzentration der einzelnen Elementmengen spielt in den Böden die KAK_{eff} und im Besondern der Anteil der Basen und Säuren eine wichtige Rolle. Daher wurde untersucht, ob sich die Anteile der Basen und Säuren in den Böden auf den verschiedenen geologischen Untergründen unterscheiden.

An der Westseite liegt in den Granitböden der Anteil der Basen im Mittel aller Bodentiefen bei 25,9 %, während in den Buntsandsteinböden der Anteil mit 47,4% deutlich höher ist. Somit ist die Basensättigung an der Westseite in den Granitböden niedriger als in den Buntsandsteinböden (vergl. Abb. 49).

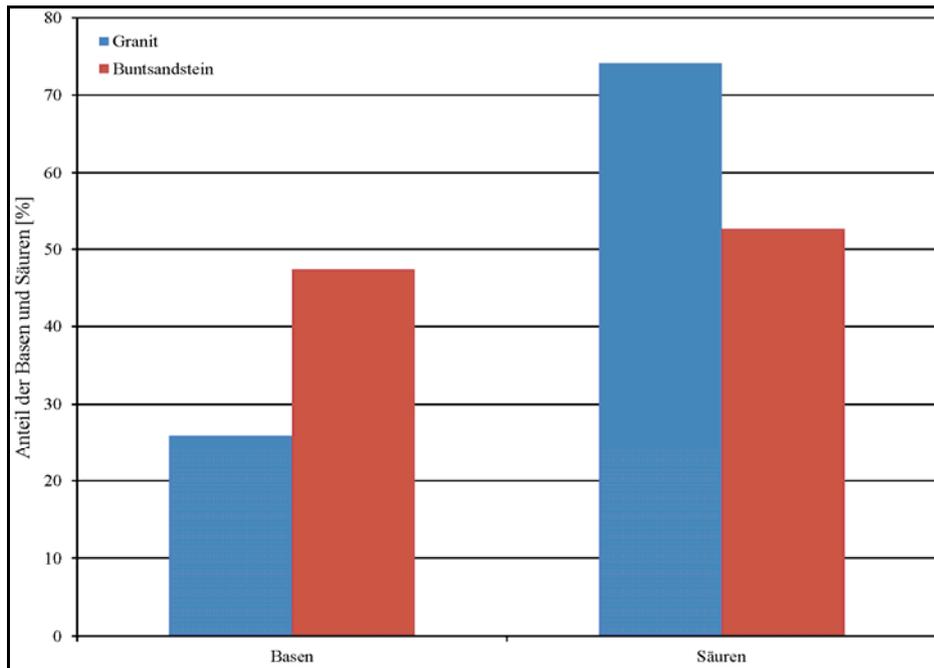


Abb. 49: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.

Am Vogesenkamm ist der Anteil der Basen an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden mit 41,4 % ebenfalls höher als in den Granitböden, in denen die Basen nur einen Anteil von 38,7 % erreichen, aber folglich die Säuren mit 61,3% deutlich überwiegen (vergl. Abb. 50). Somit ist auch am Kamm die Basensättigung in den Granitböden niedriger als in den Buntsandsteinböden (vergl. Abb. 50).

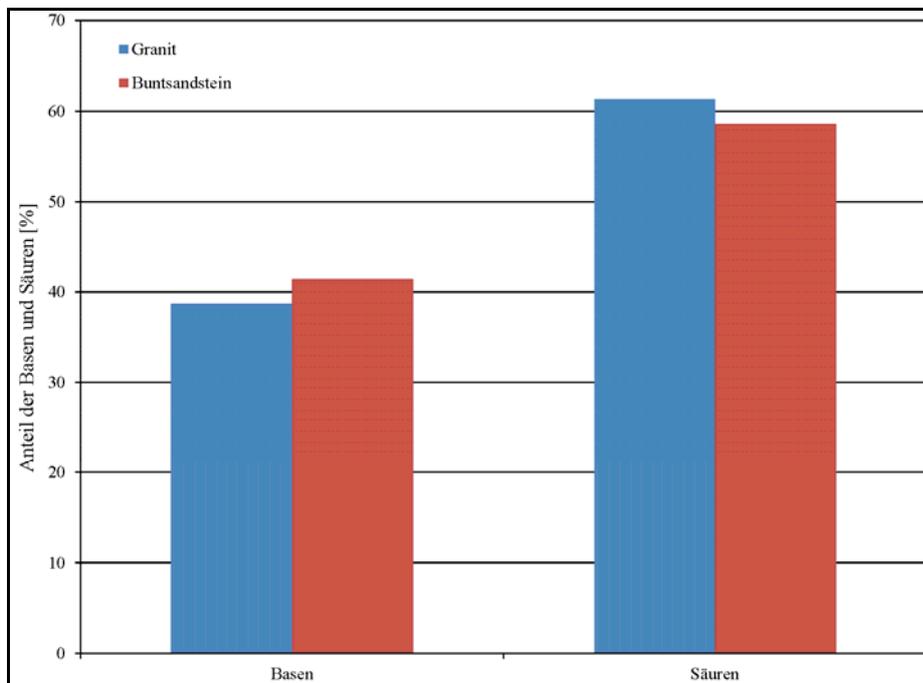


Abb. 50: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.

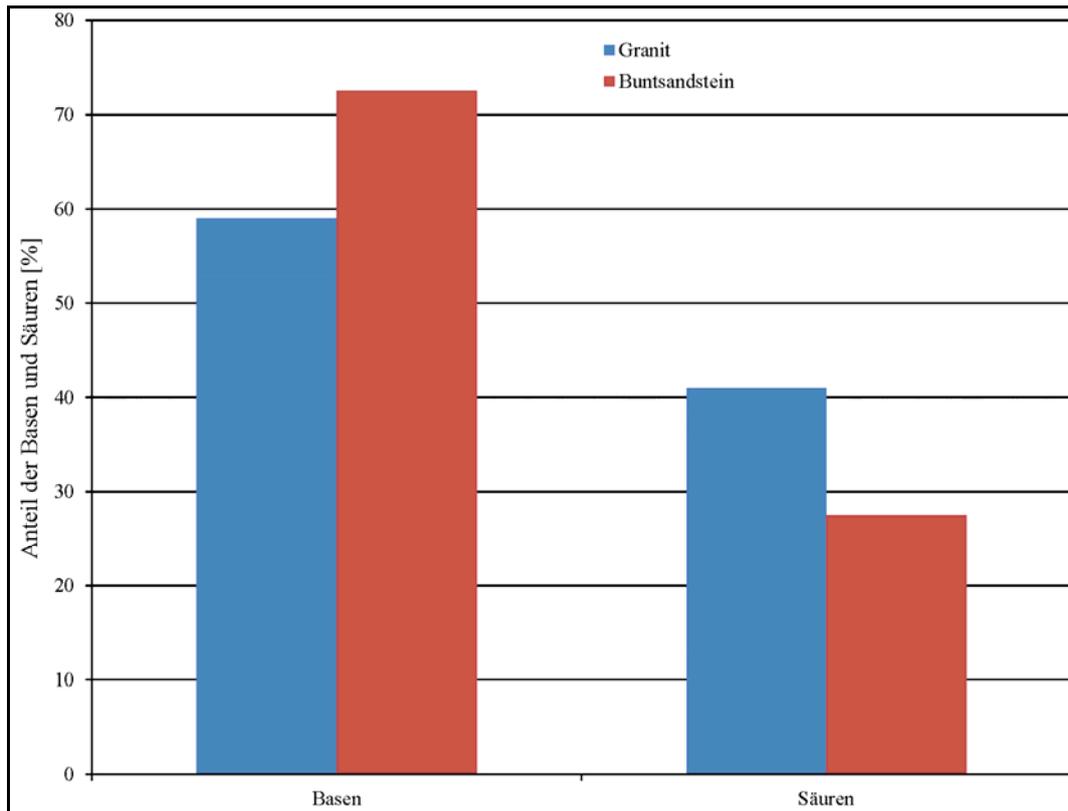


Abb. 51: Anteil der Basen und Säuren (%) in den Granit- und Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.

An der Vogesenostseite zeigt sich ein ähnliches Bild. In den Buntsandsteinböden lässt sich ein Anteil der Basen von 72,5 % nachweisen, während der Anteil in den Granitböden mit 59 % deutlich geringer ist. In diesen nehmen die Säuren einen Anteil von 41 % ein, was bedeutet, dass in den Buntsandsteinböden die Basensättigung deutlich höher ist (vergl. Abb. 51).

In allen Vogesenlagen ist die Basensättigung der Buntsandsteinböden zum Teil deutlich höher als die Basensättigung der Granitböden.

Die stärkere Versauerung und der geringere Anteil der Basen an der KAK_{eff} in den Granitböden wird ebenfalls bei der Betrachtung des Anteils der Magnesiumionen an der KAK_{eff} deutlich (vergl. Tab. 32).

Tab. 32: Anteil der Mg^{2+} -Ionen (%) an der KAK in den Oberböden der Granit- und Buntsandsteinböden der verschiedenen Vogesenlagen.

Lage und Geologie	Anteil der Mg^{2+} - Ionen an der KAK_{eff} in 0-20cm Bodentiefe (%)	Anteil der Mg^{2+} - Ionen an der KAK_{eff} in 80-100 cm Bodentiefe (%)
WS_GR	6,2	7,4
WS_BS	17,2	21,0
K_GR	12,8	18,8
K_BS	20,8	21,0
OS_GR	15,7	22,9
OS_BS	27,8	30,5

Es wird deutlich, dass in allen Vogesenlagen der Anteil der Magnesiumionen an der KAK_{eff} in 0-20 cm und in 80-100 cm Bodentiefe in den Buntsandsteinböden deutlich höher ist als in den Granitböden. Dies hat zur Folge, dass die Basensättigung der Buntsandsteinböden höher ist als die der Granitböden.

Insgesamt konnte durch die vergleichende Untersuchung der verschiedenen Elementkonzentrationen, der KAK_{eff} und der Basensättigung gezeigt werden, dass sich die Böden auf den beiden geologischen Untergründen hinsichtlich ihres chemischen Zustandes z.T. signifikant unterscheiden. Dabei wurde deutlich, dass die Granitböden in allen Vogesenlagen stärker versauert sind als die Buntsandsteinböden.

4.4.3 Zusammenfassende Betrachtung

Da sowohl die Granit- und Buntsandsteinquellen, als auch die Granit- und Buntsandsteinböden in den verschiedenen Vogesenlagen getrennt betrachtet wurden, können die signifikanten Unterschiede in Bezug auf verschiedene Elementkonzentrationen oder den Anteil der Basen und Säuren eindeutig auf den unterschiedlichen geologischen Untergrund zurückgeführt werden.

In den Quellen konnte an der West- und Ostseite aufgrund der höheren H^+ -Ionenkonzentration und der niedrigeren Kationenkonzentration in den Granitquellen gezeigt werden, dass diese stärker versauert sind als die Buntsandsteinquellen. Am Vogesenkamm können zwar in den Buntsandsteinquellen auch höhere Kationenkonzentrationen nachgewiesen werden, allerdings kann aufgrund der hohen H^+ -Ionenkonzentrationen gefolgert werden, dass dort die Buntsandsteinquellen stärker versauert sind als die Granitquellen, was durch die isolierte Lage des Buntsandsteinkamms erklärbar ist (vergl. Kapitel 4.3). Somit ist die stärkere Versauerung der Buntsandsteinquellen am Kamm nicht primär auf den geologischen Untergrund, sondern auf die unterschiedliche Reliefsituation von Granit- und Buntsandsteinkamm zurückzuführen. Auf die gesamten Vogesen bezogen sind die Granitquellen stärker versauert als die Buntsandsteinquellen.

Der Versauerungszustand der Böden zeigt eine ähnliche Tendenz. Die H^+ -Ionenkonzentration und die Konzentration der Kationen ist in den Granit- und Buntsandsteinböden ähnlich. Entscheidend ist jedoch, dass die Al^{3+} -Ionenkonzentration in allen Vogesenlagen höher und an der West- und Ostseite signifikant höher ist als in den Buntsandsteinböden. Dies hat zur Folge, dass an der West- und Ostseite die Basensättigung der Buntsandsteinböden fast dreimal so hoch ist, als die der Granitböden. Da bei Versauerungsprozessen und insbesondere bei der Verwitterung der Tonminerale Al^{3+} -Ionen freigesetzt werden und diese als freie Ionen toxisch wirken, werden diese vermehrt an die Austauscher gebunden und die Austauscherplätze für wichtige Nährstoffe, wie Magnesium oder Calcium blockiert, die Basensättigung ist geringer und die Gefahr der Versauerung steigt. Folglich sind die Granitböden stärker versauert als die Buntsandsteinböden.

4.5 Einfluss der Kalkungsmaßnahmen im Schwarzwald

4.5.1 Wirkung von Kalkungsmaßnahmen

Bei Kalkungsmaßnahmen handelt es sich um längerfristige Umstellungen des Gesamtsystems, wobei entweder einer zunehmenden Degradierung vorgebeugt werden (Schutz- oder Kompensationskalkung) oder eine Regradation der vom Menschen negativ beeinflussten Ökosysteme erreicht werden soll (Regradationskalkung). Im Gegensatz dazu dienen Düngungsmaßnahmen der Beseitigung akuter Mängel durch die gezielte Zufuhr von schnell löslichen Nährstoffen (ELLING ET AL. 2013).

Die Bodenversauerung und Bodenentbasung stellen die zentralen Probleme der Wälder dar (FVA 2000, IMMER ET AL. 1993, ULRICH 1986). Diese werden durch externe Säureinträge und interne Säureproduktion hervorgerufen und schreitet in den Wäldern mehr oder weniger rasch voran. Bei hohen Säureinträgen werden Silikate, vor allem Tonminerale aufgelöst und deren Austauscheroberflächen, die idealerweise von kationischen Nährstoffen besetzt sind, werden durch Aluminiumoxide blockiert, was zu einer Verminderung der Speicherkapazität für pflanzenverfügbare Nährelementkationen führt (FVA 2000). Die Kalkung zielt darauf ab, diese Säurebelastungen zu kompensieren und die Säureneutralisationskapazität der Böden zu stärken. Durch den zunehmenden Eintrag von Säuren und die voranschreitende Bodenversauerung werden basische Elemente, wie Magnesium, Calcium und Kalium ausgewaschen und die Pufferkapazität der Böden, die im Wesentlichen durch die Menge dieser Elemente bestimmt wird, nimmt ab. Da die basischen Elemente auch essentielle Makronährelemente für die Wälder sind, treten neben dem Verlust der Pufferkapazität der Böden auch Störungen in der Ernährung des Waldbestandes auf. Aufgrund dieser schwerwiegenden Gefahren für die Wälder ist eine Kalkung unumgänglich. Somit hat eine Kalkung mehrere sich gegenseitig bedingende Ziele. Zum einen wird eine Verbesserung und Stabilisierung des Nährelementkreislaufes angestrebt, das Puffervermögen der Waldböden für Säureinträge soll gestärkt und das Austauschgleichgewicht in Richtung einer Speicherung von austauschbaren basischen Kationen verschoben werden.

Aufgrund der fortschreitenden Versauerung der Waldböden und der daraus folgenden Destabilisierung der Waldökosysteme haben sich die Kalkungsmaßnahmen in den letzten Jahren verändert. In der Vergangenheit wurden Meliorationskalkungen durchgeführt, um die in der Humusaufgabe gespeicherten Nährstoffe zu mobilisieren und den Pflanzen verfügbar zu machen. Seit den 70er-Jahren steht die Neutralisations- oder Schutzkalkung im Vordergrund, bei der die Neutralisation saurer Depositionen und die Zufuhr von Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen angestrebt werden (ELLING ET AL. 2013, HÜTTL 1989, EVERS 1989). Zur Beurteilung der Kalkungsbedürftigkeit werden der pH-Wert, die Ca-Sättigung im OH-Horizont, die Basensättigung des Mineralbodens, sowie das Ca/Al-Molverhältnis der Bodenlösung herangezogen (vergl. Tab. 33).

Tab. 33: Kriterien für die Kalkungsbedürftigkeit von Waldböden, angelehnt an ELLING ET AL. 2013: 344.

Kalkung erforderlich	Ca-Sättigung im OH-Horizont	< 10 v.H.
	pH(in KCL) im Mineralboden	< 4,2
	Ca+Mg-Sättigung im Austauscher (Ake)	< 15 v.H.
	Ca/Al-Verhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung	< 1
Kalkung dringend erforderlich	Ca-Sättigung im OH-Horizont	< 10 v.H.
	pH (in H ₂ O) im OH-Horizont	< 3,0
	pH (in H ₂ O) im Mineralboden	< 4,2
	pH (in KCl) im Mineralboden	< 3,8
	Ca+Mg- Sättigung am Austauscher (Ake)	< 5-15 v.H.
	Ca/Al-Verhältnis (mol/mol) in der Bodenlösung	< 0,3

Wie in Untersuchungen nachgewiesen wurde, sind durch die Schutzkalkungen hervorgerufenen Pufferwirkungen zeitlich begrenzt (vergl. u.a. IMMER ET AL. 1993, KENK ET AL. 1984). Allerdings konnte eine Erhöhung der Basensättigung des Austauschers und eine Erhöhung der Ca/Al-, Mg/Al-, Ca/H- und Mg/H- Ionenverhältnisse nachgewiesen werden (vergl. u.a. REHFUESS 1990:18, EBERL 2001, NOHRSTEDT 2002, SUCKER 2008). Der Einfluss der Kalkung zeigt sich vor allem im Oberboden, aber es lassen sich bis in eine Bodentiefe von 90 cm signifikante Auswirkungen nachweisen (SUCKER ET AL. 2009). Zudem ist von Bedeutung, dass die Kalkungsmaßnahmen nicht nur eine Verbesserung des Zustandes der Waldböden erwirken, sondern auch eine verbesserte Qualität des Grund- und Oberflächenwassers hervorrufen, was aufgrund der in Kapitel 1.1 beschriebenen Problematik in Bezug auf die Trinkwasserqualität ein nicht zu vernachlässigender Effekt ist und die Bedeutung und Wichtigkeit der Kalkung erhöht (SUCKER ET AL. 2009). Neben den positiven Auswirkungen auf den Bodenchemismus werden in der Literatur die Folgen für die Bodenorganismen gegensätzlich diskutiert und negative Folgeerscheinungen werden angedeutet. So weisen WOLTERS ET AL. 1995 und LORENZ ET AL. 1998 darauf hin, dass durch Kalkungsmaßnahmen schützenswerte Tiere, wie z.B. die Ameise, negativ beeinflusst werden können und dass durch die Homogenisierung der Bodenbedingungen die Gefahr des Verlustes an Biodiversität bedacht werden muss. Daher wird eine Begleitung der Kalkungsmaßnahmen durch bodenbiologische Monitoring-Programme vorgeschlagen (WOLTERS ET AL. 1995). Vor allem an Standorten, bei denen bereits hohe Stickstoff-Sättigungsgrade vorherrschen, besteht die Gefahr der Nitratauswaschung. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass die Kalkung im Herbst oder Winter erfolgt, um einer Schädigung der Tiere auf der Bodenoberfläche entgegenzuwirken.

Fasst man die positiven und negativen Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen zusammen, kann festgestellt werden, dass die Kalkung unter Beachtung gewisser Regeln, ein geeignetes Mittel ist, um die negativen Entwicklungen der Waldökosysteme zu mindern (ELLING ET AL. 2013:349).

Die Waldkalkungen zur Melioration saurer Böden werden nur im Schwarzwald und nicht in den Vogesen durchgeführt. Daher soll bei dieser Untersuchung der Vergleich der chemischen Kennwerte der gekalkten Schwarzwaldböden und der ungekalkten Vogesenböden im Vordergrund stehen. Zudem werden die chemischen Eigenschaften der Quellwässer in beiden Gebieten vergleichend betrachtet und die positive Auswirkung der Kalkung auch auf das Grund- und Quellwasser soll aufgrund der Daten untermauert werden.

4.5.2 Durchgeführte Maßnahmen im Schwarzwald

Die FVA (2000) unterteilt die Orte je nach Kalkungsdringlichkeit folgendermaßen:

- Dringend meliorationsbedürftige Standorte: Basensättigung < 5%, pH (KCL) < 3
- Meliorationsbedürftige Standorte: Basensättigung < 15%, pH (KCL) < 3,8
- Nicht meliorationsbedürftige, gut gepufferte Standorte: Basensättigung > 15%, pH (KCL) > 4

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die „Vorerkennung“ der Meliorationsbedürftigkeit von Waldböden nur eingeschränkt möglich ist (vergl. FVA 2000). In den Jahren 1984-1995 wurden in Baden-Württemberg etwa 162.000 ha. gekalkt. Insgesamt sind rund 600.000 ha Wald dringend meliorationsbedürftig und rund 200.000 ha. meliorationsbedürftig (FVA 2000). Bei der Betrachtung dieser Zahlen wird die Dringlichkeit und Notwendigkeit der Kalkungen deutlich.

In Karte 6 sind alle für die Schwarzwaldquellen relevanten gekalkten Gebiete dargestellt.

In der folgenden Tabelle und Abbildung (Tab. 34, Abb. 52) ist die Kalkungsmenge in den Gebieten der verschiedenen Schwarzwaldlagen aufsummiert.

Tab. 34: Kalkungsmenge in den verschiedenen Schwarzwaldlagen, Daten: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.

	Kalkungsmenge (Dezitonnen pro Hektar)
Schwarzwaldwestseite	625
Schwarzwaldkamm	761
Schwarzwaldostseite	689

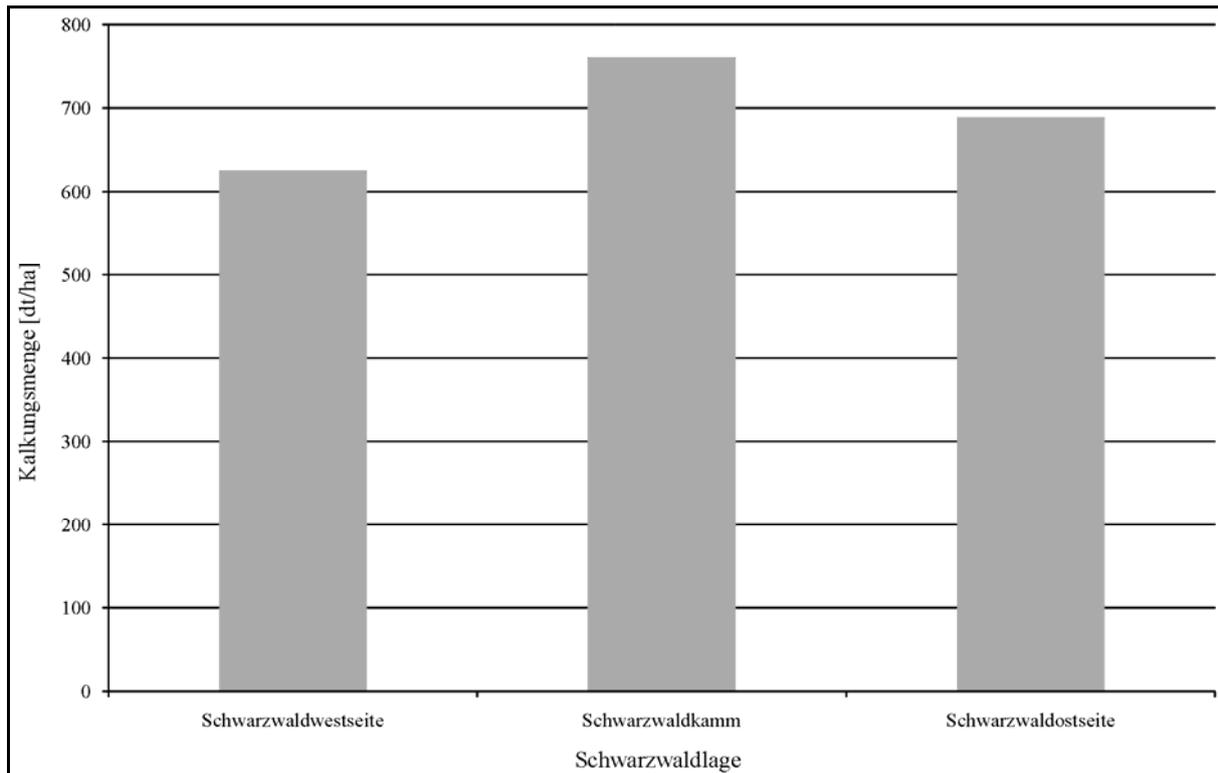
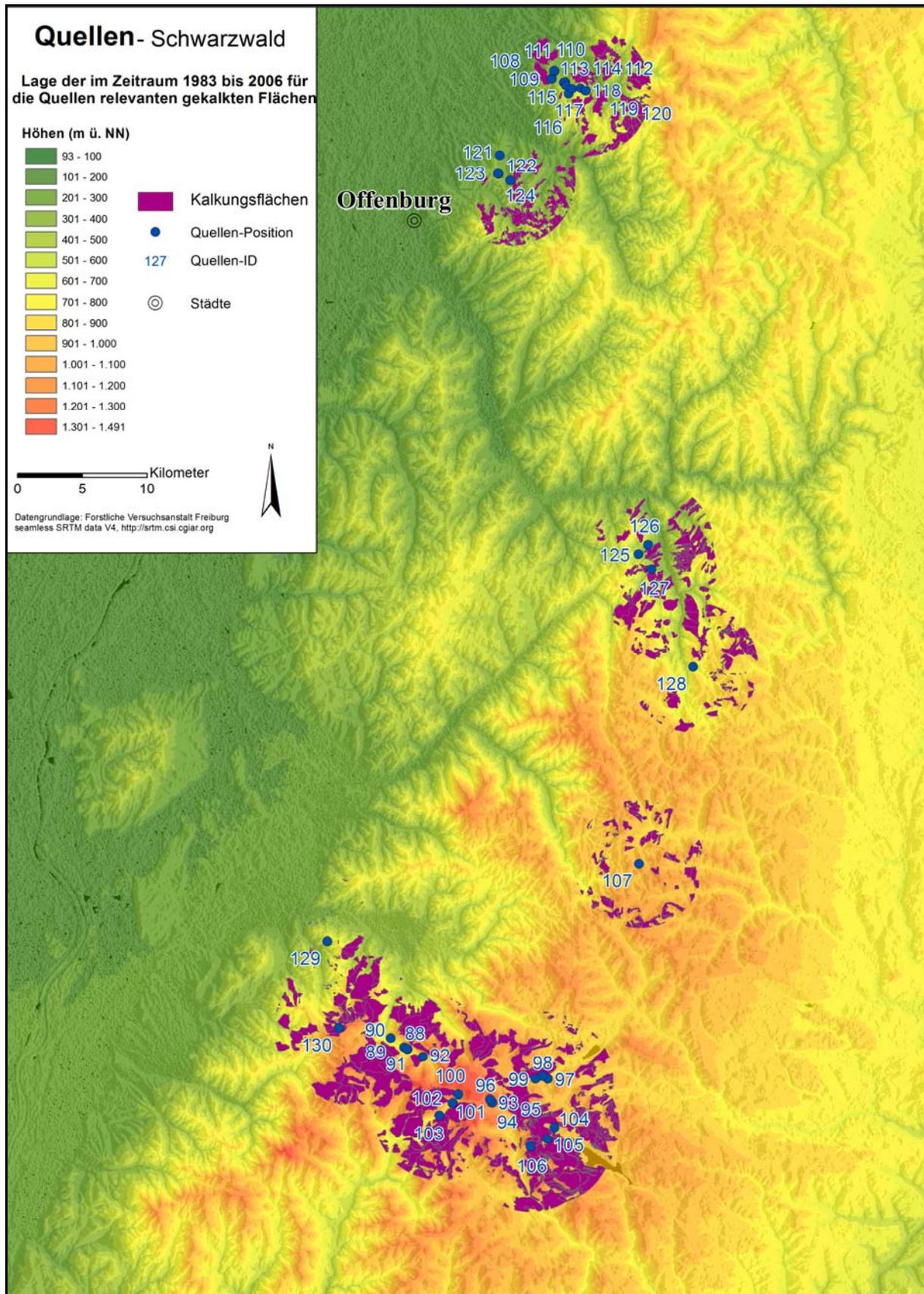


Abb. 52: Kalkung in den verschiedenen Lagen, Datengrundlage: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.

Es wird deutlich, dass am Kamm zwischen 1990 und 2010 mit insgesamt 761 dt. am meisten gekalkt wurde. An der Westseite ergibt sich eine Kalkungsgesamtmenge im gleichen Zeitraum von 625 dt. und an der Ostseite von 689 dt. Die Kalkungsmittel sind kohlensaure Kalke, sowie Kalke und Dolomite mit weicherdigem Rohphosphat (vergl. Tab. 35)

Tab. 35: Kalkungsarten im Schwarzwald, Daten: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, EIGENE DARSTELLUNG.

Kalkungsart	
110	Kohlensaurer Kalk: CaCO ₃ mit MgO > 12%
111	Kohlensaurer Kalk: CaCO ₃ mit MgO > 12%
122	Kalke und Dolomite mit weicherdigem Rohphosphat: CaCO ₃ mit MgO > 12% mit P ₂ O ₅ -Anteilen > 3 %
121	Kalke und Dolomite mit weicherdigem Rohphosphat: CaCO ₃ mit MgO > 12% mit P ₂ O ₅ -Anteilen > 3 %
120	Kalke und Dolomite mit weicherdigem Rohphosphat: CaCO ₃ mit MgO > 12% mit P ₂ O ₅ -Anteilen > 3 %
200	Dünger



Karte 6: Für die Schwarzwaldquellen relevante Kalkungsgebiete, Datengrundlage: FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

4.5.3 Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen auf die Böden und Quellwässer

Um die Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen zu verdeutlichen, werden die mittleren H^+ -Ionenkonzentrationen in den Böden der verschiedenen Vogesenlagen im Vergleich zu den mittleren H^+ -Ionenkonzentrationen in den Böden der verschiedenen Schwarzwaldlagen betrachtet.

Tab. 36: Mittlere H^+ -Ionenkonzentration in den Granitböden der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen in 0-20 cm und 80-100 cm Bodentiefe.

Bodentiefe	Vogesenböden (Mittelwert der verschiedenen Lagen)	Schwarzwaldböden (Mittelwert der verschiedenen Lagen)
0-20cm	114,1	107,6
80-100cm	29,9	28,7

Es wird deutlich, dass die mittlere H^+ -Ionenkonzentration in 0-20cm Bodentiefe in den Granitböden der Vogesen höher ist als in den Granitböden im Schwarzwald. Auch in 80-100 cm zeigt sich diese Tendenz, allerdings nähern sich die Konzentrationen mit zunehmender Bodentiefe immer mehr an (vergl. Tab. 36).

Um den Versauerungszustand der Böden besser einschätzen zu können, reicht es nicht aus, nur die H^+ -Ionenkonzentration zu betrachten, sondern die Basensättigung sollte einbezogen werden.

Tab. 37: Basensättigung in den Vogesen- und Schwarzwaldböden (Mittelwert aus den Werten der verschiedenen Lagen).

Bodentiefe	Basensättigung Vogesen (%) (Mittelwert der versch. Lagen)	Basensättigung Schwarzwald (%) (Mittelwert der versch. Lagen)
0-20cm	39,4 %	43,8 %
80-100cm	47,5 %	48,6 %

Die Basensättigung in den Granitböden der Vogesen ist geringer als in den Granitböden des Schwarzwaldes. Der Unterschied wird vor allem in dem Bodenhorizont von 0-20 cm deutlich. Mit zunehmender Bodentiefe gleichen sich die Werte an, da sich die Kalkungsmaßnahmen vor allem im Oberboden auswirken (vergl. Tab. 37).

Neben der H^+ -Ionenkonzentration und der Basensättigung unterscheidet sich die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentrationen in den Böden deutlich.

Tab. 38: Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Vogesen- und Schwarzwaldböden (Mittelwert aus den Werten der verschiedenen Lagen).

	Vogesenböden		Schwarzwaldböden	
	Ca ²⁺ - Ionenkonzentration (meq/kg)	Mg ²⁺ - Ionenkonzentration (meq/kg)	Ca ²⁺ - Ionenkonzentration (meq/kg)	Mg ²⁺ - Ionenkonzentration (meq/kg)
0-20 cm	25,1	13,3	35,3	16,2
80-100 cm	17,2	10,5	12,6	8,9

In 0-20 cm Bodentiefe lässt sich in den Granitböden des Schwarzwaldes eine höhere Ca²⁺- und Mg²⁺- Ionenkonzentration nachweisen als in den Granitböden der Vogesen, während mit zunehmender Bodentiefe die Verhältnisse sogar umgekehrt werden. Auch bei diesem Vergleich wird die Wirkung der Kalkung in den oberen Bodenhorizonten deutlich (vergl. Tab. 38).

Insgesamt kann man aufgrund des Vergleiches der drei Parameter die Aussage treffen, dass die Granitböden in den Vogesen stärker versauert sind als die Granitböden im Schwarzwald. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Vogesen- und Schwarzwaldböden geringer als erwartet. Aufgrund der Kalkungsmaßnahmen hätte man mit stärkeren Unterschieden rechnen können.

Auch bei der Betrachtung des chemischen Zustandes der Quellwässer in beiden Gebieten werden die Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen deutlich. Dabei zeigt sich bei der Betrachtung der H⁺-Ionenkonzentration, dass in den Granitquellen der Vogesen die H⁺-Ionenkonzentration fast viermal so hoch ist wie in den Granitquellen des Schwarzwaldes (vergl. Tab. 39).

Tab. 39: Mittlere H⁺-Ionenkonzentration der Quellen in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

	H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l) (MW der verschiedenen Lagen)
Vogesen	5,4
Schwarzwald	1,5

Neben der H⁺-Ionenkonzentration zeigt auch die Ca²⁺- Ionenkonzentration in den Schwarzwaldquellen den Einfluss der Kalkungsmaßnahmen.

Tab. 40: Mittlere Ca²⁺-Ionenkonzentration aus den Mittelwerten der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

	Ca ²⁺ -Ionenkonzentration (mg/l)
Vogesen	5,4
Schwarzwald	8,2

Es wird deutlich, dass in den Granitquellen des Schwarzwaldes die Ca^{2+} - Ionenkonzentration im Mittel aller Lagen höher sind als in den Vogesenquellen (vergl. Tab. 40).

4.5.4 Notwendige Maßnahmen in den Vogesen

Aufgrund der erhobenen Daten wurde untersucht, ob die Vogesenböden die in Tab. 33 aufgeführten Kriterien für die Kalkungsbedürftigkeit von Waldböden erfüllen und somit Kalkungsmaßnahmen notwendig wären. Bei den untersuchten 59 Standorten ist bei 37 Standorten aufgrund mindestens eines Kriteriums eine Kalkung erforderlich (vergl. Tab. 41, grau hinterlegte Standorte). 18 Standorte sollten aufgrund mindestens eines Kriteriums sogar dringend einer Kalkung unterzogen werden (vergl. Tab. 41, rot hinterlegte Standorte). Nur bei 4 Standorten ist aufgrund der untersuchten Parameter eine Kalkung nicht erforderlich (vergl. Tab. 41, weiß hinterlegte Standorte).

Somit wäre bei 93% der Standorte eine Kompensationskalkungsmaßnahme unbedingt anzustreben, um einer weiteren Versauerung des Waldökosystems entgegenzuwirken.

Tab. 41: Einschätzung der Kalkungsbedürftigkeit anhand ausgewählter Kriterien.

Standortnummer	Lage/Geologie	pH_Wert KCl [MW 0-100cm]	Ca+Mg-Sättigung [%]	Ca/Al [mmol]
B I	WS/GR	4,1	16	1,2
B II, BIII	WS/GR	4	15	0,3
C I, CII, CIII	WS/GR	3,9	22,2	0,4
A	WS/GR	4,3	48,4	5,1
E	WS/GR	4,1	7,2	0,1
FI	WS/GR	3,5	10,3	0,1
D	WS/GR	4,2	14,3	0,3
GIII	WS/GR	3,9	12,6	0,1
GI, GII	WS/GR	3,7	8,5	0,3
U	WS/GR	4	10,4	0,1
AY	WS/GR	3,9	69,3	0,7
BR	WS/BS	4,1	45,1	2,7
W	WS/BS	3,9	16,1	0,9
BX	WS/BS	3,8	42,9	1,9
AV	WS/BS	3,9	50,2	2,5
V	WS/BS	3,8	20,5	4,0
AW	WS/BS	3,7	46,7	3,1
BS	WS/BS	3,8	43,9	1,2
BY	WS/BS	3,9	70,3	4,9
CP	WS/BS	4	11,7	0,3
BW I	Kamm/GR	3,7	46,5	0,9
CE	Kamm/GR	3,7	16,4	0,3
AK	Kamm/GR	3,7	27,7	0,3
AZ	Kamm/GR	3,6	48,5	0,9
BC	Kamm/GR	3,8	33,3	0,6
CF	Kamm/GR	3,9	22,8	0,4
AD	Kamm/GR	3,9	75,4	3,9
CJ	Kamm/GR	3,8	25,8	0,4
CK	Kamm/GR	3,7	13,7	0,3
CG	Kamm/GR	4	34,8	0,7
CI	Kamm/GR	3,9	25,4	0,6
BD	Kamm/GR	3,6	35	0,4
CU	Kamm/GR	4,2	15,4	0,4
CT	Kamm/GR	4,1	10,2	0,1
CS	Kamm/GR	3,9	14,2	0,1
AE	Kamm/GR	4,3	78	6,6
AI	Kamm/BS	3,9	23	0,3

Standortnummer	Lage/Geologie	pH_Wert KCl [MW 0-100cm]	Ca+Mg-Sättigung [%]	Ca/Al [mmol]
AJ	Kamm/BS	3,3	22,2	0,1
AU	Kamm/BS	3,9	64	1,9
AX	Kamm/BS	3,9	73,5	3,6
AH I, AH II	Kamm/BS	3,5	15,5	0,1
P	OS/GR	4,1	23,7	1,5
AL	OS/GR	3,9	27,2	0,6
BE	OS/GR	3,8	52,3	1,2
BZ	OS/GR	4,4	78,6	13,6
BQ	OS/GR	3,9	40,4	1,9
BP	OS/GR	3,6	15,8	0,9
BV	OS/GR	3,8	72,3	4,0
T	OS/GR	3,8	60,2	14,7
AO	OS/GR	4,3	87,2	17,7
BH	OS/GR	4,1	80,4	8,8
S	OS/GR	3,5	30,3	0,9
J	OS/GR	4	75,6	16,9
BU	OS/BS	4,1	80	6,7
AN	OS/BS	3,9	79,2	6,4
BG	OS/BS	3,9	45,5	1,2
CA	OS/BS	4	53,9	1,8
CQ	OS/BS	4	19,9	0,6
BE	OS/BS	3,8	52,3	1,2

4.6 Niederschläge im Untersuchungsgebiet

Da die Niederschlagsmenge in den untersuchten Gebieten stark variiert und den Boden- und Quellgewässerchemismus beeinflusst, wurde nicht nur die Niederschlagsverteilung, sondern auch die chemische Zusammensetzung der Niederschläge genauer analysiert. Es ist bekannt, dass die bewaldeten Einzugsgebiete der Mittelgebirge „einer zunehmenden Gefährdung durch atmosphärische Stoffeinträge unterliegen.“ (GRÜNEWALD & SCHRÖDER 1990:30) Dies ist u.a. damit zu begründen, dass sich die Auskämmeffekte, insbesondere der Fichtenwälder, mit den Prozessen der natürlichen Bodenversauerung und der anthropogen bedingten Versauerung in den Gewässereinzugsgebieten überlagern.

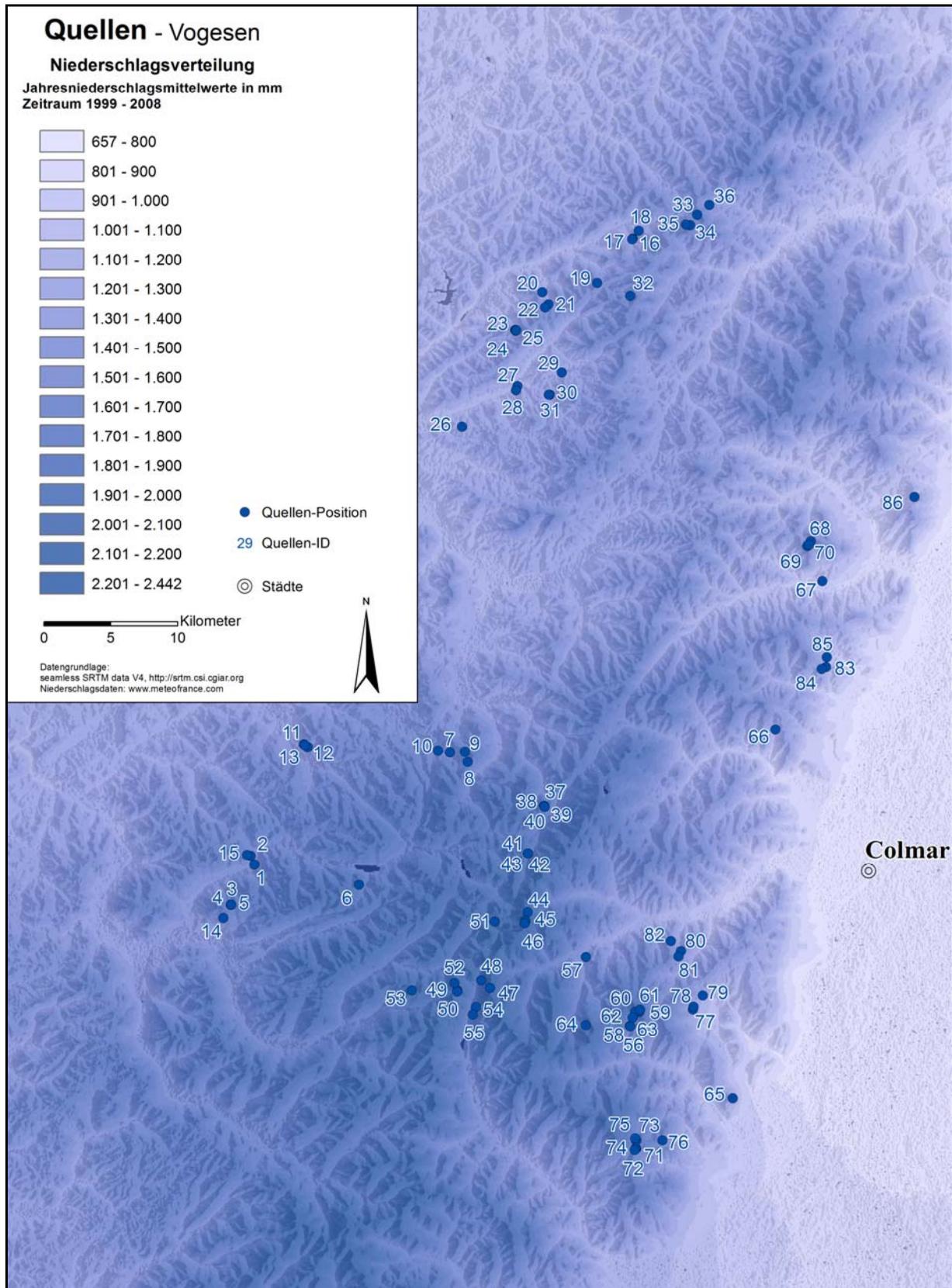
Die chemische Analyse erfolgte anhand von Niederschlägen, die im Gelände im Zeitraum von 2008 bis 2012 in den verschiedenen Gebirgslagen gesammelt wurden (siehe Kapitel 3.3.2 und vergl. Karte 3 und Karte 4).

4.6.1 Niederschlagsverteilung

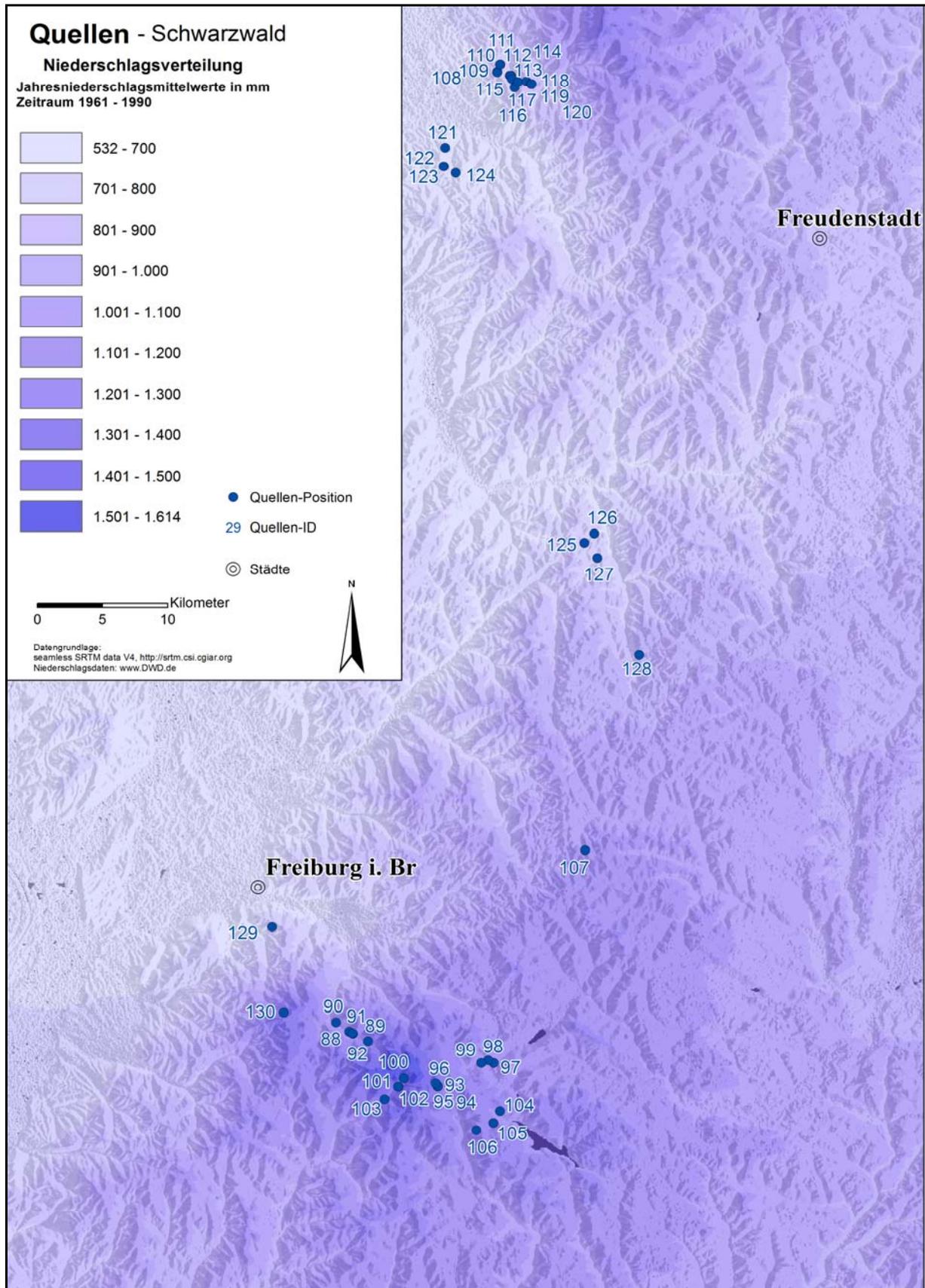
Die Auswahl der Daten richtete sich nach den Quellgebieten und nach der Lage im Untersuchungsgebiet. In den Vogesen wurden insgesamt 58 Stationen (23 auf der Westseite, 7 am Kamm und 28 auf der Ostseite) und im Schwarzwald 25 Stationen (11 an der Westseite, 3 am Kamm und 11 an der Ostseite) ausgewählt (vergl. Tab. A. 7 und Tab. A. 8 im Anhang und Karte 7 und Karte 8) .

Bei der Interpretation der Daten wurde bei der Betrachtung der Lage der Stationen im Untersuchungsgebiet der Aspekt der regional sehr unterschiedlichen Geländebeschaffenheit nicht berücksichtigt. Durch die Reliefspezifika herrschen regional oft sehr spezielle

Verhältnisse (z.B. Luv- und Leeeffekte). Um die Lage einer Station im Untersuchungsgebiet präziser zu betrachten, müsste ein digitales Geländemodell erstellt werden. Dies wäre ein Ansatz für weiterführende Untersuchungen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit waren. Ziel war es in Bezug auf die Niederschlagsverteilung festzustellen und zu untersuchen, ob diese die Interpretation der erhobenen Daten unterstützen und ob sich Korrelationen zwischen Niederschlagsdaten und Quellendaten und/oder Bodendaten nachweisen lassen.



Karte 7: Niederschlagsverteilung in den Vogesen, ENTWURF: ULRICH HONECKER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.



Karte 8: Niederschlagsverteilung im Schwarzwald, ENTWURF: ULRICH HONECKER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

Es ist sinnvoll die Niederschlagsverteilung im gesamten Untersuchungsgebiet, also von der Vogesenwestseite bis zur Schwarzwaldostseite zu betrachten.

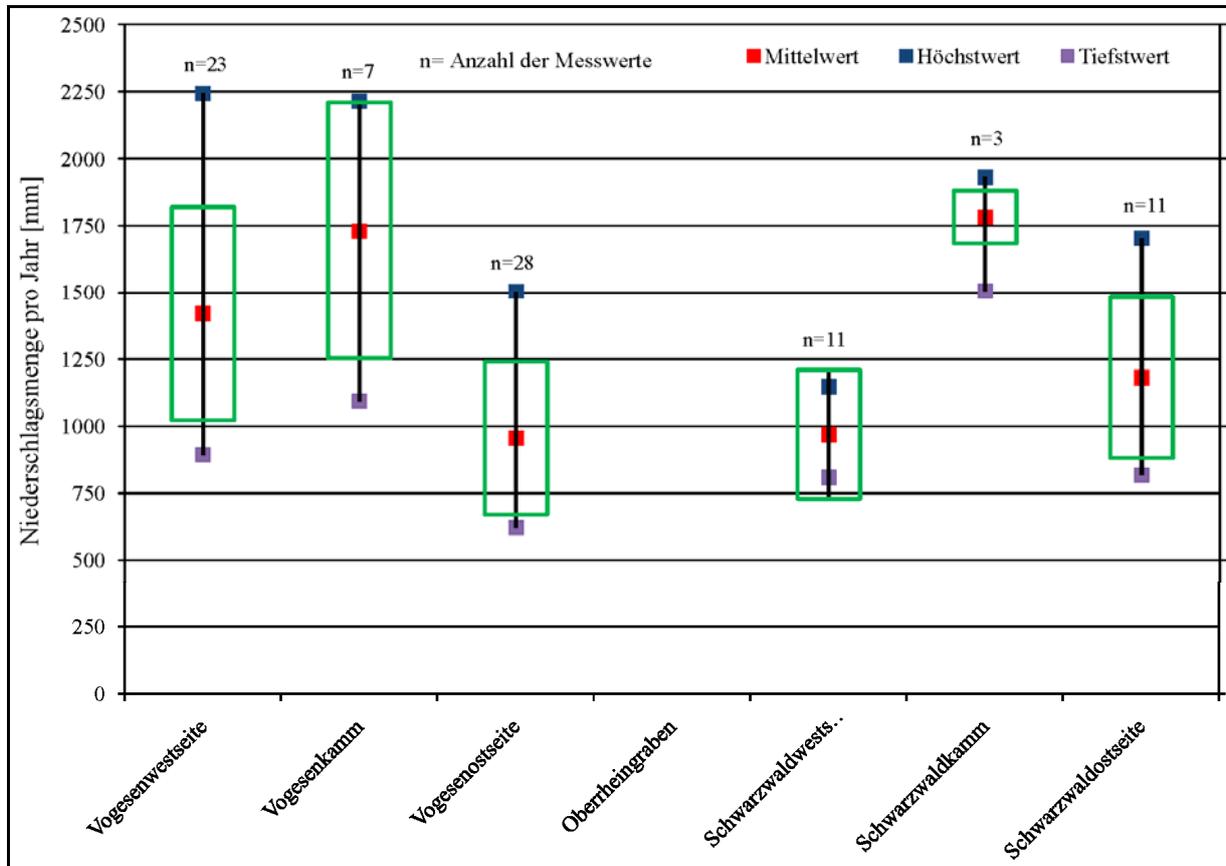


Abb. 53: Mittelwert der Jahresniederschlagssumme in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

In Abb. 53 sowie in Karte 7 und Karte 8 wird deutlich, dass die Niederschlagsmengen je nach der Lage im Untersuchungsgebiet Vogesen–Oberrheingraben-Schwarzwald sehr unterschiedlich sind. Sowohl am Vogesenkamm, als auch am Schwarzwaldkamm fallen im Mittel mit 1731 mm bzw. 1782 mm die meisten Niederschläge. Im Winter fallen diese als Schnee. Weiterhin ist auffällig, dass an der Vogesenostseite und der Schwarzwaldwestseite die mit Abstand wenigsten Niederschläge fallen. Hier werden die Sonderstellung des Oberrheingrabens und dessen Einfluss auf die umliegenden Gebiete deutlich (GLASER & SCHÖNBEIN 2007). Die durch die West- und Südwestwinde herangetragenen Wolken werden zum Aufstieg gezwungen und regnen sich an der Westseite der Vogesen und am Kamm ab. Ein Teil der Wolken gelangt jedoch durch die Südwestwinde durch den Oberrheingraben hindurch. Diese müssen in der Folge den Schwarzwaldkamm überwinden und regnen dabei ab. Außerdem wird anhand der Daten der Kontrast zwischen der Vogesenwest- und Vogesenostseite deutlich (vergl. auch: JAMGNE 2001), der erheblich zu den Versauerungsprozessen in den Quellen und Böden beiträgt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Kämme beider Gebirge mit Abstand die meisten Niederschläge erhalten und die Vogesenostseite und Schwarzwaldwestseite mit den wenigsten Niederschlägen auskommen müssen (vergl. Tab. 42).

Tab. 42: Mittelwerte der Jahresniederschlagssumme in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen, Datengrundlage: METEOFRANCE UND DEUTSCHER WETTERDIENST.

Lage	Vog_WS	Vog_K	Vog_OS	Schw_WS	Schw_K	Schw_OS
Niederschlagsmenge (MW) [mm/Jahr]	1420	1731	956	969	1782	1181

4.6.2 Chemismus der Niederschläge

Neben der Niederschlagsmenge in den verschiedenen Lagen ist die chemische Zusammensetzung der Niederschläge von Interesse. Hierzu wurden in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen Niederschlagsauffanggefäße ausgebracht (vergl. Karte 3 und Karte 4).

Zur Einschätzung des Versauerungsgrades der Niederschläge wurden die H^+ -Ionen- und Al^{3+} -Ionenkonzentrationen untersucht (vergl. Abb. 54 und Abb. 55).

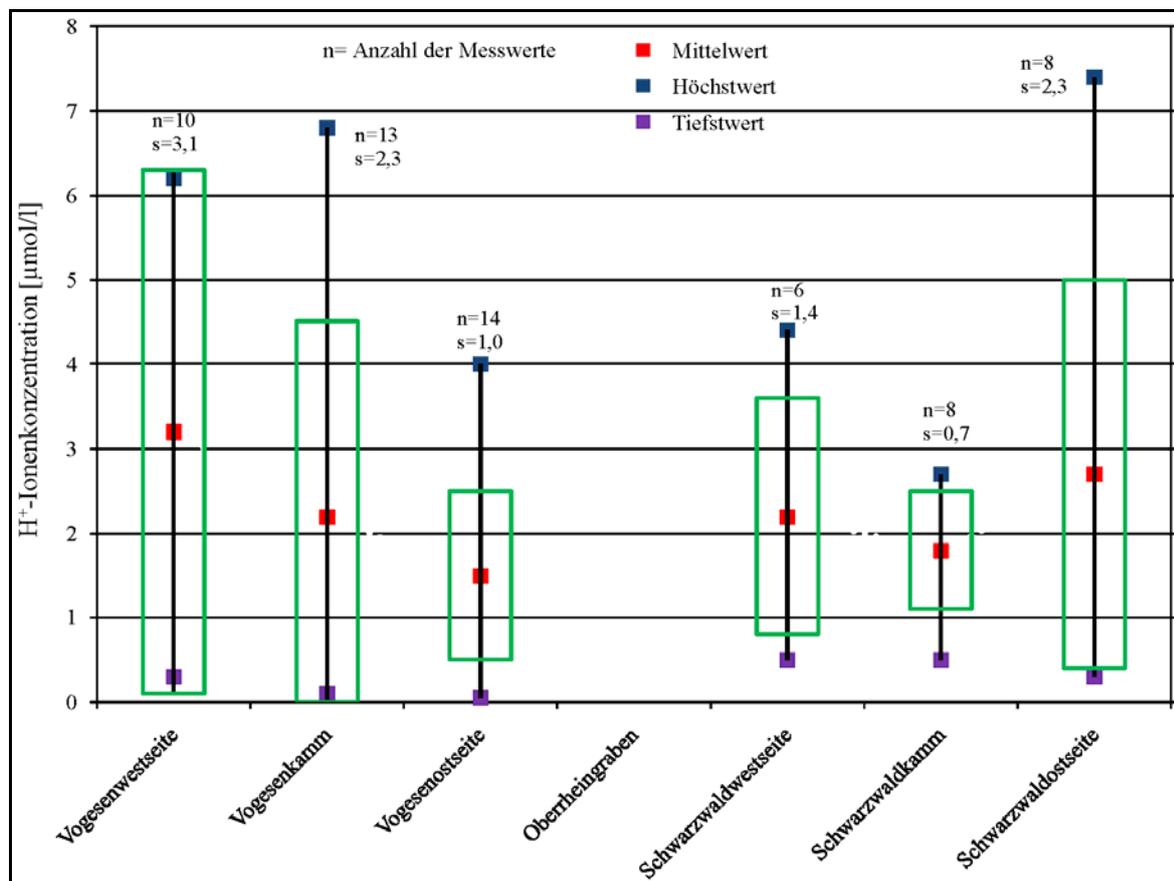


Abb. 54: H^+ -Ionenkonzentration in den Niederschlagsproben der verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

In den Vogesen wird deutlich, dass die Niederschläge an der Westseite und am Kamm deutlich saurer sind als an der Ostseite. Im Schwarzwald ließen sich in den Niederschläge an der Ostseite, also am Oberrheingraben, die höchsten H^+ -Ionenkonzentrationen nachweisen.

Auch die Al^{3+} -Ionenkonzentration zeigt eine Abhängigkeit von der Lage im jeweiligen Gebirge (vergl. Abb. 55).

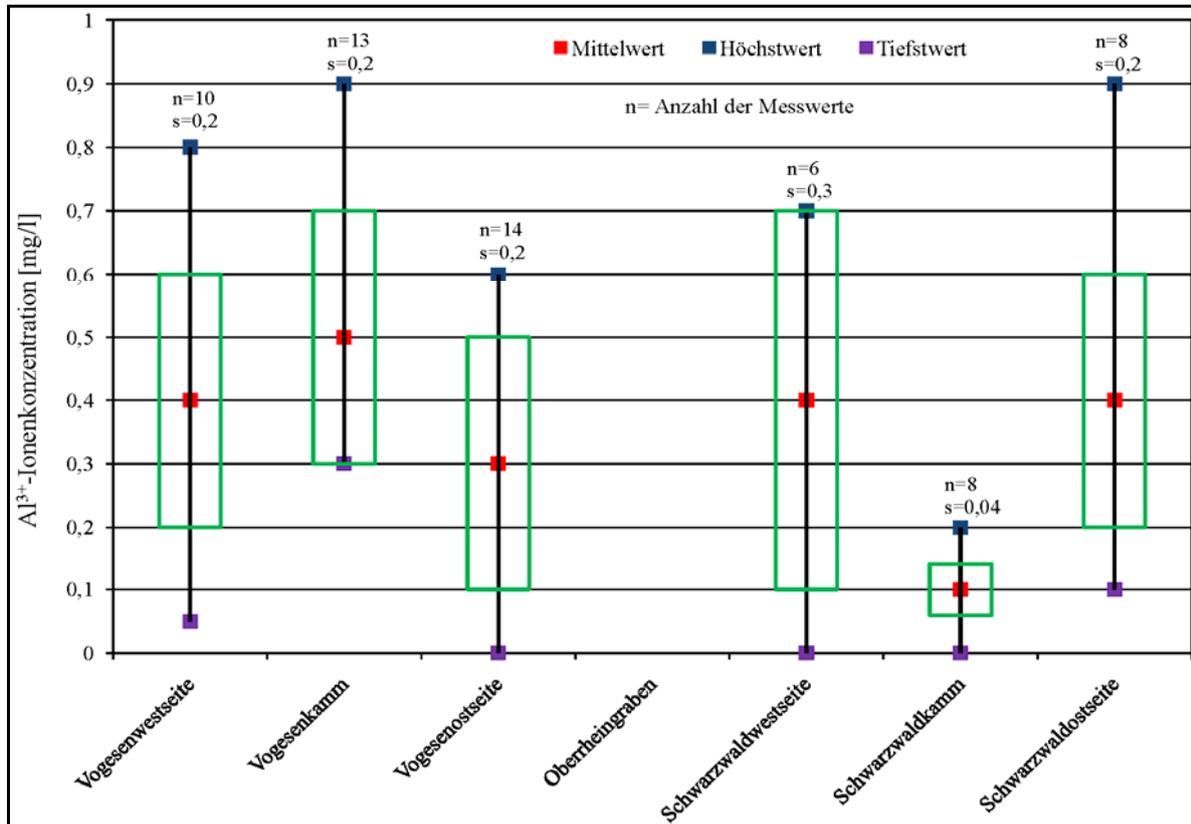


Abb. 55: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Regenproben in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

Am Kamm lassen sich die höchsten Al^{3+} -Ionenkonzentrationen in den Niederschlagsproben nachweisen und an der Ostseite die niedrigsten. Im Schwarzwald hingegen sind die Konzentrationen am Kamm am niedrigsten und an der West- und Ostseite höher.

Insgesamt zeigt die chemische Zusammensetzung der Niederschläge den Einfluss des Reliefs. Allerdings sind die Unterschiede in den meisten Fällen nicht signifikant. Daher soll in einem nächsten Schritt die je nach Gebirgslage vorhandene Elementfracht untersucht werden.

4.6.3 Elementfracht

Um zu untersuchen, ob die Elementfracht den Einfluss des Reliefs zeigt, wurde die mittlere Jahresniederschlagsmenge (in mm bzw. l/m^2) der verschiedenen Gebirgslagen mit der H^+ -Ionenkonzentration und der Al^{3+} -Ionenkonzentration multipliziert.

Tab. 43: Elementfrachten in den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

	Vog_WS	Vog_K	Vog_OS	Schw_WS	Schw_K	Schw_OS
MW der Jahresniederschläge [mm]	1420	1731	956	954	1782	1181
H ⁺ -Ionenfracht [mmol/l pro m ² im Jahr]	4,5	2,6	2,1	2,1	3,1	3,2
Standardabweichung	4,4	1,8	2,2	1,4	1,3	2,7
Al ³⁺ -Ionenfracht [g/l pro m ² im Jahr]	0,5	0,5	0,5	0,4	0,2	0,5
Standardabweichung	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,3

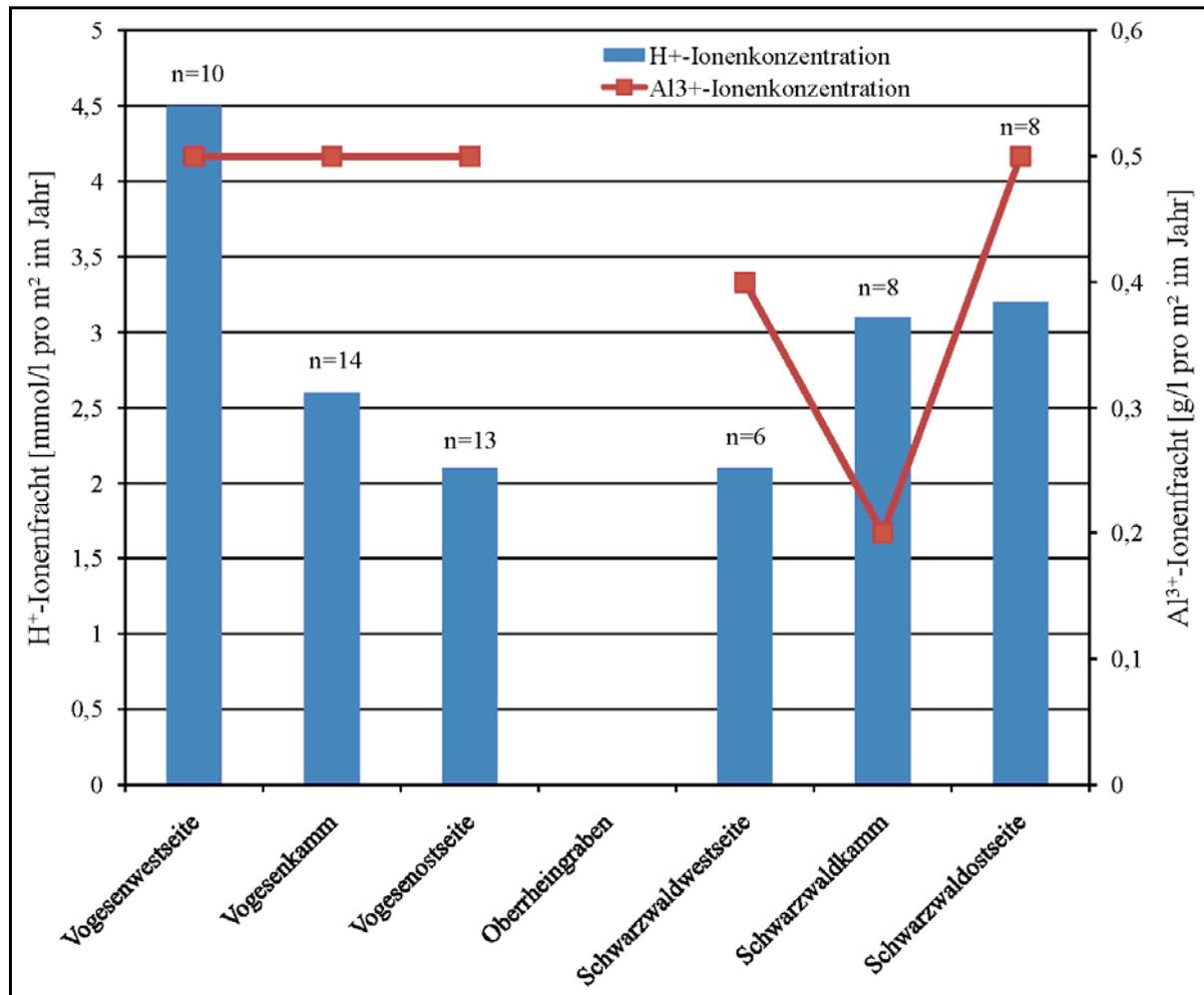


Abb. 56: H⁺-Ionen- und Al³⁺-Ionenfracht in den Niederschlägen in Abhängigkeit vom Relief.

Die Unterschiede der Elementfracht zwischen den verschiedenen Vogesen- und Schwarzwaldlagen sind nicht signifikant. Die H⁺-Ionenfracht nimmt von der Vogesenwestseite über den Vogesenkamm zur Vogesenostseite ab. Im Schwarzwald steigt sie von der Schwarzwaldwestseite über den Schwarzwaldkamm zur Schwarzwaldostseite an. Auch in Bezug auf die H⁺-Ionen- und die Al³⁺-Ionenfracht wird der Einfluss des Oberheingrabens deutlich (vergl. Abb. 56 und Tab. 43). Die Vogesenostseite und die Schwarzwaldwestseite sind vor dem Eintrag der H⁺-Ionen- und Al³⁺-Fracht geschützt.

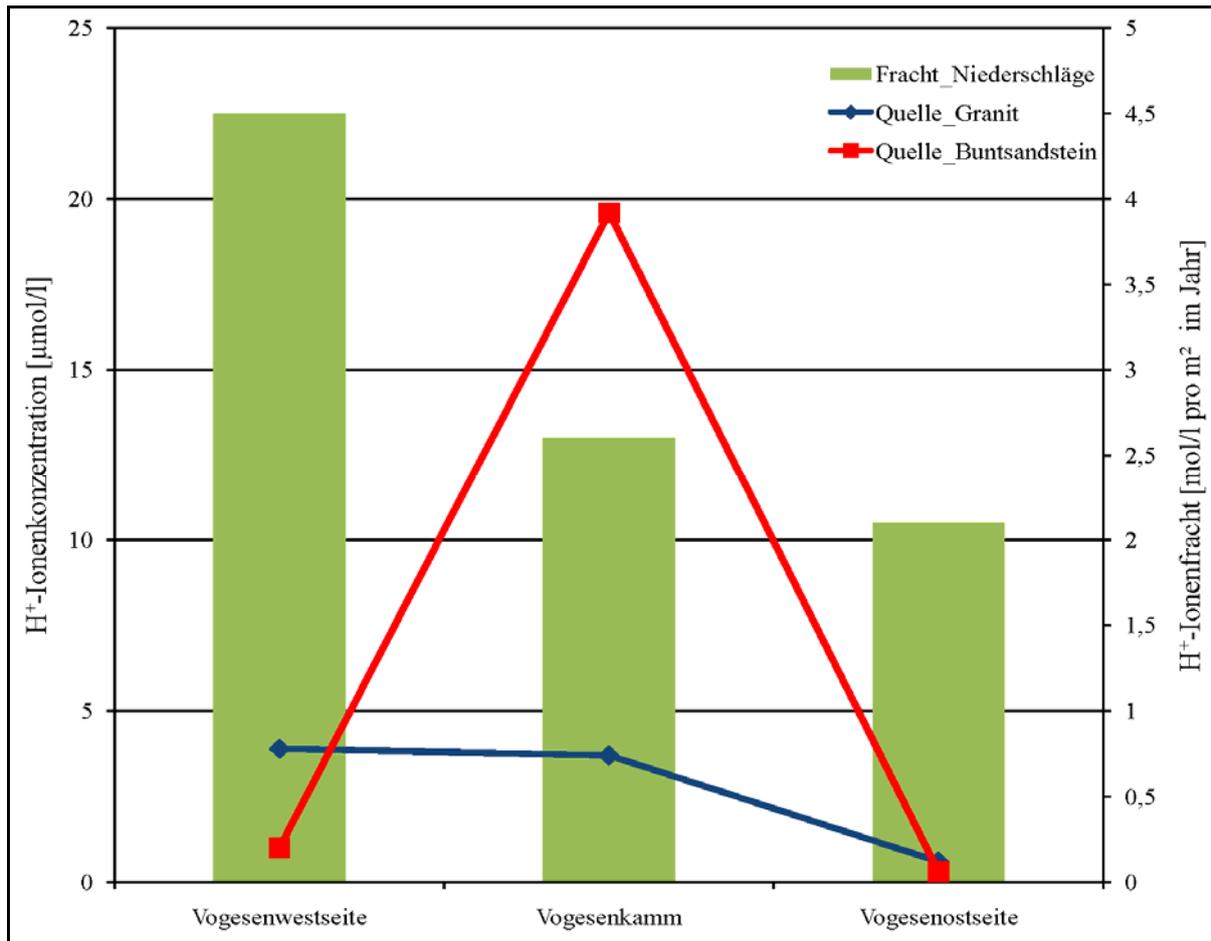


Abb. 57: H^+ -Ionenkonzentration in den Quellen und H^+ -Ionenfracht in den Niederschlägen in Abhängigkeit vom Relief.

An der Vogesenostseite wird deutlich, dass die H^+ -Ionenkonzentration in den Granit- und Buntsandsteinquellen und auch die H^+ -Ionenfracht in den Niederschlägen am niedrigsten ist (vergl. Abb. 57). An der Westseite und am Kamm hingegen sind die H^+ -Ionenkonzentrationen höher und auch die H^+ -Ionenfracht in den Niederschlägen ist deutlich am höchsten.

4.7 Tonmineralanalyse in den Vogesenböden

4.7.1 Einfluss des Reliefs auf die Tonmineralgarnitur im Oberboden

Da zwischen den chemischen Eigenschaften der Böden signifikante Unterschiede aufgrund des Reliefs nachgewiesen werden konnten, sollte die Frage, ob sich die Tonmineralgarnitur ebenfalls in Abhängigkeit des Reliefs verändert, der Klärung einen Schritt näher gebracht werden. Dazu wurden 32 Bodenproben des Oberbodens (0-20cm) in den verschiedenen Vogesenlagen bezüglich des Verhältnisses der Dreischichttonminerale zu den Zweischichttonmineralen untersucht.

Dabei wurde das in Tab. 44 dargestellte Schema angewendet:

Tab. 44: Kategorisierung bzw. Verbalisierung des Mengenverhältnisses der Dreischicht- zu den Zweischichttonmineralen.

Mehrheitlich Dreischichttonminerale
Mehrheitlich Zweischichttonminerale
Ausgeglichenes Verhältnis zwischen Dreischichttonmineralen und Zweischichttonmineralen

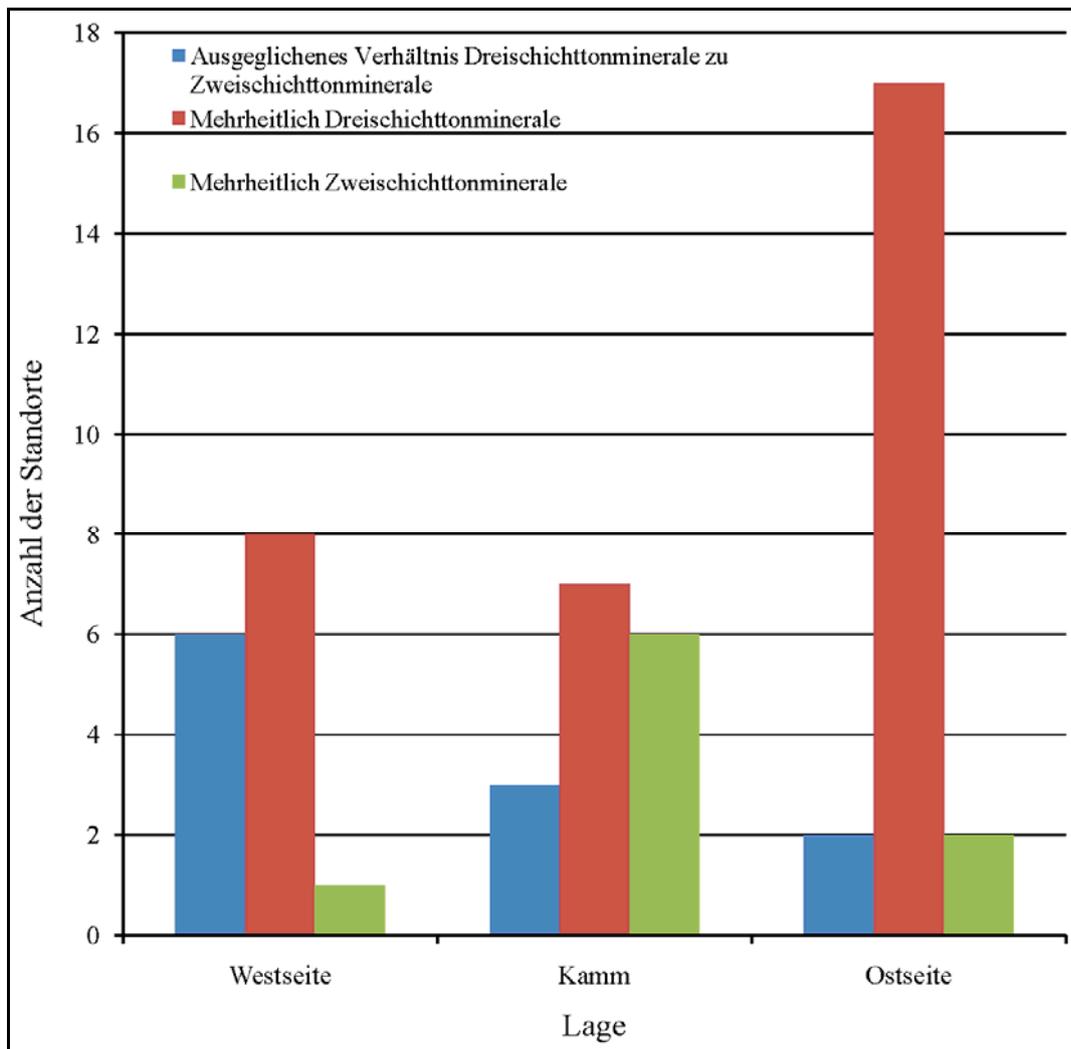


Abb. 58: Tonmineralgarnitur in den verschiedenen Vogesenlagen.

Es konnte gezeigt werden, dass in den Oberböden an der Ostseite mehrheitlich Dreischichttonminerale nachgewiesen werden konnten. Am Kamm hingegen sind die Anteile ausgeglichen oder die Zweischichttonminerale nehmen bereits einen größeren Anteil ein. Somit wurde herausgestellt, dass in den stärker versauerten Oberböden an der Westseite und am Kamm mehrheitlich Zweischichttonminerale nachgewiesen werden konnten, während in den weniger stark versauerten Oberböden der Ostseite mehrheitlich Dreischichttonminerale vorhanden sind (vergl. Abb. 58 und Tab. A. 57 im Anhang).

4.7.2 Tonmineralgarnitur in den Bodentiefen

Anschließend an den Nachweis des signifikanten Einflusses des Reliefs stellte sich die Frage, ob der größere Anteil an Zweischichttonmineralen in den Oberböden an der Westseite und am Kamm daher rührt, dass dort ältere Verwitterungsböden vorherrschen, in denen die Tonminerale innerhalb des gesamten Profils bereits zerstört sind oder ob der Tonmineralabbau aufgrund des Verwitterungs- und Versauerungsvorganges im Oberboden hervorgerufen wird.

Tab. 45: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale im Oberboden (0-20cm Bodentiefe) und im Unterboden (80-100cm Bodentiefe).

Pr. Nr. BT	Vergleich Zweischicht- und Dreischichttone	Lage, Geologie
BC_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR
BC_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR
AZ_OB	Ausgeglichen	K/GR
AZ_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR
AD_OB	Mehrheitlich Zweischichttone	K/GR
AD_UB	Ausgeglichen	K/GR
CS_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR
CS_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR
CIII_OB	Ausgeglichen	WS/GR
CIII_UB	Ausgeglichen	WS/GR
GII_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/GR
GII_UB	Ausgeglichen	WS/GR
GIII_OB	Ausgeglichen	WS/GR
GIII_UB	Ausgeglichen	WS/GR
U_OB	Ausgeglichen	WS/GR
U_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/GR
AO_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
AO_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
T_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
T_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
P_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
P_UB	Ausgeglichen	OS/GR

H_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
H_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
BP_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
BP_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
BE_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
BE_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
AK_OB	Mehrheitlich Zweischichttone	OS/GR
AK_UB	Ausgeglichen	OS/GR
AJ_OB	Mehrheitlich Zweischichttone	K/BS
AJ_UB	Mehrheitlich Zweischichttone	K/BS
E_OB	Mehrheitlich Zweischichttone	WS/GR
E_UB	Mehrheitlich Zweischichttone	WS/GR
W_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS
W_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS
J_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
J_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
BF_OB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/BS
BF_UB	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/BS

Dazu wurde von ausgewählten Proben das Verhältnis von Drei- zu Zweischichttonmineralen in 80-100cm Bodentiefe hinzugezogen (vergl. Tab. 45).

Dabei hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Bodentiefe der Anteil der Dreischichttonminerale zunimmt. In 80-100 cm Bodentiefe sind in allen Proben mehr Dreischichttonminerale vorhanden als im Oberboden (vergl. Tab. 45). Dies bestätigte die Annahme, dass die Abnahme der Dreischichttonminerale im Oberboden durch den Prozess des Tonmineralabbaus, der eine Folge der Bodenversauerung ist, hervorgerufen wird. Bei

diesem Zerstörungsprozess werden Al^{3+} -Ionen freigesetzt. Folglich nehmen in den Proben mit höherem Anteil an Zweischichttonmineralen die Al^{3+} -Ionen mit mehr als 50% einen größeren Anteil an der KAK_{eff} ein als in den Böden mit größerem Anteil von Dreischichttonmineralen (vergl. Tab. 46).

Tab. 46: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale und der Al^{3+} -Ionen an der KAK_{eff} in ausgewählten Bodenproben im Oberboden (0-20cm Bodentiefe) und im Unterboden (80-100cm Bodentiefe).

Pr.Nr. BT	Anteil der Al^{3+} -Ionen an KAK_{eff} [%]	Verhältnis Tonminerale
AK_OB	52,5	Mehrheitlich Zweischichttone
AK_UB	39,6	Ausgeglichen
AJ_OB	58,1	Mehrheitlich Zweischichttone
AJ_UB	53,9	Mehrheitlich Zweischichttone
U_OB	24,1	Ausgeglichen
U_UB	13	Mehrheitlich Dreischichttone
AZ_OB	40,2	Ausgeglichen
AZ_UB	16,9	Mehrheitlich Dreischichttone

Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass das Relief einen Einfluss auf die Tonmineralgarnitur hat und diese den Verlauf der Versauerungsfront widerspiegelt, da in 80-100 cm Bodentiefe der Anteil der Dreischichttonminerale zunimmt und folglich die Zerstörung dieser im Oberboden auf die fortschreitenden Versauerungsprozesse zurückzuführen sind.

4.8 Versauerungsfront in den Vogesenböden

Untersuchungen zum chemischen Zustand von Waldböden haben sich schon in den 70er- und 80er Jahren mit der Frage nach dem Tiefengradient der Bodenversauerung beschäftigt (vergl. u.a. SHRIVASTAVA 1976, EDER 1979, GEHRMANN ET AL. 1987). Es wurde unter anderem festgestellt, „dass die Zone geringer Basensättigung (...) bei über 2/3 der Waldböden Nordwestdeutschlands unter den Wurzelraum von 60 cm bis 80 cm Bodentiefe hinab reicht.“ (ULRICH 1989:81) Aufgrund der Wichtigkeit der Versauerungsfront für den Zustand der Waldböden sollte auch in den Vogesen die Frage nach der Lage der Versauerungsfront innerhalb der Bodenprofile in Abhängigkeit des Reliefs untersucht werden.

Die Feststellung der Lage der Versauerungsfront innerhalb der Profile der Schwarzwaldböden sollte innerhalb der Untersuchung nicht betrachtet werden, da die Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen in den verschiedenen Bodentiefen und die Wirkungsdauer der Maßnahmen in der Wissenschaft nicht eindeutig geklärt sind (vergl. u.a. HILDEBRAND 1990, HÖCKE 2006).

Als Indikatoren zur Ermittlung der Versauerungsfront wurden die Summe des Anteils der Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration und der Anteil der Al^{3+} -Ionenkonzentration an der KAK_{eff} im Bodenprofilverlauf herangezogen (vergl. ULRICH & MALESSA 1988). In der Bodentiefe, in der der Anteil der Summe der Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration wieder zunimmt und der Anteil der Al^{3+} -Ionenkonzentration abnimmt, befindet sich die Versauerungsfront, d.h. bis in diese Tiefe werden die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen zur Pufferung herangezogen (ULRICH 1989).

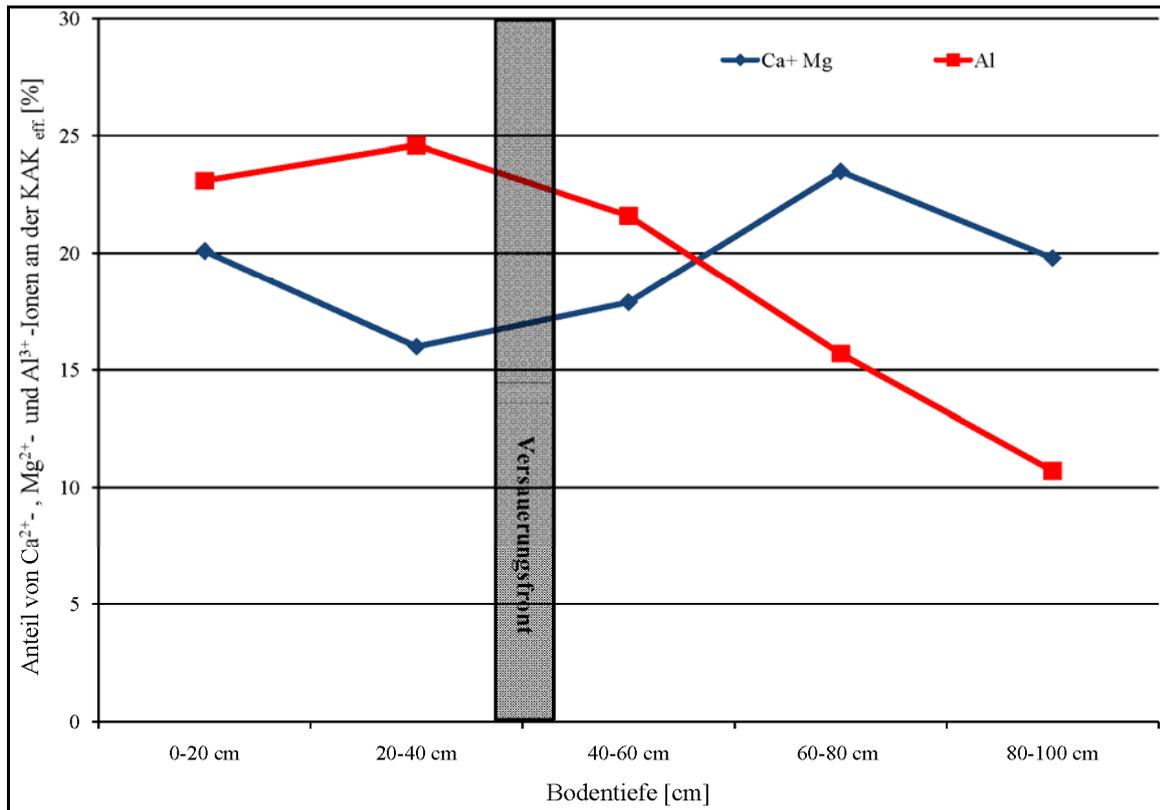


Abb. 59: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden der Vogesenwestseite.

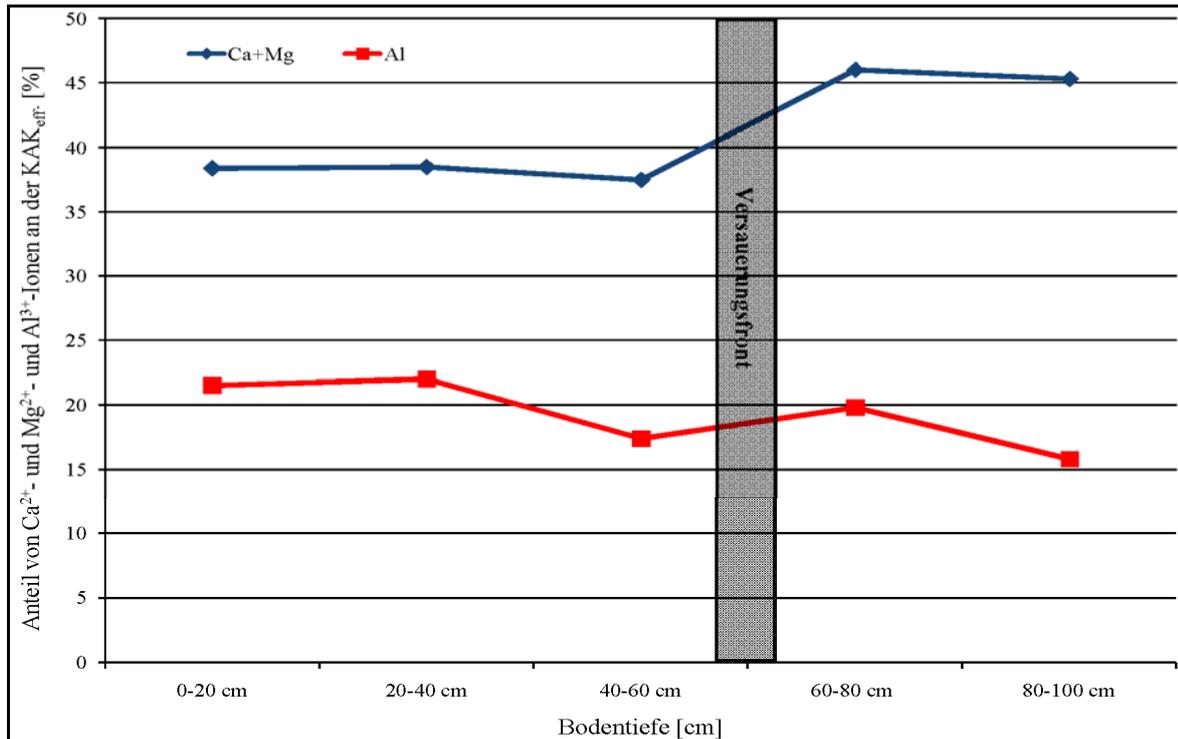


Abb. 60: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.

An der Vogesenwestseite sind die Granitböden momentan bis in eine Bodentiefe von 20-40 cm so stark versauert, dass kein Anstieg des Anteils der Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen an der KAK_{eff} nachweisbar ist. In den Buntsandsteinböden ist die Versauerungsfront bis in eine Tiefe von 40-60 cm vorgedrungen (vergl. Abb. 60).

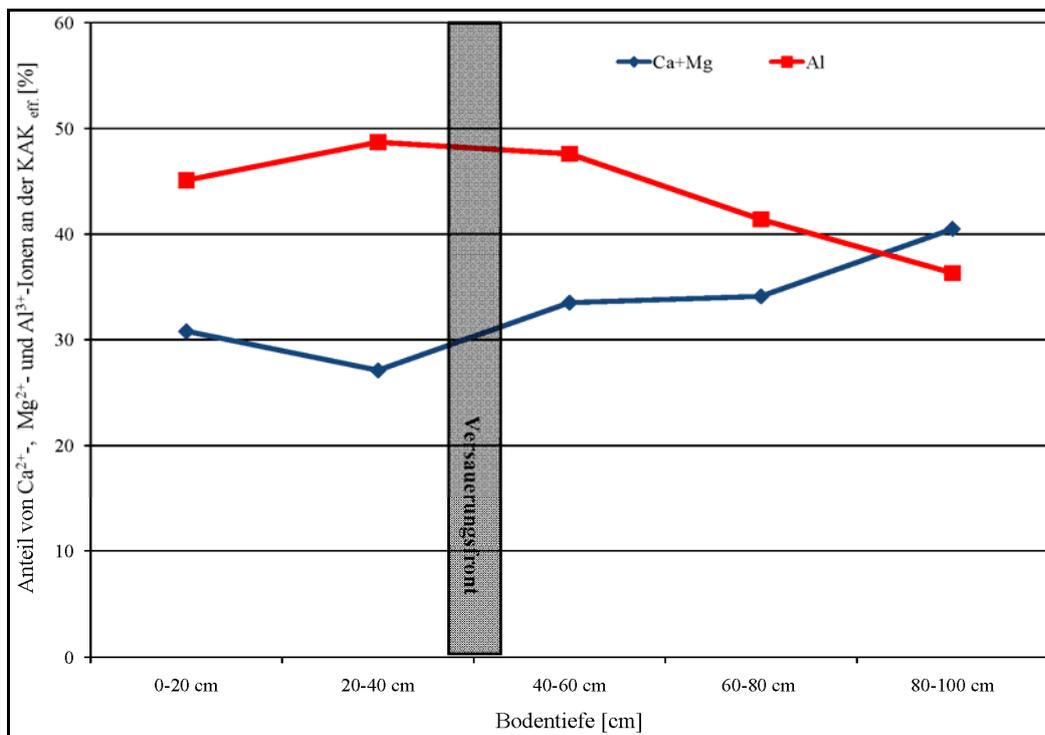


Abb. 61: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden des Vogesenkammes.

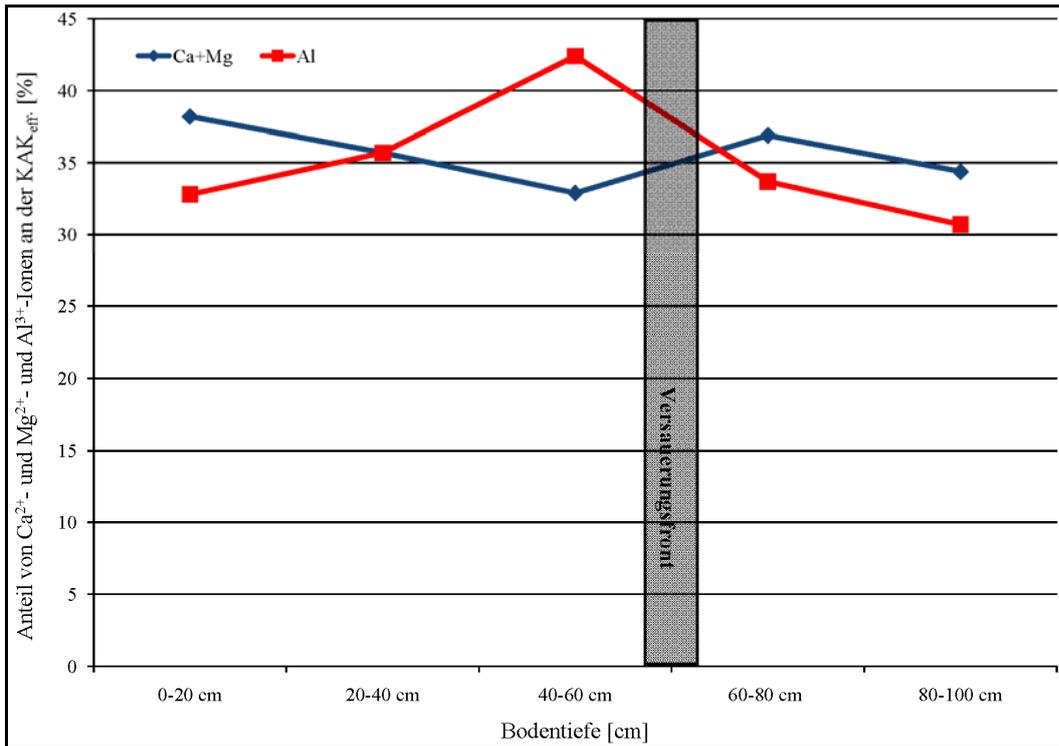


Abb. 62: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.

Am Vogesenkamm hat sich die Versauerungsfront in den Granitböden in 20-40 cm und in den Buntsandsteinböden in 40-60 cm Bodentiefe verlagert (vergl. Abb. 61, Abb. 62 und Tab. 47).

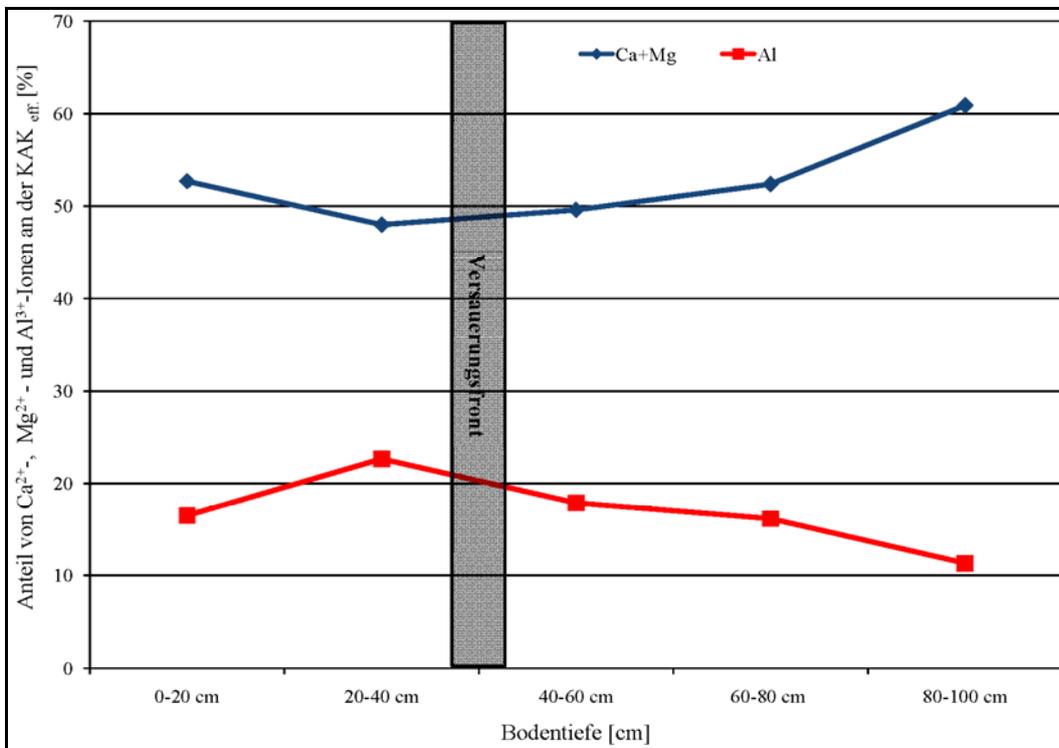


Abb. 63: Lage der Versauerungsfront in den Granitböden der Vogesenostseite.

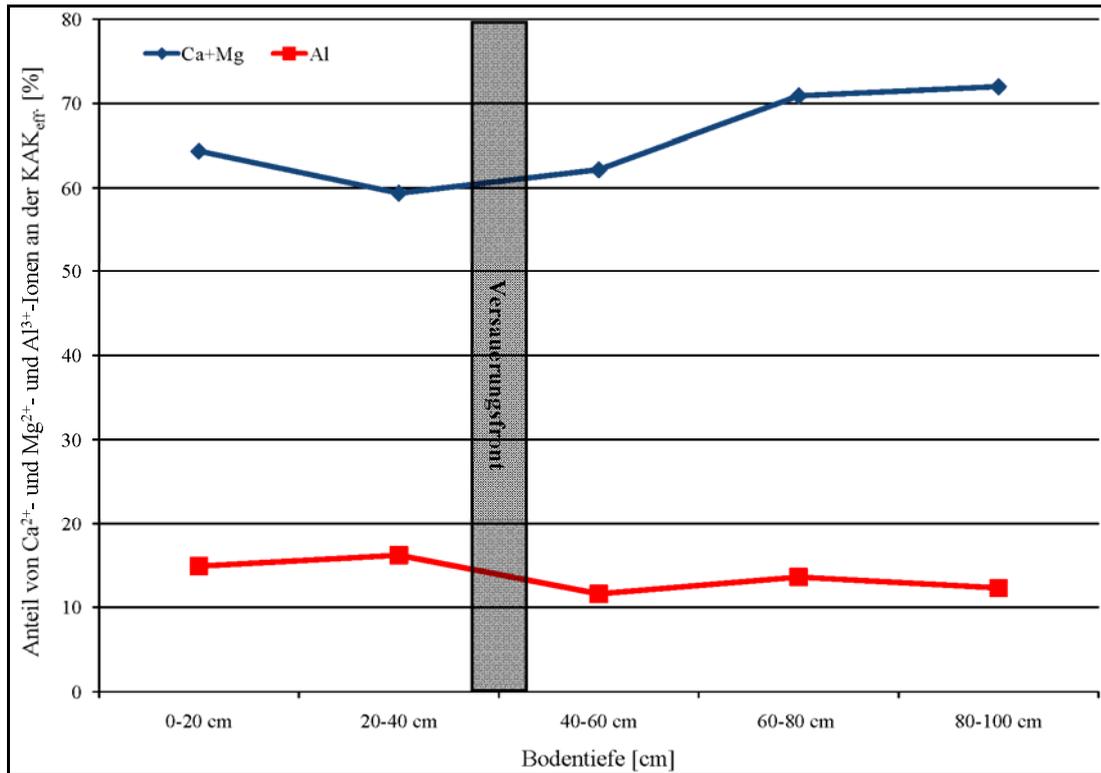


Abb. 64: Lage der Versauerungsfront in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite

In den Böden an der Vogesenostseite lässt sich die Versauerungsfront auf beiden geologischen Untergründen in ca. 20-40 cm nachweisen (vergl. Abb. 63, Abb. 64 und Tab. 47).

Tab. 47: Tiefe der Versauerungsfront in den Böden der verschiedenen Gebirgslagen.

Lage /Geologie	Lage der Versauerungsfront	
	Granit	Buntsandstein
Vogesenwestseite	20-40 cm	40-60 cm
Vogesenkamm	20-40 cm	40-60 cm
Vogesenostseite	20-40 cm	20-40 cm

Wie in den Tab. 47 deutlich wird, befindet sich die Versauerungsfront in den Granitböden der verschiedenen Gebirgslagen in 20-40 cm Bodentiefe. Somit kann kein eindeutiger Einfluss des Reliefs nachgewiesen werden. In den Buntsandsteinböden zeigt sich die Tendenz, dass die Böden an der Ostseite weniger tief versauert sind. Die Versauerungsfront ist nur bis in 20-40 cm Bodentiefe vorgedrungen, während sie sich am Kamm und an der Westseite in 40-60 cm nachweisen lässt.

Neben dem Einfluss des Reliefs konnte in den Böden der Vogesenwestseite und des Vogesenkammes der Einfluss der Geologie nachgewiesen werden. Dort ist die Versauerungsfront innerhalb der Buntsandsteinböden tiefer vorgedrungen als in den Granitböden.

4.9 Gruppierung der Böden hinsichtlich des Versauerungsgrades

Da der Anteil der Basen und Säuren an der KAK_{eff} als eine aussagekräftige Größe zur Einschätzung des Zustandes der Böden gilt, sollte untersucht werden, ob man in den Böden der jeweiligen Pufferbereiche unterschiedliche Anteile an Basen und Säuren nachweisen kann.

Tab. 48: Anteil der Basen an der KAK_{eff} in den Böden der verschiedenen Pufferbereiche in den Vogesen und im Schwarzwald (MW 0-100 cm).

Pufferbereich	Vogesen	Schwarzwald
Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich	68,9%	71,1%
Austauscher-Pufferbereich	45,9%	41,8%
Aluminium-Pufferbereich	30,2%	30,9%

In den Vogesen und im Schwarzwald wird deutlich, dass in den Böden im Aluminium-Puffer-Bereich der Anteil der Basen an der KAK_{eff} im Mittel bei ca. 30% liegt. Die Böden, die sich noch im Kohlesäure-Silikat-Puffer-Bereich befinden, weisen im Gegensatz dazu einen Basenanteil an der KAK von ca. 70% auf (vergl. Tab. 48). Daraus kann gefolgert werden, dass sich Böden mit einem Säureanteil an der KAK_{eff} von über 50% mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bereits im Aluminium-Puffer-Bereich befinden.

4.10 Al^{3+} -und H^+ -Ionenkonzentration in den Quellen

Die mittleren Al^{3+} -Ionenkonzentrationen in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen liegen deutlich über dem Grenzwert der TVO von 0,2 mg/l (TRINKWV 2001). An der Westseite beträgt der Mittelwert in den Granitquellen im Mittel 1,0 mg/l und in den Buntsandsteinquellen 0,9 mg/l. Am Kamm lässt sich in den Granitquellen eine Konzentration von 0,7 mg/l, in den Buntsandsteinquellen von 0,9 mg/l nachweisen, während an der Ostseite die Aluminiumionenkonzentration in den Granitquellen 1,2 mg/l und in den Buntsandsteinquellen 1,5 mg/l beträgt (vergl. Abb. 65). An der Ostseite, bei hohen pH-Werten, konnten auch die höchsten Al^{3+} -Ionenkonzentrationen nachgewiesen werden. Auch im Schwarzwald ist die mittlere Al^{3+} -Ionenkonzentration am Kamm am niedrigsten, obwohl dieser die niedrigsten pH-Werte aufweist.

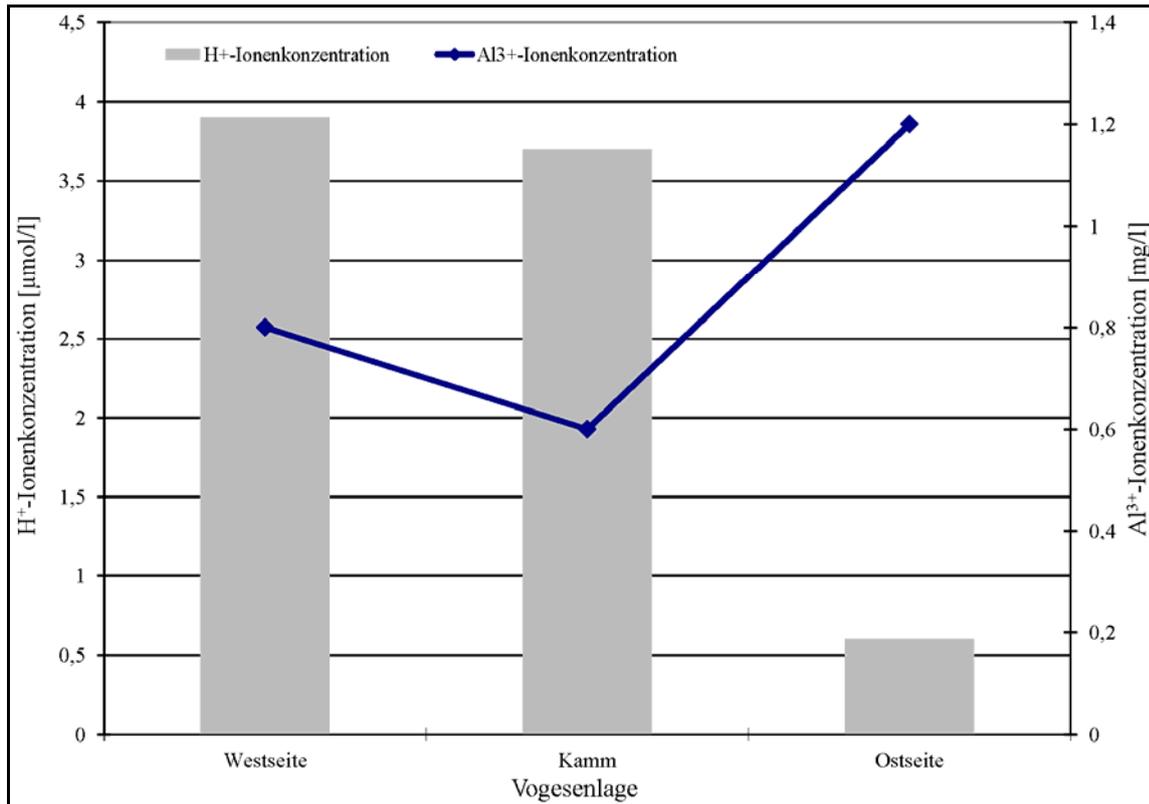


Abb. 65: Vergleich der H⁺-Ionenkonzentration und der Al³⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Vogesenlagen.

Erwartet hätte man, dass am Kamm und an der Westseite, dort wo die pH-Werte am niedrigsten sind, die höchsten Al³⁺-Ionenkonzentrationen nachweisbar sind und an der Ostseite bei höheren pH-Werten die Al³⁺-Ionenkonzentration geringer sind. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die Pufferbereiche, in denen sich Böden befinden. Bei pH-Werten zwischen 4,8 und 3 befinden sich die Böden im Aluminiumpufferbereich, was bedeutet, dass Aluminiumoxide zur Pufferung verwendet werden. Dabei werden Al³⁺-Ionen frei, die in die Quellgewässer gelangen und abgeführt werden. Folglich müssten in den Quellgewässern, wie oben schon beschrieben, bei tieferen pH-Werten mehr Al³⁺-Ionen nachweisbar sein. Dies ist aber nicht der Fall. Im Buntsandstein lassen sich am Kamm mit 0,9 mg/l deutlich weniger Al³⁺-Ionen nachweisen als an der Ostseite. Gleichzeitig ist am Kamm die H⁺-Ionenkonzentration aber am größten. Im Granit zeigt sich der gleiche Zusammenhang.

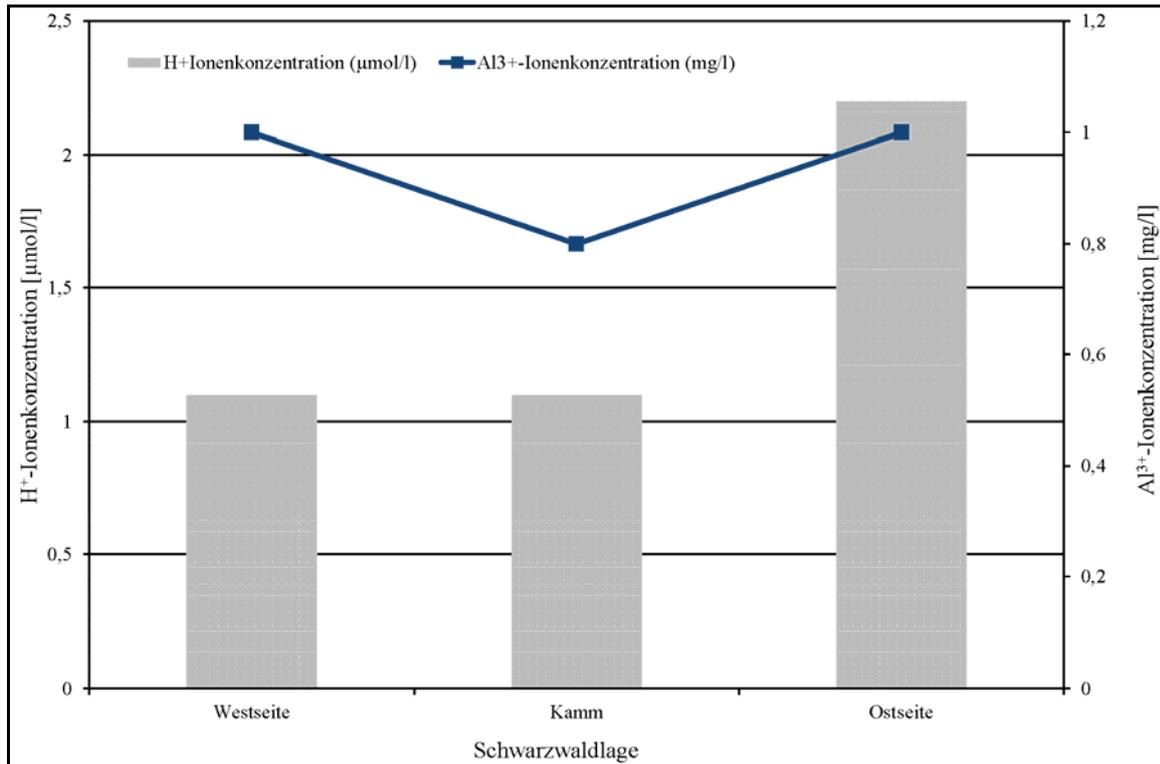


Abb. 66: Vergleich der H⁺-Ionenkonzentration und der Al³⁺-Ionenkonzentration in den Quellen der verschiedenen Schwarzwaldlagen.

Die Tatsache, dass am Kamm bei tiefen pH-Werten niedrige bzw. niedrigere Al³⁺-Ionenkonzentrationen als bei höheren pH-Werten nachweisbar sind, zeigt sich auch im Schwarzwald (vergl. Abb. 66). Folglich ist das Phänomen gebietsunabhängig nachweisbar. Als mögliche Begründung könnte man die Niederschlagsverhältnisse am Kamm anführen. Sowohl in den Vogesen, als auch im Schwarzwald fallen am Kamm die mit Abstand größten Niederschlagsmengen. Als Folge kommt es zu Verdünnungseffekten in den Quellen, sodass nur noch eine geringe Al³⁺-Ionenkonzentration nachweisbar ist.

4.11 Zusammenhänge zwischen chemischen Parametern in beiden Umweltmedien

In den Quellen und im Boden der Vogesen und des Schwarzwaldes sollte die Frage geklärt werden, ob eine Korrelation zwischen den verschiedenen chemischen Parametern nachgewiesen werden kann.

Korrelation zwischen der H⁺-Ionenkonzentration und der Ca²⁺-Ionenkonzentration

Das Verhältnis zwischen der H⁺-Ionenkonzentration und der Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Vogesenquellen lässt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,79 (vergl. Tab. A. 45 im Anhang) als hoch negativ beschreiben (Interpretation der statistischen Ergebnisse vergl. BÜHL 2008). Das bedeutet, dass man in Quellen mit einer hohen H⁺-Ionenmenge, bzw. niedrigen pH-Werten, eine niedrige Ca²⁺-Ionenkonzentration vorfindet. Auch in den

Schwarzwaldquellen lässt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,73 eine hohe negative Korrelation nachweisen (vergl. Tab. A. 45 im Anhang).

Neben den Quellen wurden auch die Böden auf Korrelationen zwischen den beiden Elementen untersucht. In den Vogesen ist die Korrelation in allen Bodentiefen negativ. Mit Korrelationskoeffizienten zwischen -0,33 und -0,41 ist der Zusammenhang nach BÜHL zwar als gering einzustufen, aber er ist signifikant. (vergl. Tab. A. 45 im Anhang). In den Böden des Schwarzwaldes sind die Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten zwischen -0,16 und -0,39 ebenfalls negativ, aber nur der Zusammenhang in 0-20 cm Bodentiefe ist signifikant. Die geringe und zum Teil nicht signifikante Korrelation im Schwarzwald lässt sich mit dem Einfluss der Kalkung begründen. Da bei der Kalkung dem Boden calcium- und magnesiumhaltige Dünger zugefügt werden, können die natürlichen Zusammenhänge nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden. Die insgesamt höheren und signifikanten Korrelationen in den Vogesen bestätigen die These, dass im Schwarzwald der Einfluss der Kalkung deutlich wird.

Insgesamt besteht in beiden Umweltmedien zwischen der H^+ - Ionenkonzentration und der Ca^{2+} -Ionenkonzentration eine negative Korrelation. In den Vogesen ist diese größer als im Schwarzwald, was mit der dortigen Kalkung zu begründen ist.

Korrelation zwischen H^+ -Ionen- und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration

Der Zusammenhang zwischen der H^+ -Ionen- und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Vogesenquellen lässt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,79 als hoch negativ beschreiben (vergl. Tab. A. 45 im Anhang). Somit ist bei einer hohen H^+ -Ionenmenge, also tiefen pH-Werten, eine niedrige Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Quellen zu erwarten. Auch in den Schwarzwaldquellen ist der Zusammenhang negativ. Die Korrelationsprüfung ergibt einen Korrelationskoeffizienten von -0,74, was bedeutet, dass zwischen den beiden Parametern eine hohe negative Korrelation besteht (Interpretation der statistischen Ergebnisse vergl. BÜHL 2008).

Auch im Boden lässt sich in den Vogesen zwischen der H^+ - Ionenmenge und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration eine negative Beziehung nachweisen. Die Korrelationskoeffizienten liegen je nach Bodentiefe zwischen -0,19 und -0,41, was bedeutet, dass eine sehr geringe bis geringe negative Korrelation nachweisbar ist, die aber signifikant ist. In den Böden des Schwarzwaldes lassen sich Korrelationskoeffizienten zwischen 0,02 und -0,17 nachweisen, wobei die Korrelationen nicht signifikant sind. Somit ist der Zusammenhang zwischen beiden Elementen in den Vogesen eindeutiger nachweisbar als im Schwarzwald. Diese Tatsache lässt sich wiederum mit den Kalkungsmaßnahmen erklären, die das natürliche Verhältnis zwischen den pH-Werten und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration erheblich beeinflussen.

Insgesamt besteht zwischen der H^+ - Ionenkonzentration und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration eine negative Korrelation. In den Vogesen ist diese aus den oben genannten Gründen größer als im Schwarzwald.

Korrelation zwischen der Ca^{2+} - und Mg^{2+} - Ionenkonzentration

Das Verhältnis zwischen der Ca^{2+} -Ionen- und der Mg^{2+} -Ionenkonzentration in den Vogesenquellen lässt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,94 beschreiben (vergl. Tab. A. 45 im Anhang). Dies bedeutet, dass zwischen beiden Elementkonzentrationen ein sehr hoher positiver Zusammenhang besteht (Interpretation der statistischen Ergebnisse vergl. BÜHL 2008). Folglich ist in einer Quelle mit einer hohen Ca^{2+} -Ionenkonzentration auch eine hohe Mg^{2+} -Ionenkonzentration zu erwarten und umgekehrt. In den Schwarzwaldquellen lässt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,87 errechnen. Somit besteht zwischen den beiden chemischen Elementen ein hoher positiver Zusammenhang.

Auch im Boden wurde der Zusammenhang zwischen der Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration untersucht. In den Vogesenböden liegt der Korrelationskoeffizient je nach Bodentiefe zwischen 0,69 und 0,82, was einen mittleren, signifikanten Zusammenhang zwischen den beiden Elementen bedeutet. In den Böden des Schwarzwaldes befinden sich die Korrelationskoeffizienten zwischen 0,34 und 0,52, wobei die Zusammenhänge nur in 20-40 cm Bodentiefe nicht signifikant sind. Folglich sind die Zusammenhänge zwischen beiden chemischen Parametern in beiden Untersuchungsgebieten positiv.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse lassen sich in Bezug auf den Zusammenhang zwischen den verschiedenen chemischen Parametern folgende Aussagen treffen:

- Je tiefer der pH-Wert ist, desto geringer ist die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionenkonzentration in beiden Untersuchungsmedien. Dies bestätigen die nachgewiesenen negativen Korrelationen.
- Lässt sich in der Quelle oder im Boden eine hohe Ca^{2+} -Ionenkonzentration nachweisen, ist auch mit einer hohen Mg^{2+} -Ionenkonzentration zu rechnen. Dies wird durch die hohen positiven Korrelationen belegt.

4.12 Zusammenhänge zwischen Boden- und Quellwerten

Bei dieser Fragestellung sollte untersucht werden, ob sich die Boden- und Quellwerte in Bezug auf bestimmte Einflussfaktoren ähnlich verhalten bzw. verändern.

Zusammenhang zwischen Quell- und Bodenwerten in Bezug auf das Relief

Da das Relief einen signifikanten Einfluss auf die Boden- und Quellwerte hat, wurde untersucht, ob sich die chemischen Eigenschaften der beiden Umweltmedien in Bezug auf die unterschiedliche topographische Lage ähnlich verhalten. In den Vogesen hat sich gezeigt, dass sich die Boden- und Quellwerte je nach Vogesenlage in gleicher Weise verändern.

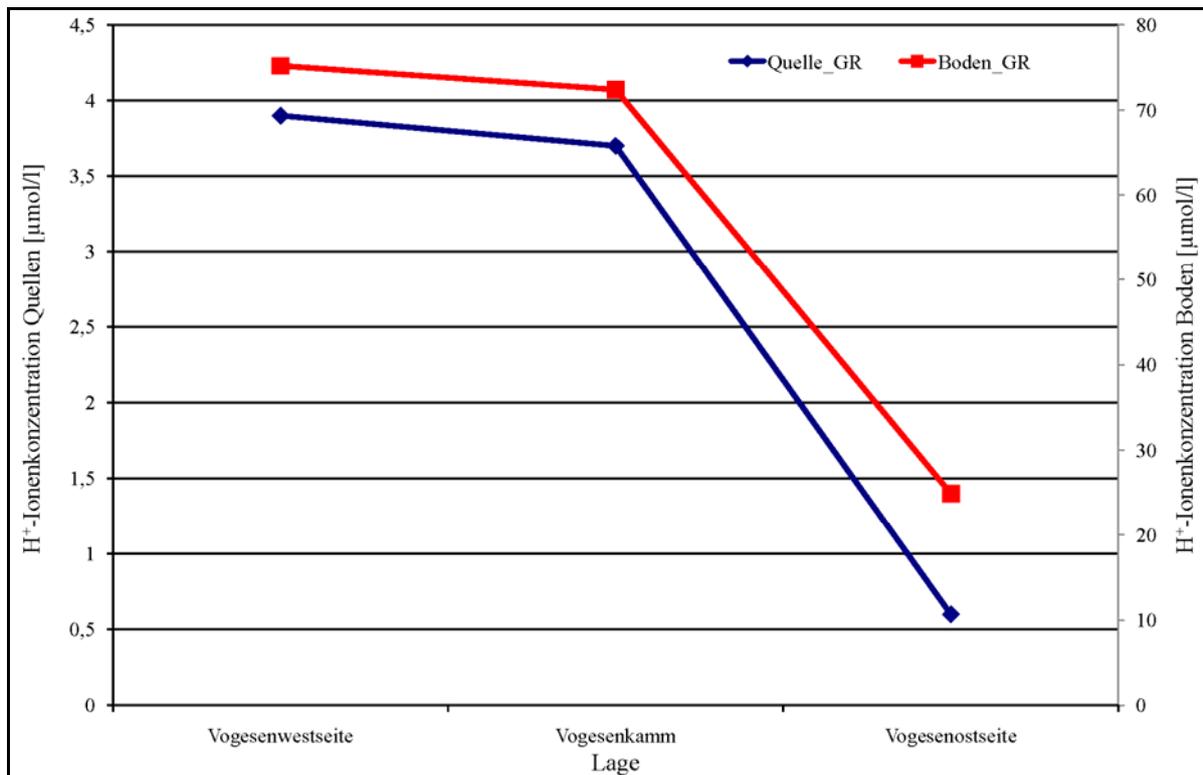


Abb. 67: H⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.

So lassen sich in den Quellen und im Boden im Granit an der Westseite und am Kamm die höchsten H⁺-Ionenkonzentration nachweisen und an der Ostseite die niedrigsten. Auch im Buntsandstein werden die gleichen Unterschiede in Bezug auf die Lage in Boden und Quellen deutlich (vergl. Abb. 67 und Abb. 68).

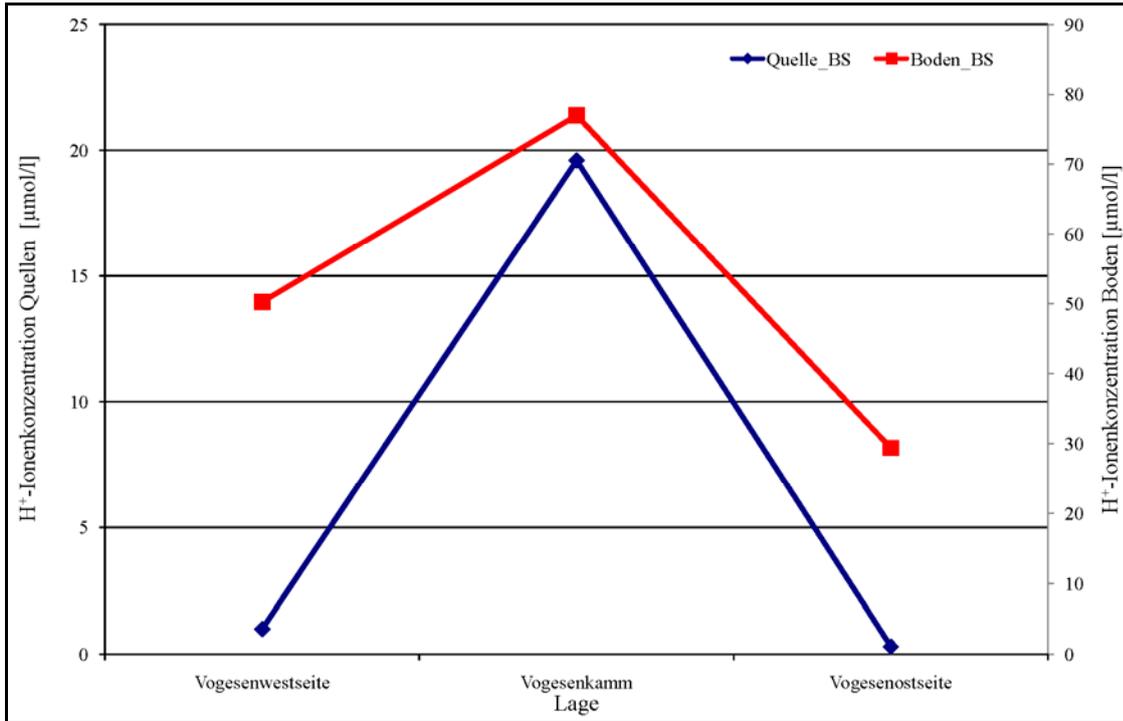


Abb. 68: H⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.

Bei den anderen chemischen Parametern ist die Situation ähnlich (vergl. Abb. 69 und Abb. 70).

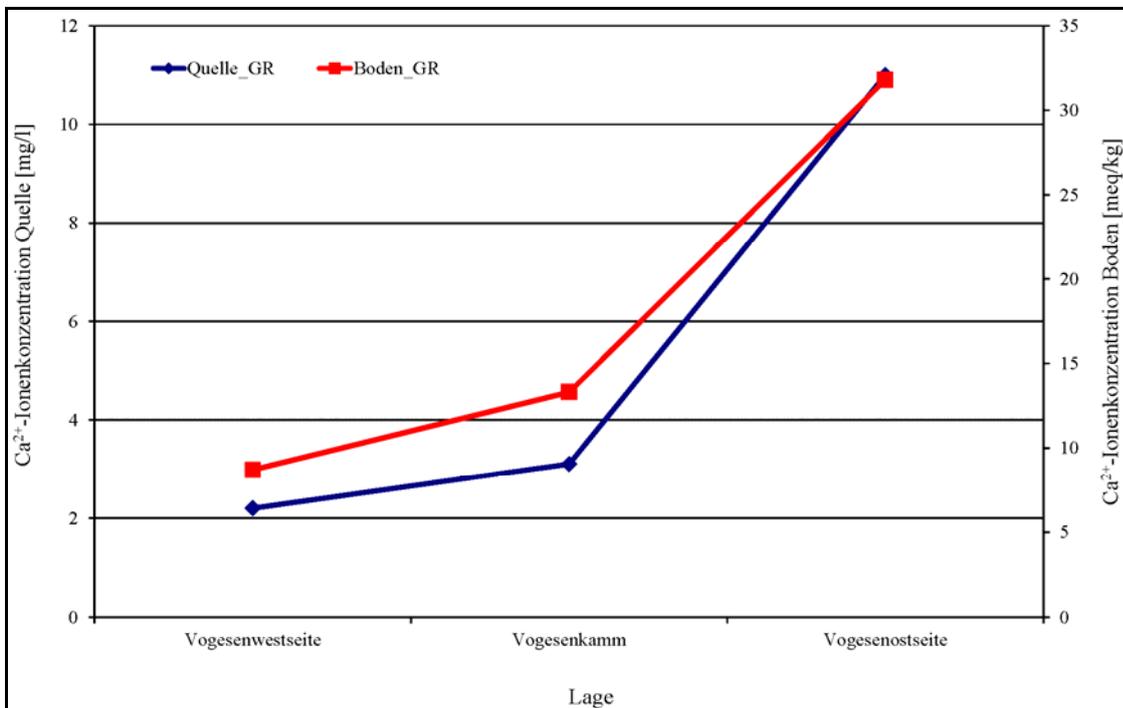


Abb. 69: Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.

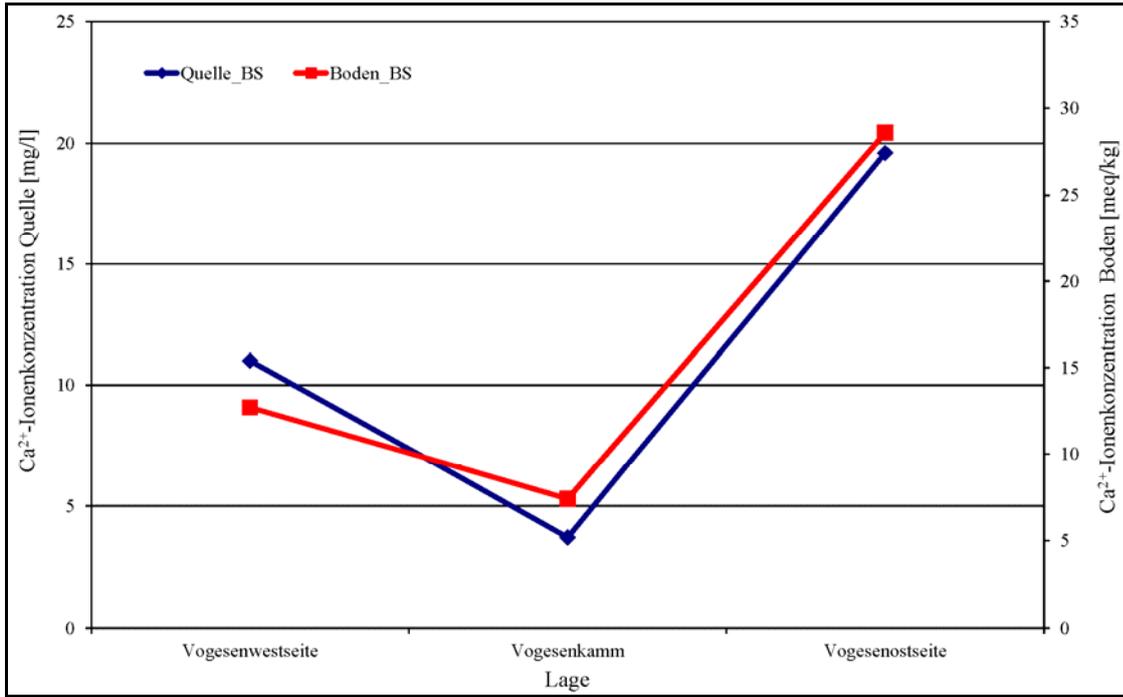


Abb. 70: Ca²⁺-Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.

Nur das Element Aluminium bildet eine Ausnahme (vergl. Abb. 71 und Abb. 72). Der Zusammenhang zwischen den Al³⁺-Ionenkonzentrationen in den Quellen und im Boden soll näher betrachtet werden.

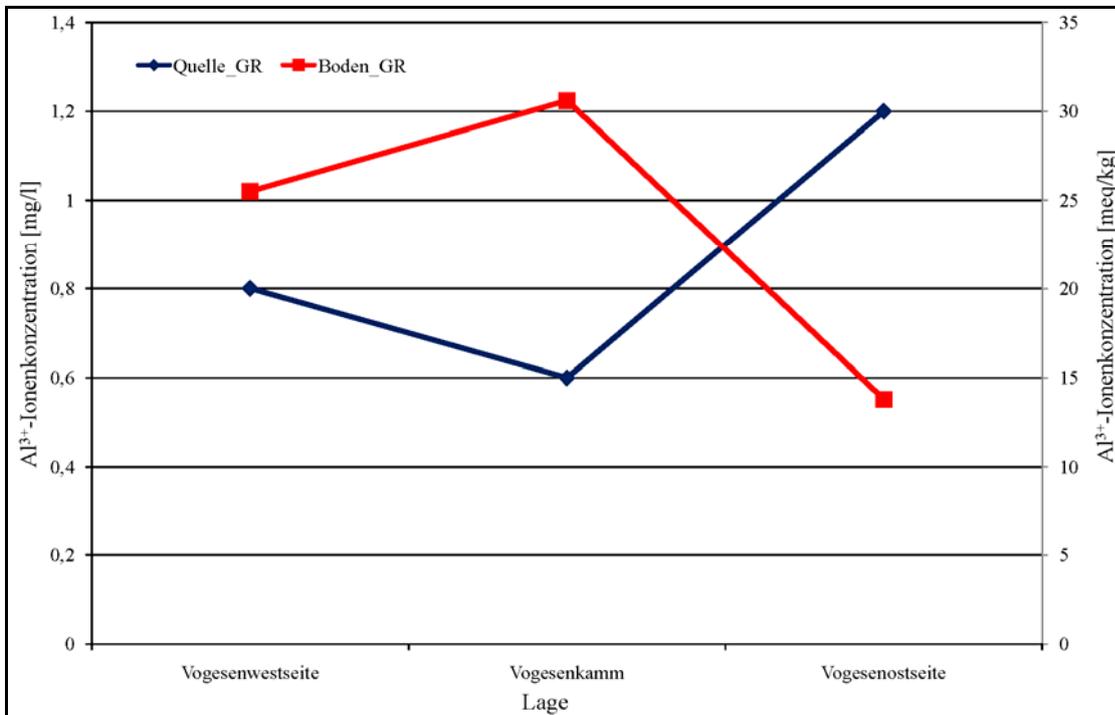


Abb. 71: Al³⁺- Ionenkonzentration in den Granitquellen und den Granitböden in den Vogesen.

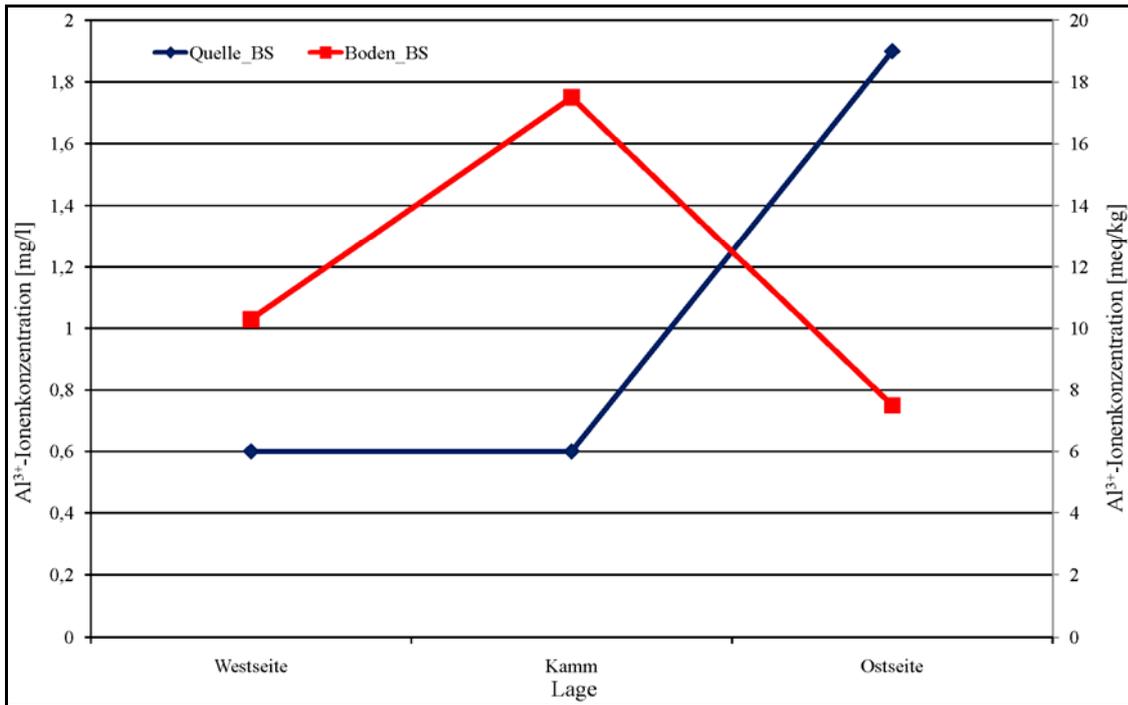


Abb. 72: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Buntsandsteinquellen und den Buntsandsteinböden in den Vogesen.

In Bezug auf die unterschiedliche Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Quellen und den Böden, sollen auch die Verhältnisse in den Quellen und Böden im Schwarzwald betrachtet werden (vergl. Abb. 73).

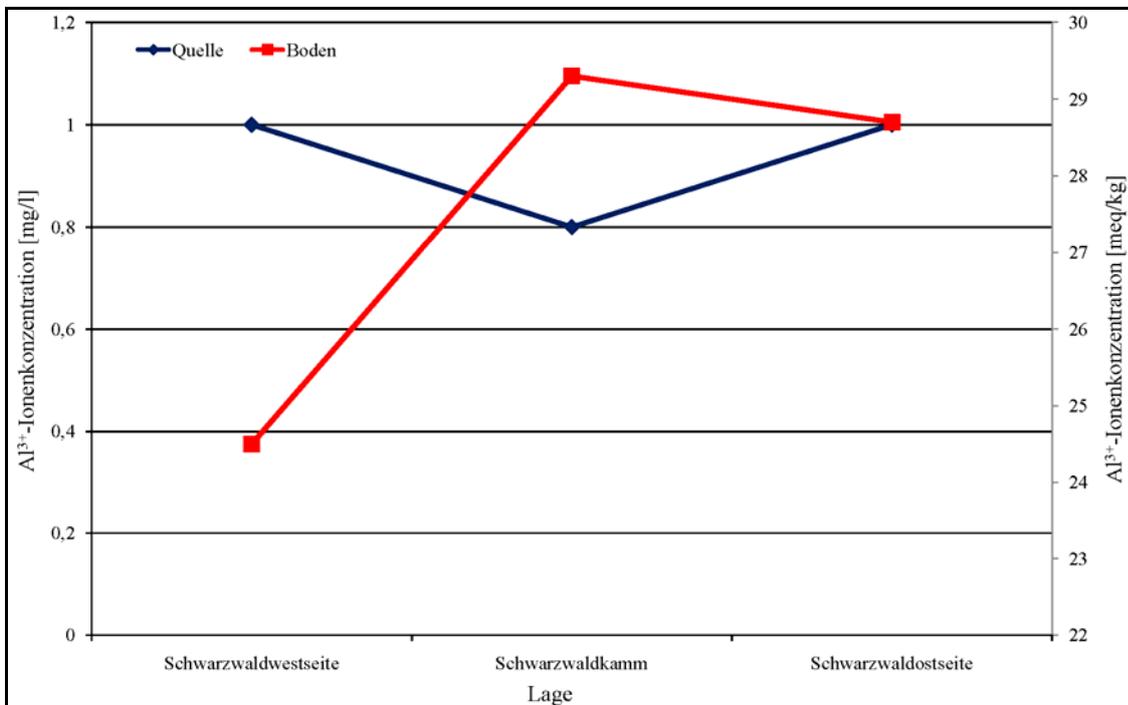


Abb. 73: Al^{3+} -Ionenkonzentration in den Quellen und den Böden im Schwarzwald.

Innerhalb beider Untersuchungsgebiete sind im Boden am Kamm deutlich die höchsten Al^{3+} -Ionenkonzentrationen nachweisbar, während in den Kammquellen die Al^{3+} -Ionenkonzentrationen nicht wesentlich höher sind, obwohl dort aufgrund der tiefen pH-Werte ebenfalls deutlich höhere Konzentrationen zu erwarten wären (vergl. Kapitel 4.10). Dies könnte mit dem Verdünnungseffekt erklärt werden, d.h. die am Kamm mit Abstand größten Niederschlagsmengen bewirken in den Quellen eine Verdünnung, sodass die Al^{3+} -Ionenkonzentration geringer ist. Bei den anderen Elementen, wie z.B. Calcium, kommt der Verdünnungseffekt in den Quellgewässern nicht zum Tragen, da wegen der tiefen pH-Werte am Kamm auch im Boden geringere Ca^{2+} -Ionenkonzentrationen nachweisbar sind. Das Phänomen der Verdünnung wird auch im Schwarzwald deutlich, wo ähnliche Voraussetzungen der Niederschlagsmengen gelten wie in den Vogesen.

Aufgrund der erhobenen Daten kann man die Aussage treffen, dass zwischen den Boden- und Quellwerten deutliche Parallelen nachweisbar sind. Hat man z.B. die chemischen Parameter einer Quelle analytisch bestimmt, so lassen die Analyseergebnisse Aussagen bezüglich des chemischen Zustandes des Bodens im Quellgebiet zu.

Korrelation zwischen Quell- und Bodenwerten in unterschiedlichen Bodentiefen

Es sollte untersucht werden, ob sich die Korrelation zwischen den Boden- und Quellwerten in den verschiedenen Bodentiefen unterscheidet. Aufgrund der sehr aufwendigen Bodenanalytik wäre es hilfreich Bodentiefen zu ermitteln, in denen die Korrelation zwischen Boden- und Quellwerten am größten ist, sodass begründet von den ermittelten Quellwerten auf den chemischen Zustand des Bodens in einer bestimmten Bodentiefe geschlossen werden kann.

Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass das oben beschriebene Ziel nicht erreicht werden konnte. Es ist nicht gelungen eine Bodentiefe herauszustellen, in der der Zusammenhang zwischen der Elementkonzentration in der Quelle und im Boden am höchsten ist.

Ein Grund dafür könnte sein, dass geprüft werden muss, ob es sich bei den Quellen um verschiedene Quelltypen handelt, deren Eigenschaften in den verschiedenen Bodentiefen unterschiedlich sind, was zur Folge hat, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Quell- und Bodenwerten in den verschiedenen Bodentiefen nachgewiesen werden konnte (vergl. HÖLTING & COLDEWEY 2009:50). Werden bei der Untersuchung verschiedene Quellentypen vermischt, lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Boden- und Quellwerten innerhalb der verschiedenen Bodentiefen nachweisen. Ein weiteres Problem ist, dass innerhalb der verschiedenen Bodenhorizonte sehr komplexe Vorgänge ablaufen, die entweder zur Verarmung der Bodenschicht in Bezug auf ein bestimmtes Element oder zur Anreicherung führen können.

4.13 Bestimmung des Bodenzustand aufgrund des Quellchemismus

4.13.1 Molares Ca/Al-Verhältnis in den Quelle und im Boden

Aufbauend auf der bereits erforschten Bedeutung des molaren Ca/Al-Verhältnis für die Pflanzen, soll in dieser Arbeit geklärt werden, ob dieser Parameter geeignet ist, um einerseits die Regionalisierung der Quellen in Abhängigkeit des Reliefs zu untermauern und andererseits aufgrund des Quellgewässerchemismus auf den Bodenzustand zu schließen.

Zwischen dem molaren Ca/Al-Verhältnis in den Quellen und im Boden konnte eine positive Korrelation nachgewiesen werden. Da aufgrund der erhobenen Daten deutlich wurde, dass die Kalkungsmaßnahmen den chemischen Zustand der Böden und Quellen im Schwarzwald beeinflussen, bleiben die Betrachtungen auf die Vogesen beschränkt. Bei den Quotienten der Bodenstandorte wurde der Mittelwert zwischen den verschiedenen Bodentiefen gebildet.

In den Vogesen lässt sich zwischen den Quotienten der Quellen und der Böden mit einem Koeffizient von 0,5 eine signifikante positive Korrelation nachweisen (vergl. Tab. 49). Aus dieser Korrelation kann gefolgert werden, dass bei einer relativ höheren Calciumionenkonzentration in der Quelle auf eine entsprechend relativ höhere Konzentration im Boden geschlossen werden kann. Daher kann aufgrund des Quellgewässerzustandes auf den Bodenzustand geschlossen werden.

Die positive signifikante Korrelation zwischen Quell- und Bodenquotient macht deutlich, dass die Quelle als „Zeiger“ für den Zustand des Bodens im korrespondierenden Quelleinzugsgebiet bisher unterschätzt wurde. Aufgrund der weniger zeitaufwendigen Analysemethoden im Labor und Gelände ist es in einem angemessenen Zeitrahmen möglich eine große Anzahl von Quellen zu analysieren. Die Bodenentnahme und Bodenanalyse in den jeweiligen Quelleinzugsgebieten wäre analysetechnisch im gleichen Zeitrahmen nicht möglich. Außerdem ergibt sich bei der Beprobung des Bodens das Problem aus der punkttartigen Probenentnahme auf den Bodenzustand einer Fläche zu schließen. Diesem wird durch die Bildung von Mischproben entgegengewirkt (vergl. u.a. SCHLICHTING ET AL. 1995, DIN 10381-1, 10381-2, 10381-4 UND DIN EN ISO 22475-1). Innerhalb der Untersuchung wurden zu jedem Entnahmestandort der fünf Bodenhorizonte Proben in 0-3 cm und 3-10 cm Bodentiefe entnommen und getrennt analysiert. Dadurch konnten Aussagen über die Homogenität eines Standortes getroffen werden. Dass die Auswahl der Entnahmestandorte innerhalb eines Untersuchungsgebietes nicht unproblematisch ist, deuten die Vorgehensbeschreibungen zur Geländearbeit an (vgl. u.a. SCHLICHTING ET AL. 1995:92). Die Analyse der Spatenproben hat gezeigt, dass die Standardabweichungen innerhalb der verschiedenen Entnahmestandorte eines Untersuchungsgebietes unterschiedlich sind und sich folglich die Homogenität der verschiedenen Standorte stark unterscheidet. Zwischen den Ca^{2+} -Ionenkonzentrationen der Entnahmestandorte wurden Standardabweichungen zwischen 1,0 und 89,6 nachgewiesen. (vergl. Tab. A. 55 im Anhang). Außerdem konnte festgestellt

werden, dass die Korrelation zwischen dem Ca/Al-Quotient der Quelle und des Bodens bei den Standorten mit geringerer Standardabweichung, also größerer Homogenität, höher ist (vergl. Tab. 49). Diese Ergebnisse untermauern die Tatsache, dass mit steigender Heterogenität der Bodenstandorte die Gefahr von Fehlinterpretationen steigt. Aufgrund der statistisch nachgewiesenen Korrelation zwischen Quell- und Bodenquotient werden das Problem der Heterogenität der Böden und die Gefahr der Fehlinterpretation von Bodendaten durch die Nutzung des an einer Quelle gebündelt abfließenden Interflows minimiert. Anschließend können in Abhängigkeit von der Größe des Quelleinzugsgebietes weitere Bodenuntersuchungen und gegebenenfalls gegenwirkende Bodenschutzmaßnahmen durchgeführt werden.

Tab. 49: Korrelation zwischen dem Ca/Al-Quotient der Quelle und des Bodens bei Standorten mit unterschiedlicher Standardabweichung der Ca²⁺-Ionenkonzentration.

	Standardabweichung Ca ²⁺ -Ionen größer 20	Standardabweichung Ca ²⁺ -Ionen kleiner 10
Korrelation zwischen Ca/Al-Quotient Quelle und Boden	0,2	0,5

Neben dem Nachweis der Korrelation zwischen dem Quellquotienten und dem Bodenquotienten wurde auch die Größe des molare Ca/Al-Verhältnis genauer betrachtet, um einzuschätzen, ob die Böden und Quellgewässer bezüglich der Säuretoxizität gefährdet sind. Bei der Einschätzung des Gefährdungsgrades aufgrund des molaren Ca/Al-Verhältnisses wurden die in Tab. 50 dargestellten Richtwerte herangezogen.

Tab. 50: Klassifizierung des molaren Ca/Al-Verhältnisses in der Bodenlösung als Kriterium für die Elastizität bezüglich der toxischen Wirkung von Aluminium, angelehnt an: MEIWES ET AL. 1984:47.

mol Ca / mol Al	Gefährdung
> 1	keine Gefährdung durch Al-Toxizität
1,0 – 0,3	geringe Gefährdung durch Al-Toxizität
0,1 – 0,3	starke Gefährdung durch Al-Toxizität
< 0,1	sehr starke Gefährdung durch Al-Toxizität

Bei der Klassifizierung des molaren Ca/Al-Verhältnisses in der Bodenlösung als Kriterium für die Elastizität bezüglich der toxischen Wirkung von Aluminium werden für Fichten und Buchen in der Literatur verschiedene Angaben gemacht (vgl. z.B. MEIWES ET AL. 1984:47). Wie in Tab. A. 56 im Anhang deutlich wird, bewegt sich die Größe des molaren Ca/Al-Verhältnisses in den Quellen zwischen 0,3 und 22,4. Vor allem die Quellen am Kamm und an der Westseite sind gefährdet, während die Quellen an der Ostseite keiner Gefährdung unterliegen (vergl. Tab. 51). Somit wird auch beim molaren Ca/Al-Verhältnis die Regionalisierung der Vogesenquellen deutlich. In der Bodenlösung zeigt sich eine ähnliche

Situation. Die Quotienten bewegen sich zwischen 0,1 und 237,0 und die Regionalisierung wird deutlich. Die Standorte an der Vogesenwestseite und am Vogesenkamm sind eher gering bis stark gefährdet, während an der Ostseite keine bis eine geringe Gefährdung vorliegt (vergl. Tab. 51).

Tab. 51: Mittelwerte der Ca-Al-Quotienten der Quellen und Böden in Abhängigkeit vom Relief.

Vogesenlage	Mittelwert Quotient Ca/Al	
	Quellen	Böden
Westseite	5,0	1,6
Kamm	3,2	0,9
Ostseite	6,6	5,0

4.13.2 Molares Ca/Al-Verhältnis in der Quelle und Pufferbereich des Bodens

Eine weitere geeignete Möglichkeit die Quelle als „Zeiger“ für den Bodenzustand zu nutzen, ist die Zuordnung des Bodens in einen Pufferbereich aufgrund des Quellquotienten. Die Böden wurden aufgrund ihres pH-Wertes den entsprechenden Pufferbereichen zugeordnet (vergl. ULRICH 1981¹).

Mit Hilfe eines Häufigkeitsdiagrammes konnte gezeigt werden, dass man aufgrund der Größe des Quellquotienten auf den zu erwartenden Pufferbereich des Bodens im Quellgebiet schließen kann (vergl. Abb. 74).

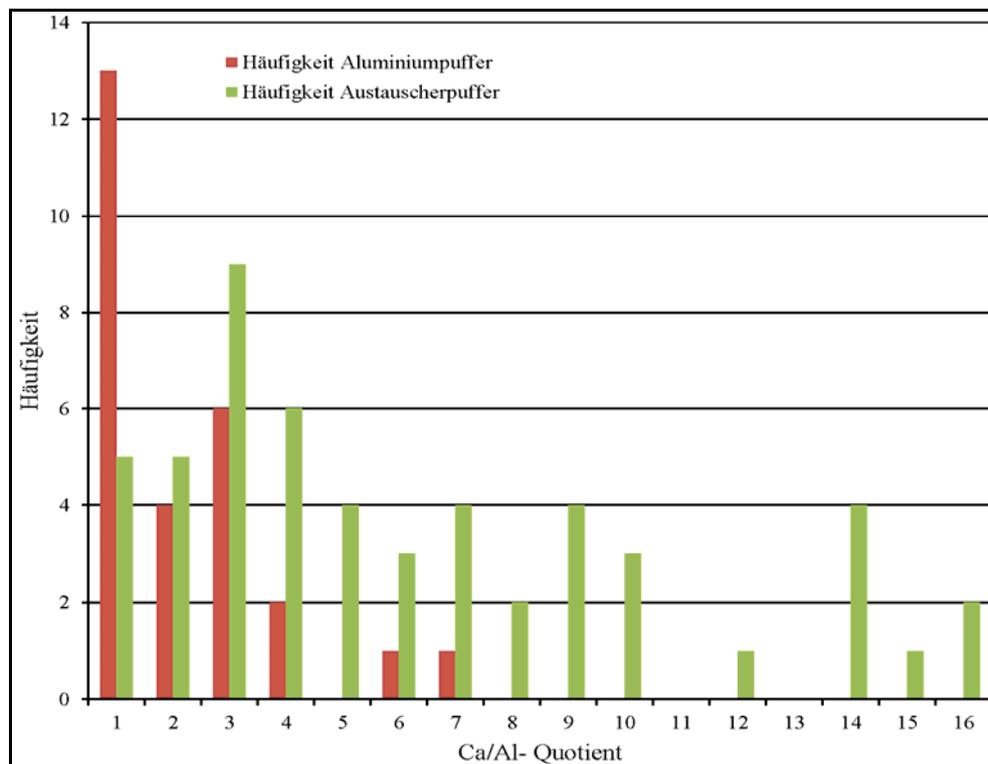


Abb. 74: Häufigkeitsdiagramm Pufferbereiche Böden und Ca/Al-Quotient der Quelle.

Ist das molare Ca/Al-Verhältnis in der Quelle kleiner als 2, befindet sich der Boden im entsprechenden Quellgebiet mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits im Aluminiumpufferbereich. Innerhalb der Vogesen ist der Quellquotient bei 27 Standorten kleiner als 2. Davon befinden sich die Böden von nur 10 Standorten noch im Austauscherpuffer, aber bereits die von 17 Standorten im Aluminiumpufferbereich. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei Quellen mit einem ermittelten Quellquotient kleiner 2 zumindest Teile der Böden im Einzugsgebiet der Quellen mit großer Wahrscheinlichkeit bereits so stark versauert sind, dass sie sich im Aluminiumpufferbereich befinden und in dem entsprechenden Quellgebiet genauere Analysen durchgeführt und Gegenmaßnahmen getroffen werden müssen.

4.13.3 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -Quotient der Quelle und Basensättigung des Bodens

Da neben der Zuordnung der Böden zu einem Pufferbereich die Basensättigung als wichtiger Parameter zur Bestimmung des Bodenzustandes gilt, wurde diese in Bezug zu dem $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -Quotient der Quelle gesetzt. Die Berücksichtigung aller ermittelten Kationen erscheint sinnvoll, da auch die Basensättigung der Böden aus der Summe des Anteils dieser Kationen an der KAK_{eff} berechnet wird.

Mit Hilfe eines Häufigkeitsdiagrammes konnte nachgewiesen werden, dass man aufgrund der Größe des Quellquotienten auf die zu erwartende Basensättigung des Bodens im Quellgebiet schließen kann (vergl. Abb. 75).

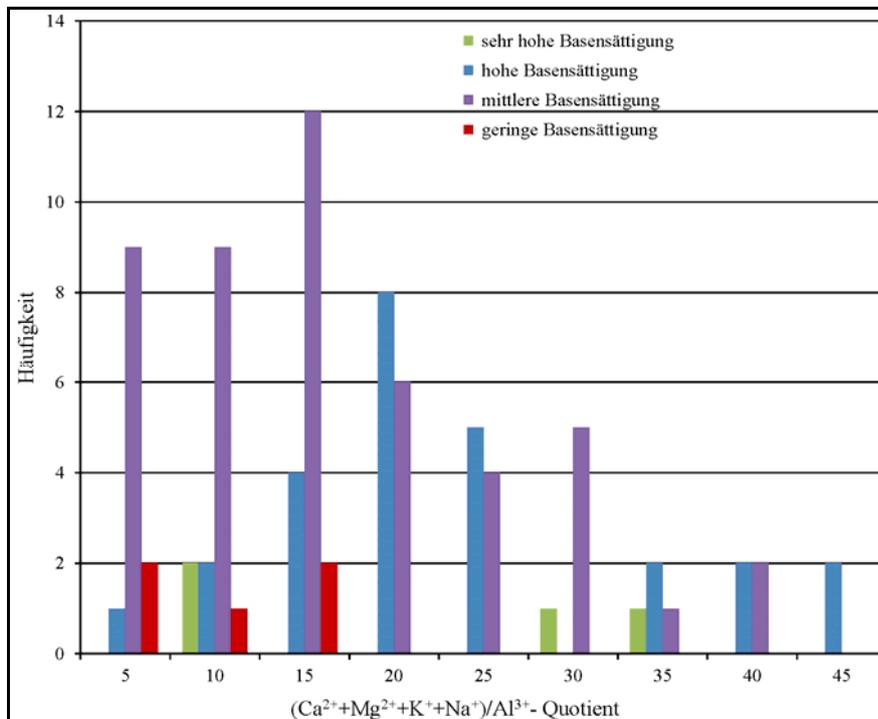


Abb. 75: Häufigkeitsdiagramm Basensättigung Böden und $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -Quotient der Quelle.

Zur Beurteilung der Basensättigung wurde die in Tab. 52 dargestellte Beurteilung angewendet.

Tab. 52: Beurteilung der Basensättigung; in Anlehnung an: WOLFF & RIECK 1996.

Beurteilung	Basensättigung
Geringe Basensättigung	< 15%
Mittlere Basensättigung	15-50 %
Hohe Basensättigung	50-85%
Sehr hohe Basensättigung	>85%

In Abb. 75 wird deutlich, dass sich bei insgesamt 44 Standorten ein Quellquotient von 15 und kleiner ergab. Davon ist die Basensättigung der Böden bei 7 Standorten als hoch, bei 30 Standorten als Mittel und bei 5 Standorten als gering einzustufen. Ist der Quellquotient größer als 15 lassen sich ausschließlich mittlere bis sehr hohe Basensättigungen nachweisen. Dies lässt die Folgerung zu, dass bei einem Quellquotient größer als 15 mit einer hohen Basensättigung in den Böden zu rechnen ist. Ist der errechnete Quellquotient kleiner als 15, ist die Wahrscheinlichkeit einer geringen Basensättigung gegeben.

4.13.4 Zusammenfassende Betrachtung

Um mit ausreichender Aussagewahrscheinlichkeit aufgrund des chemischen Zustandes der Quellgewässer auf den Bodenzustand zu schließen, konnten in dieser Arbeit drei Möglichkeiten aufgezeigt werden.

Das molare Ca/Al-Verhältnis in den Quellwässern weist eine signifikante Korrelation zum molaren Ca/Al-Verhältnis in den Böden im korrespondierenden Quelleinzugsbiet auf, was die Quellen begründet zu wichtigen Indikatoren zur Bestimmung des Bodenzustandes im Quelleinzugsgebiet ausweist.

Zudem konnte gezeigt werden, dass das molare Ca/Al-Verhältnis bzw. der $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -Quotient in den Quellwässern Voraussagen zulässt, in welchem Pufferbereich sich zumindest ein Teil der Böden im Quellgebiet befindet und wie die Basensättigung der Böden einzuschätzen ist.

Außerdem wurde aufgrund der Untersuchungsergebnisse deutlich, dass bei diesen Verfahren das Problem der Heterogenität der Böden durch Nutzung des an einer Quelle gebündelt abfließenden Interflows minimiert wird.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung des Quell- und Bodenchemismus in den Vogesen und im Schwarzwald hat neue Erkenntnisse bezüglich der Regionalisierung des Versauerungszustandes der beiden Umweltmedien und der Wechselbeziehung Boden – Quellgewässer hervorgebracht.

Innerhalb der Vogesen wurde eine statistisch abgesicherte Regionalisierung der Quellgewässer und Böden in Bezug auf den Versauerungsgrad der beiden Umweltmedien erstellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit von unterschiedlichen mesoskaligen Reliefpositionen nicht nur der Versauerungsgrad von Quellen und Böden, dokumentiert durch die Kationenkonzentrationen und das molare Ca/Al- Verhältnis, sondern auch die Zusammensetzung der Tonmineralgarnitur im Boden deutlich variieren. Vogesenwestseite und der Vogesenkamm sind signifikant stärker versauert als die Vogesenostseite. An der weniger stark versauerten Vogesenostseite sind vor allem die Ca^{2+} - und die Mg^{2+} -Ionenkonzentration in Quellen und Böden vergleichsweise höher, im Oberboden überwiegen an den meisten Standorten die Dreischichttonminerale und es ist eine relative Anreicherung von Ca^{2+} -Ionen in Bezug zur Al^{3+} -Ionenkonzentration festzustellen. Vor allem in den Kamm- und Westlagen sind die Tonminerale der Oberböden aufgrund der fortschreitenden Versauerung einem intensiven Zerstörungsprozess ausgesetzt. Hier dominieren Zweischichttonminerale.

Neben dem signifikanten Einfluss des Reliefs konnte auch ein signifikanter Einfluss des geologischen Untergrundes nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass die Granitquellen und Granitböden in den Vogesen tendenziell stärker versauert sind, als die Buntsandsteinquellen und Buntsandsteinböden.

Aus bisherigen Forschungsarbeiten ist die Bedeutung des molaren Ca/Al-Verhältnisses im Bodenwasser und der Bodenfestphase für die Beurteilung des forstökologischen Bodenzustandes bekannt. Untersuchungen von Meiwes et al. (1984) haben gezeigt, dass bei einem kleineren Quotienten, in der Regel bedingt durch eine verstärkte Mobilisierung von Al^{3+} -Ionen bei gleichzeitiger Abnahme der Ca-Ionen, die Gefahr der Pflanzenschädigung, vor allem der Feinwurzeln, steigt (vergl. MEIWES ET AL. 1984). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde in der vorliegenden Arbeit die diesbezügliche Zusammensetzung der Quellwässer als natürliche Senke des Interflows zur Erfassung und Analyse des Bodenzustandes in den Quelleinzugsgebieten analysiert. Bisher wurden Quellwässer als „Zeiger“ des Waldbodenzustandes wenig genutzt, da ein belastbarer Parameter zur Bewertung des Bodenzustandes nicht bekannt war. Der in dieser Arbeit erarbeitete Nachweis der Interaktion beider Umweltmedien und des quantitativen Zusammenhangs zwischen chemisch relevanten Parametern in Boden und Quellwasser schließt diese Lücke. Mit Hilfe der in dieser Studie erarbeiteten Möglichkeiten aufgrund des Quellgewässerzustandes auf den Bodenzustand zu schließen, können gefährdete Räume mit ausreichender Aussagewahrscheinlichkeit zügig identifiziert werden. Basierend auf der nachgewiesenen

signifikanten Korrelation zwischen dem molaren Ca/Al-Verhältnis in der Quelle und im Boden, kann aus dem ermittelten Verhältnis der beiden Elementkonzentrationen in der Quelle begründet auf das Verhältnis im Boden geschlossen werden. Desweiteren erlaubt das molare Ca/Al-Verhältnis des Quellwassers eine Prognose des aktuellen Pufferbereichs der Böden im korrespondierenden Einzugsgebiet. Bei einem Ca/Al-Quotient des Quellwassers kleiner als 1 kann mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass zumindest ein Teil der Böden im Quellgebiet bereits dem Aluminiumpufferbereich zugeordnet werden kann und aufgrund der ablaufenden chemischen Prozesse die Pflanzen einer erheblichen Gefährdung ausgesetzt sind. Darüber hinaus ermöglichen Kenntnisse über die quantitativen chemischen Verhältnisse des Quellwassers Rückschlüsse auf die Basensättigung der Böden im korrespondierenden Quelleinzugsgebiet. Parallel zur Berechnung der Basensättigung eines Bodenstandortes, bei der alle austauschbaren Basen einbezogen werden, wurde der $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+K^{+}+Na^{+})/Al^{3+}$ -Quotient der Quellgewässer als Parameter ausgewählt. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei einem Quellquotient von kleiner als 15 mit einer schlechten Basensättigung (<50%) und bei einem Quellquotient größer als 15 mit einer guten Basensättigung zumindest in einem Teil der Böden zu rechnen ist.

Mit Hilfe der aufgezeigten Auswertungsmöglichkeiten ist es möglich aufgrund des Zustandes der Quellgewässer in einem Screeningverfahren versauerungsgefährdete Gebiete zu identifizieren, in denen anschließend in Abhängigkeit von der Größe des Quelleinzugsgebietes weitere Bodenuntersuchungen und gegebenenfalls gegenwirkende Bodenschutzmaßnahmen durchgeführt werden können. Bei diesem Verfahren wird das Problem der Heterogenität der Böden durch Nutzung des an einer Quelle gebündelt abfließenden Interflows minimiert.

Die Analyse der Tonmineralgarnitur ausgewählter Standorte in den Vogesen hat gezeigt, dass die Abnahme der Dreischichttonminerale im Oberboden durch den Prozess des Tonmineralabbaus in Folge der Bodenversauerung ausgelöst wird, da der Anteil der Dreischichttonminerale in 80-100cm Bodentiefe gegenüber den korrespondierenden Oberböden deutlich erhöht ist. Im mesoskaligen Bereich konnte hierbei der Einfluss des Reliefs auf die Regionalisierung des Versauerungsmuster der Böden nachgewiesen werden. In den stärker versauerten Gebieten der Vogesenwestseite und des Vogesenkammes dominieren in den Oberböden Zweischichttonminerale. Aufbauend auf den in der Arbeit erhobenen Ergebnissen in Bezug auf die Fortschreitung der Versauerungsfront in die Tiefe könnten zukünftige Forschungen der Frage nachgehen, ob es möglich ist anhand der Tonmineralgarnitur die Versauerungsfront zuverlässiger zu lokalisieren.

Die Böden und Quellwässer in den Vogesen zeigen eine stärkere Versauerung als die Böden und Quellwässer im Schwarzwald. Diese Tatsache lässt sich mit den im Schwarzwald durchgeführten Kalkungsmaßnahmen erklären, die vor allem im Oberboden Auswirkungen zeigen. Aufgrund des Versauerungszustandes der Quellen und der Böden sind auch in den

Vogesen Gegenmaßnahmen unverzichtbar. Bei den untersuchten 59 Standorten ist bei 37 Standorten aufgrund mindestens eines Kriteriums eine Kalkung erforderlich, 18 Standorte sollten aufgrund mindestens eines Kriteriums sogar dringend einer Kalkung unterzogen werden und nur bei 4 Standorten ist eine Kalkung nicht erforderlich. Mit Hilfe des aufgezeigten Screening-Verfahrens können Zielgebiete für notwendige Maßnahmen, z.B. Meliorationskalkungen, ausgewiesen werden.

6. Literaturverzeichnis

- ALDINGER, D. (1987): Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten- Tannen- Bestände auf Praxiskalkungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald. In: Freiburger Bodenkundlicher Abhandlungen, Band 19.
- BAHRENBERG, G.; GIESE, E. & NIPPER, J. (1991): Statistische Methoden in der Geographie 1, Bremen.
- BAHRENBERG, G.; GIESE, E. & NIPPER, J. (1991): Statistische Methoden in der Geographie 2, Bremen.
- BALÁS, A. (1989): Räumliche und zeitliche Variation der Niederschlagsinhaltsstoffe im Freiland und unter Fichtenbeständen in Hessen. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden-Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- BALÁS, A & BRECHTEL, H.M. (1989): Mangan-, Aluminium- und Nitratkonzentrationen im Sickerwasser unter Fichtenbeständen in Hessen. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- BARTELS, H.; FUCHS, H.; JURKSCH, G.; MELCHIOR, J. & SÜSSENGUTH, G. (1982): Klimatologische Beschreibung des Oberrheingebietes im Hinblick auf Abwärmeprobleme, Abwärmeprojekt Oberrheingebiet Teil I. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 160, Offenbach am Main.
- BAUCH, J. & SCHRÖDER, W. (1982): Zellulärer Nachweis einiger Elemente in Feinwurzeln gesunder und erkrankter Tannen (*Abies alba* Mill.) und Fichten (*Picea abies* (L.) Karst). In: Forstwissenschaftliches Zentralblatt, Band 101: 285-294.
- BAUDOIN, J.M. (2007): Biodiversité et fonctionnement de cours d'eau forestiers de tête de bassin: Effets de l'acidification antropique et d'une restauration, Metz.
- BAUR, S.; BRAHMER, G. & FEGER, K.H. (1989): Mobilität und Bindungsformen von Aluminium in zwei Einzugsgebieten im Schwarzwald. In: MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden-Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.
- BAUR, S.; BRAHMER, G. & FEGER, K.H. (1989): Mobilität und Bindungsformen von Aluminium in Wassereinzugsgebieten des Schwarzwald, In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die

Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.

- BEESE, F. & PRENZEL, J. (1985): Das Verhalten von Ionen in Buchenwald-Ökosystemen auf podsoliger Braunerde mit und ohne Kalkung. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 43.
- BEESE, F. & MEIWES, K.J. (1995): Stand und Perspektiven. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Band 17, 50. Jahrgang: 946-949.
- BEISECKER, R. & EVERS, J. (2012): Abschlussbericht: Diffuse Stoffausträge aus Wald und naturnahen Nutzungen, Auftraggeber: LAWA-Bund/Ländergemeinschaft Wasser, Kassel/Göttingen.
- BENECKE, P. (1991): Ausmaß der Versauerung von Waldböden und Auswirkungen auf Sickerwasser und Untergrund. In: Geologisches Jahrbuch Hessen, Bd.119.
- BLASER, P.; WALTHERT, L. & PANNATIER, E. (2008): The sensitivity of Swiss forest soils to acidification and the risk of aluminium toxicity. In: Journal of plant nutrition and soil science, Bd.171: 605-612.
- BLUME, H.-P.; STAHR, K. & LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere für Land-und Forstwirte und für Geowissenschaftler, 3. Auflage, Heidelberg.
- BLUME, H.-P. (2011)(Hrg.): Handbuch des Bodenschutzes; Bodenökologie und –belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen, 4. vollst. überarbeitete Auflage, Weinheim.
- BOGENRIEDER, A. & RASBACH, H. (1982): Der Feldberg im Schwarzwald, subalpine Insel im Mittelgebirge, Karlsruhe.
- BONNEAU, M.; BELKACEM, S.; NYS, C.; RANGER, J.; GELHAYE, D.; LEFEVRE, Y. & HUMBERT, D. (2000): Evolution d'un sol forestier acide des Vosges sur une période de 10 ans. Observatoire de la Qualité des Sols du Donon. In: Etude et Gestion des Sols. Bd. 7 (2): 99-118.
- BONNEAU, M. (2000): Evolution sur dix ans de la fertilité minérale d'un sol acide des Vosges. In: Revue Forestière Française, Bd. 52: 519-529.
- BORTZ, J. (1993): Statistik für Sozialwissenschaftler, Berlin.
- BOUDOT, J.P.; MAITAT, O. ET AL (2000): Soil solution and surface water analysis in two contrasted watersheds impact by acid deposition, Vosges mountains, N.E. France: interpretation in terms of Al impact and nutrient imbalance. In: Chemosphere, Bd. 41 (9): 1419-1429.
- BRAHMER, G. & FEGER, K. (1989): Hydrochemische Bilanzen kleiner bewaldeter Einzugsgebiete des Südschwarzwaldes. In: MINISTERIUM FÜR UMWELT &

- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden-Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.
- BRANDL, H. (1992): Entwicklungen und Tendenzen in der Forstgeschichte seit Ende des 18. Jahrhundert. In: Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Bd. 166.
- BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- BRÜGGEMEIER, F.J. & ROMMELSPACHER, TH. (1987): Besiegte Natur, Geschichte der Umwelt im 19. Und 20. Jahrhundert, München.
- BÜHL, A. (2008): SPSS 16: Einführung in die moderne Datenanalyse, 11. überarbeitete und erweiterte Auflage, München.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2008) (Hrg.): Waldstrategie 2020. Nachhaltige Waldbewirtschaftung - eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung.
- BÜRGER, K. (2004): Veränderung von Waldökosystemen aufgrund historischer Nutzung im Schwarzwald und in den Vogesen, Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaft der Albert- Ludwigs- Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg.
- BÜRGER, R. (1991): Immissionen und Kronenverlichtung als Ursachen für die Veränderungen der Waldbodenvegetation im Schwarzwald. In: Tuexenia, Bd. 11: 407-424.
- CARBIENER, R. (1963): Les Sols du Massif du Hohneck leurs Rapports avec le tapis Végétal. In: Association Philomatique D'Alsace et de Lorraine (Hrg.): Le Hohneck, Straßburg.
- CARBIENER, R. (1966): La végétation des Hautes Vosges dans ses rapports avec les climats locaux, les sols et la géomorphologie. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Orsay, Paris.
- CARBIENER, R. (1969): Subalpine primäre Hochgrasprärien im herzynischen Gebirgsraum Europas, mit besonderer Berücksichtigung der Vogesen und des Massif Central. In: Mitteilungen der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft, Bd. 14: 322-345.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DES VOGES (2011): Sur nos captages... cultivons l'eau des Vosges, Fiche n°23.
- CHRUSTALEW, S. (1982): Bioindikation von Luftverunreinigungen mittels Exposition von Flechten in luftdurchströmten Expositionskammern, Saarbrücken.

- DALHÄUSER, H. (1990): Bodeninventur in Bayern. Durchführung und erste Ergebnisse. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 24, München.
- DAMBRINE, E.; POLLIER, B.; ET AL. (1998): Evidence of current soil Acidification in spruce stands in the Vosges Mountains, North- Eastern France. In: Water, Air and Soil Pollution, Bd. 105: 43-52.
- DAMBRINE, E.; PARTY, J.P.; POLLIER, B.; NICOLAI, M.; PROBST, A.; ROZIN, C. & DUC, M. (1999): Acidification des eaux de source et saturnisme dans le massif vosgien. In: Revue Forestière Française, Bd. 51 (2): 173-183.
- DANGLES, O. & GUEROLD, J.F. (2000): Structural and functional responses of benthic macroinvertebrates to acid precipitation in two forested headwater streams (Vosges Mountains, northeastern France). In: Hydrobiologia, Bd. 418: 25-31.
- DAVEZAC, H.; GRANDGUILLOT, G.; ROBIN, A. & SAOUT, C. (Directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS) (2008): L'eau potable en France 2005-2006.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR FERNSTUDIENFORSCHUNG AN DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN (Hrg.) (1997): Veränderungen von Böden durch anthropogene Einflüsse. Ein interdisziplinäres Studienbuch, Berlin.
- DIETERLE, G. (1990): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald in Bezug auf neuartige Waldschäden. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 24, Bonn.
- DUPUIS, J. (1967): Notice explicative de la carte pédologique de la France au millionième, Institute national de la recherche agronomique, Paris.
- EBERL, C. (2001): Wirkung der praxisüblichen Kompensationskalkung auf Indikatoren des Humus-, Mineralboden- und Kronenzustandes in Niedersachsen und Schleswig-Holstein. In: Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 33: 167-181.
- EDER, W. (1979): Quantifizierung von Standortfaktoren als Grundlage für eine leistungsbezogene Standortkartierung insbesondere auf Buntsandsteinstandorten der Pfalz. Diss. Universität Göttingen.
- EDER, W. (1990): Maßnahmen zur Erhaltung und zum Schutz der Waldböden. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 24.
- EGGERS, H. (1964): Schwarzwald und Vogesen. Ein vergleichender Überblick, Braunschweig.
- EINSELER, G. (1989): Art, Ursachen und Weiterentwicklung der starken Gewässerversauerung im mittleren Buntsandstein des Schwarzwaldes im Vergleich zu anderen Gebieten. In: MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden-Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.

- ELLING, W.; HEBER, U.; POLLE, A. & BEESE, F. (2013): Schädigung von Waldökosystemen. Auswirkungen anthropogener Umweltveränderungen und Schutzmaßnahmen, Heidelberg.
- EVERS, F.H. (1989): Düngung im Wald - Möglichkeiten und Grenzen. In: KfK/PEF-Berichte, Bd. 50: 35-60.
- FEGER, K.H. (1989): Hydrologische und chemische Wechselwirkungsprozesse in tieferen Bodenhorizonten im Gestein in ihrer Bedeutung für den Chemismus von Waldgewässern, In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- FELTES, W. (2001): Hydrochemische Untersuchungen an ausgewählten Quellgewässern des Saarlandes, Saarbrücken.
- FISCHER, A. (2003): Forstliche Vegetationskunde. Eine Einführung in die Geobotanik. 3. Auflage, Stuttgart.
- FLAGEOLLET, J.C. (1988): Quartäre Vereisungen in den lothringischen Vogesen: Anzahl, Ausdehnung und Alter. In: Eiszeitalter und Gegenwart, Bd. 38: 17-36.
- FLAGEOLLET, J.C. (2002): Sur les traces des glaciers vosgiens.
- FLUCK, P. & LOUGNON, J. (1984): Les grands traits de la metallogenie des Vosges. In: Fortschritte der Mineralogie, Bd. 62, Beiheft 2.
- FLUCK, P. (1995): Die mittleren kristallinen Vogesen (Exkursion D am 20.04.1995). In: Jahrbuch der Mitteloberrheinischen geologischen Vereinigung, Bd. 77: 133-138.
- FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSINSTITUT FÜR DIE INDUSTRIE- UND SIEDLUNGSWIRTSCHAFT SOWIE ABFALLWIRTSCHAFT (Hrg.)(1990): Schutz und Aufbereitung von Grundwasser. Trinkwasserkolloquium am 22.09.1990, Stuttgart.
- FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (FVA)(Hrg.)(2000): Bodenschutzkalkung im Wald. In: Merkblätter der Forstlichen Versuchs-und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Bd.50.
- FUNK, W.; DAMMANN, V.; VONDERHEID, C. & OEHLMANN, G. (1985): Statistische Methoden in der Wasseranalytik, Begriffe, Strategien, Anwendungen, Weinheim.
- GALL, J.C; GRAUVOGEL-STAMM, L. & PAPIER, F. (1995): Der Buntsandstein der Nordvogesen. (Exkursion F am 20.April 1995). In: Jahrbuch der Mitteloberrheinischen geologischen Vereinigung, Bd. 77: 155-165.
- GADANT, J. (Hrg.) (1991): L'atlas des forêts de France, Paris.

- GEHRMANN, J.; BÜTTNER, G. & ULRICH, B. (1987): Untersuchungen zum Stand der Bodenversauerung wichtiger Waldstandorte im Land Nordrhein-Westfalen. In: Ber. Forschungszentr. Waldökosyst. Univ. Göttingen, Bd. 4.
- GEYER, F.O. & GWINNER, M. (1964): Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg, Stuttgart.
- GLASER, R., SCHÖNBEIN, J. (2007): Klima und Wetterkontraste. In: GLASER, R.; GEBHARDT, H. & SCHENK, W. (Hrg.) (2007): Geographie Deutschlands, Darmstadt.
- GLAWION, R.; GLASER, R.; SAURER, H.; GAEDE, M. & WEILER, M. (2009): Physische Geographie, das Geographische Seminar, ein Lehr- und Übungsbuch, Braunschweig.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP (2000): Integrated Water Resources Management, Technical Advisory Committee (TAC) Background Paper No. 4.
- GÖBEL, P. (Hrg.) (2010): Quellen im Münsterland. Beiträge zur Hydrogeologie, Wasserwirtschaft, Ökologie und Didaktik. In: Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde, 72. Jahrgang, Heft 3/4.
- GOUDIE, A. (2002): Physische Geographie. Eine Einführung, 4. Auflage, Heidelberg.
- GRUBA, P. & MULDER, J. (2008): Relationship between Aluminium in soils and soil water in mineral horizons of a range of acid forest soils. In: Soil science society of America journal, Bd. 72: 1150-1157.
- GRÜNEWALD, U. & SCHRÖDER, D. (1990): Zum Einfluss atmosphärischer Depositionen auf Gewässereinzugsgebiete. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Bd. 2: 29-31.
- GRYSCHKO, R. & HORLACHER, D. (1997): Bodenversauerung. Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Literaturstudie, Karlsruhe.
- GUEROLD, F. (1992): L'acidification des cours d'eau: Impact sur les peuplements de macroinvertébrés benthiques : Application au Massiv Vogesien, Metz.
- GUEROLD, F.; BOUDOT, J.P., ET AL. (2000): Macroinvertebrate community loss as a result of headwater stream acidification in the Vosges Mountains (N-E France). In: Biodiversity and Conservation, Bd. 9: 767-783.
- GÜNTHER, D. (2010): Der Schwarzwald und seine Umgebung, Geologie – Mineralogie-Bergbau - Umwelt und Tourismus, Sammlung Geologischer Führer, Bd. 102, Stuttgart.
- GÜNTHER, E.W. (1987): Zur Gliederung der Lösses des südlichen Oberrheintals. In: Eiszeitalter und Gegenwart, Jahrbuch der Deutschen Quartärvereinigung, Bd. 37: 67-77.
- HAARHOFF, T. & KNORR, A. (1989): Auswirkungen des Sauren Regens und des Waldsterbens auf das Grundwasser – Fallstudien im Freistaat Bayern. In: BRECHTEL, H.M. (1989):

Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden-Gefahr für die Gewässer?
Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und
Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.

- HARMAND, D. & DESHAIES, M. (2010): Oberrheingraben und Vogesen. In: LIEDTKE, H.;
DESHAIES, M.; GAMEZ, P.; HARMAND, D. & PREUSSER, H. (2010): Die
Oberflächenformen in der Grenzregion Saarland-Lothringen-Luxemburg,
Veröffentlichung des Institutes für Landeskunde im Saarland, Bd. 259,
Saarbrücken/Leipzig.
- HAURY, J. & MULLER, S. (1991): Variations écologiques et chronologiques de la végétation
macrophytique des rivières acides du Massif armoricain et des Vosges du Nord
(France). In: Revue des Sciences de l'eau, Bd.4: 463-482.
- HEGG, CH. (2005): Der Wald als Filter für Trinkwasser. Reduktion der Luftschadstoffe und
vorsichtige Waldwirtschaft nötig. In: Neue Züricher Zeitung: 211: 61.
- HEINZ, I. (1984): Trinkwasserversorgung bei steigenden Umweltbelastungen.
Verfahrenstechnische und finanzielle Konsequenzen für Trinkwassergewinnung und
Trinkwasseraufbereitung. In: Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 19.
- HEISNER, U. (2003): Die Rolle des Bodenskeletts bei der nachhaltigen Sicherung von
Speicher- und Regelfunktionen der Waldböden im Südschwarzwald, Freiburg.
- HENDL, M. (2002): Das Klima. In: LIEDTKE, H. & MARCINEK, J. (Hrg.) (2002): Physische
Geographie Deutschlands, Stuttgart: 17-127.
- HENNINGSEN, D. & KATZUNG, G. (2006): Einführung in die Geologie Deutschlands, 7.
überarbeitete und erweiterte Auflage, München.
- HESS, N. & HÄRTLING, J.W. (2000): Chemische und biologische Gewässergüte der Oberen
Schiltach. In: Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau,
Bd. 90.
- HILDEBRAND, E.E. (1986): Zustand und Entwicklung der Austauschigenschaften von
Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. In:
Forstwissenschaftliches Centralblatt, Bd. 105: 60-76.
- HILDEBRAND, E.E. & SCHACK-KIRCHNER, H. (1990): Der Einfluss der Korngröße oberflächlich
ausgebrachter Dolomite auf Lösungsverhalten und vertikale Wirkungstiefe. In: Forst
und Holz, 45.Jahrgang: 139-142.
- HÖCKE, C.E. (2006): Langfristige Veränderungen der Bodenvegetation und von
Bodeneigenschaften durch Walddüngungen im Nordschwarzwald und auf der Baar,
Freiburg.

- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W.G. (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 7. Auflage, Heidelberg.
- HUIB, E. (2011): Angewandte Statistik in Geografie und Umweltwissenschaften, Köln.
- HÜTTERMANN, A. (1983): Auswirkungen „Saurer Deposition“ auf die Physiologie des Wurzelraumes von Waldökosystemen. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 26/27: 663-664.
- HÜTTL, F.R. (1989): Liming and fertilization as mitigation tools in declining forest ecosystems. In: Water, Air and Soil Pollution, Bd. 44: 93-118.
- HÜTTL, F.R. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. In: Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Schriftenreihe des Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., Zusammenfassung Heft 28.
- IMMER, A.; SCHMIDT, W.; MEIWES, K.J. & BEESE, F. (1993): Langzeitwirkungen von Kalkung und Düngung auf den chemischen Zustand im Oberboden, die Humusformen und die Bodenvegetation in einem Fichtenforst. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt, Bd.112: 334-346.
- JACQUIN, F. & FLORENTIN, L. (1988): Atlas des sols de lorraine, Nancy.
- JAMAGNE, M. (2011) : Grand paysages pédologiques de France, Paris.
- JARABAC, M. & CHLEBEK, A. (1989): Die Gewässer in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten und ihre Bedrohung aufgrund von Luftverschmutzungen. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden-Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- JORDI, B. (2005): Trinkwasserschutz, Der Waldboden- ein optimaler Filter. In: Umwelt, Bd.3.
- KAUPENJOHANN, M. (1995): Wirkungen der Kalkung auf Bäume und Bodenvegetation. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 17, 50. Jahrgang: 942-945.
- KELLER, J. (1984): Der Jungtertiäre Vulkanismus Südwestdeutschlands: Exkursionen im Kaiserstuhl und Hegau. In: Fortschritte der Mineralogie, Band 62.
- KENK, G.; UNFRIED, P.; EVERS, F.H. & HILDEBRAND, E.E. (1984): Düngung zur Minderung der neuartigen Waldschäden – Auswertungen eines alten Düngungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein- Odenwald. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt, Bd. 103: 307- 320.
- KLEEBOURG, H.B. & CEMUS, J. (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten-Definitionen. In: KLEEBOURG, H.B. (Hrg.)(1992): Regionalisierung in der Hydrologie. Weinheim, Basel.

- KLEIN, C. (1995): Le relief des Hautes-Vosges. L'intérêt géomorphologique particulier du dispositif étagé culminant, Gap.
- KLÖTI, P.(1989): Zur Interpretation von Messergebnissen des Stoffeintrages in Waldbestände. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden-Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- KOERNER, W.; BENOIT, M.; DAMBRINE, E. & DUPOUEY, J.L. (1999): Influence des Anciennes Pratiques Agricoles sur la Végétation et les sols des forêts reboisées dans le Massif Vosgien. In: Revue Forestière Française, Bd.2.
- KOHLER, A. & RAHMANN, H. (1988): Gefährdung und Schutz von Gewässern, Tagung über Umweltforschung an der Universität Hohenheim, Stuttgart.
- KÜSTER, H.J. (Hrg.) (2003): Geschichte des Waldes, Von der Urzeit bis zur Gegenwart, München.
- KRETSCHMAR, R. (1986): Kulturtechnisch- Bodenkundliches Praktikum, ausgewählte Laboratoriumsmethoden, eine Anleitung zum selbständigen Arbeiten an Böden, Kiel.
- KÜHNE, O. (2003): Oberschlesien- Systemtransformation und Umwelt in einem Altindustriegebiet. In: Geographische Rundschau, Bd. 7-8.
- KÜHNE, O. (2000): Umweltbelastungen und Transformation in Polen. In: Geographische Rundschau, Bd. 3.
- LAMPARSKI, F. (1985): Der Einfluss der Regenwurmart Lumbricus badensis auf Waldböden im Südschwarzwald. In: Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 15.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) & MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrg.)(2005): Sickerwasser. Richtlinien für Beobachtungen und Auswertung, Düsseldorf.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrg.)(2008): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrg.)(1991): Die Moosflora der Bäche des Odenwaldes: Schwerpunktuntersuchung zur Gewässerversauerung, Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrg.)(1992): Bewertung des Säurezustandes von Fließgewässern im Mittleren Schwarzwald anhand ihrer Fischfauna und Mossflora, Karlsruhe.
- LANDESFORSTPRÄSIDIUM DES FREISTAATES SACHSEN (Hrg.)(2004): Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern, Pirna.

- LANDMANN, G. & BONNEAU, M. (Hrg.) (1995): Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains, Berlin.
- LEHMANN, R.; HAMM, A.; SCHMITT, P. & WIETING, J. (1989): Kartierung der zur Gewässerversauerung neigenden Gebiete in der Bundesrepublik Deutschland. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- LEHMANN-CARPZOV, R.; PATERNOSTER, K. & STUBENDORFF, U. (1978): Quartärgeologische Deckschichten- Kartierung im Waserweiler Ried zwischen Kaiserstuhl und Tuniberg (Südbaden). In: Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Bd. 20: 77-100.
- LEIBER, J. (2000): Geologie der Umgebung von Triberg und St. Georgen im Schwarzwald. In: Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau, Bd. 90: 2000.
- LETHMATE, J. (2011): Versauerung der Birgter Quelle - nordwestlicher Teutoburger Wald im Messintervall der hydrologischen Jahre 1988 – 2000 – 2008. In: Hercynia N. F., Bd. 44:27-38.
- LIEDTKE, H. & MARCINEK, J. (Hrg.)(2002): Physische Geographie Deutschlands, Stuttgart.
- LIEDTKE, H.; DESHAIES, M.; GAMEZ, P.; HARMAND, D. & PREUSSER, H. (2010): Die Oberflächenformen in der Grenzregion Saarland-Lothringen-Luxemburg, Veröffentlichung des Institutes für Landeskunde, Bd. 48, Saarbrücken.
- LORENZ, K.; ARMBRUSTER, M.; RASPE, S. & FEGER, K.H. (1998): Mittel- bis langfristige Auswirkungen von Kompensations- bzw. Bodenschutzkalkungen auf die Pedo- und Hydrosphäre: II. Chemische und mikrobiologische Veränderungen im Oberboden. Zwischenbericht anlässlich des Statusseminares der Projektträger des Landes Baden-Württemberg am 3. Und 4. März 1998, Karlsruhe.
- MAAS, R. & SCHNEIDER, J.L. (1995): Die südlichen Vogesen (Exkursion E am 20.04.1995). In: Jahrbuch der Mitteloberrheinischen geologischen Vereinigung, Bd. 77: 139-153.
- MAECKEL, R. (1992): Naturraum des Mittleren und Südlichen Schwarzwaldes und des Oberrheintieflandes. In: Freiburger Geographische Hefte, Heft 36.
- MAITAT, O.; BOUDOT, J.P.; MERLET, D. & ROUILLIER, J. (2000): Aluminium chemistry in two contrasted acid forest soils and headwater streams impacted by acid deposition, Vosges Mountains, N.E. France. In: Water, Air, and Soil Pollution, Bd. 117: 217-243.
- MALESSA, V. & ULRICH, B. (1989): Beitrag zum Einfluss der Bodenversauerung auf den Zustand der Grund- und Oberflächengewässer, In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer?

Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.

MANEGOLD, M. & LUDEMANN, T. (2007): Spuren der historischen Landnutzung in der aktuellen Vegetation der Wälder Hinterzartens im Südschwarzwald. In: Freiburger Universitätsblätter, Heft 175, 46. Jahrgang.

MARKL, G. (2008): Minerale und Gesteine, Mineralogie- Petrologie- Geochemie, 2. Auflage, Heidelberg.

MATSCHULLAT, H.; HEINRICHS, H.; SCHNEIDER, J & ULRICH, B. (Hrg.) (1994): Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität, Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz, Berlin.

MATZNER, E. (1989): Stoffliche Veränderungen in schadstoffbelastenden Waldböden. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.

MAUSER, W. (2007): Wie lange reicht die Ressource Wasser? Vom Umgang mit dem blauen Gold, Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn.

MEESENBURG, H. (1989): Der Einfluß hydrologischer Prozesse auf hydrochemische Muster in einem episodisch sauren Fließgewässer im Südschwarzwald. In: MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden-Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.

MEIWES, K.-J.; KÖNIG, N.; KHANA, P.K.; PRENZEL, J. & ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd.7.

MERCIER, J.L. & JESER, N. (2004): The glacial history of the Vosges Mountains. In: EHLERS, J. & GIBBARD, P.L. (Hrg.): Quaternary glaciations – extend and chronology. Part I: Europe. Amsterdam et al.: 113-118.

MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden - Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.

MINISTERIUM FÜR UMWELT- UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2012): Forstliches Umweltmonitoring-Waldzustandsbericht 2012, Langfassung, Saarbrücken.

MOHAMED, A.D.; RANGER, J.; DAMBRINE, E.; BONNEAU, M.; GELHAYE, D. & GRANIER, A. (1993): The effects of limestone plus NPK fertilization on the soil and mass balance

- of a spruce stand (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Vosges Mountains, In: *Forest Ecology and Management*, Bd.60: 291-310.
- MOOSMAYER, H.-U. (1984): Erkenntnisse über die Walderkrankung, Dargestellt an Projekten der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Bd.103: 1-16.
- MÜNZING, K. (1985): Hydrogeologie in Baden-Württemberg. In: *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, Heft 11, Freiburg.
- NAGEL, H.D. & GREGOR, H.D. (1999): Ökologische Belastungsgrenzen - critical loads & levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltungspolitik, Berlin.
- NATURFORSCHENDE GESELLSCHAFT ZU FREIBURG IM BREISGAU (2002): Erzlagerstätte Schauinsland bei Freiburg im Breisgau. In: *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau*, Bd.92, Heft 1.
- NÖLKEN, W. (2005): Holzkohleanalytische Untersuchungen zur Waldgeschichte der Vogesen, Freiburg.
- NOHRSTEDT, H.O. (2002): Effects of liming and fertilization on chemistry and nitrogen turnover in acidic forest soils in SW Sweden. In: *Water Air Soil Pollution*, Bd.139: 343-354.
- OFFICE NATIONAL DES FORETS, DIRECTION REGIONALE ALSACE (Hrg.) (2000): Les choix des essences forésières dans les Vosges alsaciennes, Dijon.
- OTT, W. (1990): Zur Situation der Waldwirtschaft in Baden-Württemberg. In: *Allgemeine Forstzeitschrift*, Bd.24.
- PARTY, J.P.; PROBST, A.; DAMBRINE, E. & THOMAS, A.L. (1996): Critical loads of acidity to surface waters in the Vosges massif (north-east of France). In: *Water Air and Soil Pollution*, Bd.85: 2407-2412.
- PATT, H.; JÜRGING, P. & KRAUS, W. (2011): *Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*, 4. aktualisierte Auflage, Heidelberg.
- PFLUG, R. (1982): *Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens*, mit 43 Abbildungen und 2 Tabellen im Text, Darmstadt.
- PINTER, I. (1989): Säurezustand der Gewässer in Baden- Württemberg. In: MINISTERIUM FÜR UMWELT & LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): *Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden - Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen*, Stuttgart.
- PLETSCH, A. (2003): *Frankreich. Eine wissenschaftliche Länderkunde*, 2.erweiterte und überarbeitete Auflage, Darmstadt.

- PREUSSER, H. (1978): Die Hochweidewirtschaft in den Vogesen. Jüngere Entwicklungstendenzen und heutige Struktur, Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität des Saarlandes, Bd. 26, Saarbrücken.
- PRIER, H. (1985): Untersuchungen über das Temperaturverhalten von Quellen im Grundgebirge des südlichen Schwarzwaldes. In: Abhandlung des geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Heft 11.
- PROBST, A.E; PARTY, J.P., ET AL. (1999): Evidence of springwater acidification in the Vosges Mountains: Influence of bedrock buffering Capacity. In: Water Air and Soil Pollution, Bd. 114: 395-411.
- REHFUESS, K.E. (1990): Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung, 2. Auflage, Hamburg.
- REIBEL, G. & WURTZ, C.R. (1984): Etude petrographique et géochimique de la bande mediane volcanique du champ- du- feu, In: Fortschritte der Mineralogie, Bd. 62, Beiheft 2.
- RÖHLING, R. (1990): Quellen; Ursprung unserer Fließgewässer, Schriftenreihe des BUND-Saarland, Heft 2.
- ROST-SIEBERT, K. (1984): Untersuchungen zur toxischen Wirkung von H⁺- und Al³⁺-Ionen auf Keimpflanzen von Fichten (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus Silvatica* L.), Göttingen.
- ROTHE, A.; ENGELSCHALL, M.; HURLER, R.; WITTFOTH, J. & BUTTERBACH-BAHL, K. (2000): Nitratverlagerung in tieferen Bodenschichten eines süddeutschen Waldgebietes. In: Wasser und Boden, 52. Jahrgang: 52-56.
- RUMP, H.H. & KRIST, H. (1998): Laborhandbuch für die Untersuchung von Wasser, Abwasser und Boden, 3. Völlig überarbeitete Auflage, Weinheim.
- SAILER-SCHMID, A. (1996): Standorteigenschaften und chemische Beschaffenheit des Bodenwassers auf unterschiedlich genutzten Lößböden bei Rottenburg a.N. unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoffkomponente, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, Tübingen.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Berlin.
- SCHEITHAUER, J. & GRUNEWALD, K. (2007): Saurer Regen und Waldsterben im ehemaligen „Schwarzen Dreieck“ (oberes Osterzgebirge). In: ZEPP, H. (Hrg.): Ökologische Problemräume Deutschlands, Darmstadt.
- SCHLEICHER, H. (1984^a): Die Granitporphyre des Schwarzwaldes. In: Fortschritte der Mineralogie, Bd. 62, Beiheft 2.

- SCHLEICHER, H. (1984^b): Der Triberger Granit. In: Fortschritte der Mineralogie, Bd. 62, Beiheft 2.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.P. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler, 2. neubearbeitete Auflage, mit 46 Abbildungen und 60 Tabellen, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- SCHOEN, R. (1989): Deposition versauernder Luftschadstoffe in der Bundesrepublik Deutschland – eine Literaturlauswertung. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden-Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.
- SCHÖPFER, W. & HRADEZKY, J. (1984): Der Indizienbeweis: Luftverschmutzung maßgebliche Ursache der Walderkrankung. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt, Bd. 103: 231-248.
- SCHWINN, K. (1992): Nährstoffversorgung und Bodenversauerung saarländischer Waldstandorte auf Buntsandstein und Muschelkalk, Dissertation, Saarbrücken.
- SERET, G.; DRICOT, E. & WANSARD, G. (1990): Evidence for an early glacial maximum in the French Vosges during the last glacial cycle. In: Nature, Bd. 346: 453-456.
- SHRIVASTAVA, M. (1976): Quantifizierung der Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Oberhöhe am Beispiel der Fichte (*Picea abies* Karst) in Hessen, Bd.43.
- STAHR, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standorteigenschaften im Südschwarzwald. In: Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwig-Universität Freiburg i. Breisgau (Hrg.): Freiburger Bodenkundlicher Abhandlungen, Heft 9, Freiburg.
- STAHR, K. (2001): Die Böden des Breisgaus und angrenzender Gebiete. In: Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau, Bd. 91.
- STAHR, K.; KANDELER, E.; HERRMANN, L. & STRECK, T. (2008): Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor, Stuttgart.
- STAPF, R.G. (1995): Die nördlichen kristallinen Vogesen (Saxothuringikum) (Exkursion C am 20.04.1995). In: Jahrbuch der Mitteloberrheinischen geologischen Vereinigung, Bd. 77: 113-131.
- STEINLE, R. & BÜCKING, W. (1989): Stoffeintrag in naturnahe Waldökosysteme (Bannwälder) Baden- Württembergs. In: BRECHTEL, H.M. (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden- Gefahr für die Gewässer? Vorträge und Poster der Wissenschaftlichen Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft vom 28. bis 30. November 1988 in Fulda, Bonn.

- STOBER, I. (2002): Geologie und Geschichte der Mineral- und Thermalquellen im Schwarzwald. In: Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau, Bd. 92, Heft 2.
- STRAUB, F. (2007): Hydromelioration der Wälder im Buntsandstein-Schwarzwald. In: Freiburger Universitätsblätter, Heft 175, 46. Jahrgang.
- SUCKER, C. (2008): Einfluss der Forstbewirtschaftung auf die Wasserqualität. Handbuch Wald & Wasser.
- SUCKER, C.; PUHLMANN, H.; ZIRLEWAGEN D.; WILPERT VON, K. & FEGER, K.H. (2009): Bodenschutzkalkungen in Wäldern zur Verbesserung der Wasserqualität- Vergleichende Untersuchungen auf Einzugsgebietsebene. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Bd. 53, Heft 4: 250-262.
- SUNDHAUS, D. (2005): Paläoökologische Untersuchungen zur spätglazialen und holozänen Landschaftsgenese des Ostschwarzwaldes im Vergleich mit den Buntsandsteinvogesen. In: Freiburger Geographische Hefte, Heft 64, 2005.
- SVERDRUP, H. & WARFVINGE, P. (1993): The (Ca+Mg+K)/Al-ratio as an indicator of soil acidification effects on three growth. In: NILSSON, L.O.; HÜTTL, R.F.; JOHANSSON, U.T. & MATHY, P. (1993): Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems. Proceedings of a symposium held in Halmstad, Sweden, 7-10 Juni 1993, Brüssel.
- TEUFEL, D. & BAUER, P. (2004): Die Wasserqualität Handschuhsheimer Quellen – Ist das Quellwasser im Wald noch gesund? In: Jahrbuch Handschuhsheim 2004.
- THIEBAUT, G. (1997): Effets des perturbations liees à l'eutrophisation et l'acidification des cours d'eau des Vosges du Nord sur les phytocenoses aquatiques, Metz.
- THOMAS, A.L.; DAMBRINE, E.; KING, D.; PARTY, J.P. & PROBST, A.E. (1999): A spatial study of the relationships between streamwater acidity and geology, soils and relief (Vosges, northeastern France). In: Journal of Hydrology, Bd. 217: 35-45.
- TIXIER, G & F. GUEROLD (2005): Pectopetra response to acidification in several headwater streams in the Vosges Mountains. In: Biodiversity and Conservation, Bd. 14: 1525-1539.
- TIXIER, G. (2004): L'acidification antropique des eaux de surface- Effets sur les communautes de marco invertébrés benthiques- autoécologie et réponses d'espèces caractéristiques des ruisseaux de tête de bassin des Vosges, Metz.
- TRENKLE, H. & VON RUDLOFF, H. (1981): Das Klima des Schwarzwaldes. In: Liehl, E. & Sick, W.D. (Hrg.) (1981): Der Schwarzwald, Beiträge zur Landeskunde, Bühl/Baden.

- ULRICH, B. (1981^a): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 144, S.289-305.
- ULRICH, B. (1981^b): Theoretische Betrachtung des Ionenkreislaufs in Waldökosystemen. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 144: 647-659.
- ULRICH, B. (1986): Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt, Bd. 105: 421-435.
- ULRICH, B. (1989): Tiefengradienten der Bodenversauerung. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 152: 81-84.
- ULRICH, B. & MALESSA, V. (1988): Tiefengradient der Bodenversauerung, Göttingen.
- UMEG (2005): Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg (2005): Jahresbericht 2004, Karlsruhe.
- UMWELTBUNDESAMT BERLIN (Hrg.) (1987): Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland, Berlin.
- UMWELTBUNDESAMT FÜR MENSCH UND UMWELT (2010): Auswertung der Luftbelastungssituation 2009, Dessau- Roßlau.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrg.) (2007): Leitbild zukunftsfähige Trinkwasserversorgung Baden-Württemberg, Freiburg.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALT (1991): Methodenhandbuch, Band I, die Untersuchung von Böden, bearbeitet von Prof. Dr. Georg Hoffmann, Darmstadt.
- VIVILLE, D., BIRON, P., GRANIER, A., DAMBRINE, E. & PROBST, A. (1993): Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). In: Journal of Hydrology, Bd. 144: 273-282.
- VÖLKEL, J.; ZEPP, H. & KLEBER, A. (2002): Periglaziale Deckschichten in Mitteleuropa- ein offenes Forschungsfeld. In: Berichte zur Deutschen Landeskunde, Bd. 76, Flensburg.
- WALSER, H. (2011): Statistik für Naturwissenschaftler. Köln.
- WALTER, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa, 7. vollständig neu bearbeitete Auflage, Stuttgart.
- WALTHER, W. (1993): Nitrat im Grundwasser- Fallbespiele; Maßnahmen zur Verminderung der Nitratbelastung des Grundwassers in Niedersachsen, Hildesheim.
- WEISCHET, W. & ENDLICHER, W. (2000): Regionale Klimatologie, Teil 2, Die Alte Welt: Europa, Afrika, Asien, Stuttgart.

- WELZ, B. & SPERLING, M. (1997): Atomabsorptionsspektrometrie, 4. neubearbeitete Auflage, Weinheim.
- WENZENS, G. (1987): Der kaltzeitliche Formenschatz im Cleurie- Tal (Südwestvogesen). In: Eiszeitalter und Gegenwart, Bd. 37: 79-91.
- WERNER, W.; FRANZKE, H.J.; WIRSING, G.; JOCHUM, J.; LÜDERS, V. & WITTENBRINK, J. (2002): Die Erzlagerstätte Schauinsland bei Freiburg im Breisgau. Bergbau, Geologie, Hydrogeologie, Mineralogie, Geochemie, Tektonik und Lagerstättenentstehung. In: Berichte der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg im Breisgau, Bd. 92, Heft 1.
- WESTERMANN, F. (2000): Versauerung von Fließgewässern in Rheinland-Pfalz, Untersuchungen von Bachoberläufen im Hunsrück 1983-1999, Entwicklungen und Trends, Mainz.
- WIMMENAUER, W. (1984): Das prävariskische Kristallin im Schwarzwald. In: Fortschritte der Mineralogie, Bd. 62, Beiheft 2.
- WOCHELE, S. (2010): Modellierung räumlich differenzierter Wirkungen von atmosphärischen Stoffeinträgen auf Stoffumsetzungen und Stoffausträge aus Waldökosystemen in Deutschland, Dissertation, Freiburg im Breisgau.
- WOLFF, B. & RIECK, W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Zustandserhebung im Wald von 1987-1993 (BZW), Band 1 und 2, Eberswalde.
- WOLTERS, V.; EKSCHMITT, K. & SCHOLLE, G. (1995): 10 Jahre Waldkalkung - Wirkungen auf Bodenorganismen und biologische Umsetzungsprozesse. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Bd. 50: 936-941.
- ZECH, D. (1990): Adsorption of dissolved organic Carbon and Sulfat by acid Forest soils in the Fichtelgebirge. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd.153: 379-384.
- ZÖTTL, H.W.; FEGER, K.H. & BRAHMER, G. (1985): Chemismus von Schmelzwässern während der Schneeschmelze 1984. In: Naturwissenschaften, Bd. 72: 268-270.
- ZÖTTL, H.W.; STAHR, K. & KEILEN, K. (1977): Bodenentwicklung und Standorteigenschaften im Gebiet des Bärhaldegranits. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Bd. 148, Heft 10/11: 185-197, Frankfurt am Main.
- ZÖTTL, H.W. (1989): Wasserchemismus in Modelleinzugsgebieten: Einfluss von Bodenform und Nutzungsgeschichte, In: MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (Hrg.) (1989): Tagungsführer zum Symposium: Gewässerversauerung in Baden-Württemberg, Kenntnisstand, Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Stuttgart.

7. Deutsche Normen und Verordnungen

- DIN EN ISO 5667-3: Wasserbeschaffenheit, Probenahme, Teil 3: Anleitung zur Konservierung und Handhabung von Proben, April 1996.
- DIN ISO 10381-1: Bodenbeschaffenheit- Probenahme, Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probenahmeprogrammen, 2002.
- DIN ISO 10381-2: Bodenbeschaffenheit-Probenahme, Teil 2: Anleitung für Probenahmeverfahren, 2002.
- DIN ISO 10381-4: Bodenbeschaffenheit- Probenahme, Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten, 2003.
- DIN EN ISO 22475-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen-Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung, 2006.
- DIN ISO 10390: Bodenbeschaffenheit-Bestimmung des pH-Wertes, 2005.
- DIN 38404-5: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung-Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C), Teil 5: Bestimmung des pH-Werts(C 5), 1984.
- DIN 38 402-13: Allgemeine Angaben (Gruppe A), Teil 13: Probenahme aus Grundwasserleitern (A 13), Dezember 1985.
- DIN 38 402-15: Allgemeine Angaben (Gruppe A), Teil 15: Probenahme aus Fließgewässern (A 15), Juli 1986.
- DIN EN ISO 11464: Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen, Dezember 1996.
- DIN ISO 5667-1: Wasserbeschaffenheit, Probenahme, Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probenahmeprogrammen, September 1993.
- DIN ISO 5667-3: Wasserbeschaffenheit, Probenahme, Teil 3: Anleitung zur Konservierung und Handhabung von Proben, April 1996.
- DIN 19 684, TEIL 8: Chemische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Austauschkapazität des Bodens und der austauschbaren Kationen, Februar 1977.
- DIN 38 406-3: Kationen (Gruppe E), Teil 3: Bestimmung von Calcium und Magnesium (E3), September 1982.

- DIN 38 406-28: Kationen (Gruppe E), Teil 28: Bestimmung von gelöstem Barium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (E 28), Mai 1998.
- DIN 38 406-14: Kationen (Gruppe E), Teil 14: Bestimmung von Natrium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der Luft-Acetylen-Flamme (E 14), Juli 1992.
- DIN 38 406-13: Kationen (Gruppe E), Teil 13: Bestimmung von Kalium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) in der Luft-Acetylen-Flamme (E 13), Juli 1992.
- DIN 38 406-25, TEIL 25: Kationen (Gruppe E), Teil 25: Bestimmung von Aluminium mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), (E 25), Juni 1995.
- TRINKWASSERVERORDNUNG (TRINKWV) (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, DIN 2001, Umsetzung der Richtlinie 98/83/EG des Rates vom 3. November 1998.
- WASSERRAHMENRICHTLINIE DER EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates, vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- BUNDESREGIERUNG DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (Hrg.) (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung. In: Bundesgesetzblatt, Teil I nr. 24, Jahrgang 2001.
- DAVEZAC, H.; GRANDGUILLOT, G.; ROBIN, A. & SAOUT, C. (Directions departementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS) (2008): L'eau potable en France 2005-2006, im Netz abrufbar unter: http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/bilanqualite_05_06.pdf, zuletzt abgerufen am 03.01.2013.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrg.) (2007): Leitbild zukunftsfähige Trinkwasserversorgung Baden-Württemberg, Freiburg. Download von Seite www.um.baden-wuerttemberg.de, am 20.12.2011.

8. Karten

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE (1966): Carte pédologique de la France à échelle du millionième.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEN STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTEN DER BRD (HRG.) (2005): Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) der Bundesrepublik Deutschland.

9. Internetlinks

BEISECKER, R. & EVERS, J. (2012): Abschlussbericht: Diffuse Stoffausträge aus Wald und naturnahen Nutzungen:

[http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LAWA/Vorhaben_des_Ausschusses_Grundwasser_und_Wasserversorgung_\(AG\)/G_1.11/120515_Endbericht_LAWA_Stoffaustraege_Weitergabe.pdf](http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LAWA/Vorhaben_des_Ausschusses_Grundwasser_und_Wasserversorgung_(AG)/G_1.11/120515_Endbericht_LAWA_Stoffaustraege_Weitergabe.pdf)

BUNDESREGIERUNG DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (Hrg.) (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung: *www.dwd.de*.

BÜRGER, K. (2004): Veränderung von Waldökosystemen aufgrund historischer Nutzung im Schwarzwald und in den Vogesen.: *<http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/xvms.cgi?SWB11513766>*.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DES VOSGES (2011): Sur nos captages... cultivons l'eau des Vosges, Fiche n°23: *http://cda-vosges.fr/fichiers/Fiche_Captage_23.pdf*.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (2000): Integrated Water Resources Management, Technical Advisory Committee (TAC) Background Paper No. 4: *www.gwpforum.org*.

SUCKER, C. (2008): Einfluss der Forstbewirtschaftung auf die Wasserqualität. Handbuch Wald & Wasser: *<http://www.waldwissen.net>*.

10. Anhang

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb. A. 1: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Vogesenwestseite..	173
Abb. A. 2: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.....	173
Abb. A. 3: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden des Vogesenkammes. ..	174
Abb. A. 4: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.	174
Abb. A. 5: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Vogesenostseite.....	175
Abb. A. 6: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.....	175
Abb. A. 7: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Schwarzwaldwestseite.	176
Abb. A. 8: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden des Schwarzwaldkammes.	176
Abb. A. 9: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Schwarzwaldostseite.	177

Tabellenverzeichnis Anhang

Tab. A. 1: Lufttemperaturen in Vogesen und Schwarzwald, aus: HENDEL 2002: 90/91.	144
Tab. A. 2: Durchschnittliche Monats- und Jahresmittel der Lufttemperatur im südlichen Oberrheingraben	144
Tab. A. 3: Durchschnittliche Anzahl der Frosttage.....	145
Tab. A. 4: Durchschnittliche Niederschlagssumme in den Oberrheinrandgebirgen.....	145
Tab. A. 5: Durchschnittliche Niederschlagssummen im Oberrheingebiet.....	146
Tab. A. 6: H ⁺ -Ionen- und Al ³⁺ -Ionenkonzentration in den Niederschlägen der Vogesen-und Schwarzwaldlagen.	146
Tab. A. 7: Übersicht über die ausgewählten Wetterstationen in den Vogesen; Jahresniederschlagssumme eingeteilt in die verschiedenen Vogesenlagen, Daten: Meteo France.	147
Tab. A. 8: Übersicht über die ausgewählten Wetterstationen im Schwarzwald; Jahresniederschlagssumme eingeteilt in die verschiedenen Schwarzwaldlagen, Daten: DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD).....	148
Tab. A. 9: Granitquellen der Vogesenwestseite.	150
Tab. A. 10: Buntsandsteinquellen der Vogesenwestseite.	151
Tab. A. 11: Granitquellen des Vogesenkamms.....	152
Tab. A. 12: Buntsandsteinquellen des Vogesenkamms.	153
Tab. A. 13: Granitquellen der Vogesenostseite.....	154
Tab. A. 14: Buntsandsteinquellen der Vogesenostseite.	155
Tab. A. 15: Quellen der Schwarzwaldwestseite.....	156
Tab. A. 16: Quellen des Schwarzwaldkammes.....	157
Tab. A. 17: Quellen der Schwarzwaldostseite.	158
Tab. A. 18: Bodeneigenschaften der Granitstandorte an der Vogesenwestseite.....	159
Tab. A. 19: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte an der Vogesenwestseite.	160
Tab. A. 20: Bodeneigenschaften der Granitstandorte am Vogesenkamm.	160
Tab. A. 21: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte am Vogesenkamm.....	161
Tab. A. 22: Bodeneigenschaften der Granitstandorte an der Vogesenostseite.	161
Tab. A. 23: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte an der Vogesenostseite.....	162
Tab. A. 24: Bodeneigenschaften der Standorte an der Schwarzwaldwestseite.....	162
Tab. A. 25: Bodeneigenschaften der Standorte am Schwarzwaldkamm.	163
Tab. A. 26: Bodeneigenschaften der Standorte an der Schwarzwaldostseite.	163
Tab. A. 27: Übersicht über die Quellwerte in den verschiedenen Vogesenlagen (Mittelwerte).	165
Tab. A. 28: Übersicht über die Quellwerte in den verschiedenen Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	165
Tab. A. 29: H ⁺ - Ionenmenge (µmol/l) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).	165

Tab. A. 30: Al ³⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).....	165
Tab. A. 31: K ⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).....	166
Tab. A. 32: Na ⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).....	166
Tab. A. 33: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).....	166
Tab. A. 34: Mg ²⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).....	167
Tab. A. 35: H ⁺ - Ionenmenge (µmol/l) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	167
Tab. A. 36: Al ³⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	167
Tab. A. 37: K ⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	167
Tab. A. 38: Na ⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	168
Tab. A. 39: Ca ²⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	168
Tab. A. 40: Mg ²⁺ -Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).	168
Tab. A. 41: Übersicht über die Quellwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen (Mittelwerte).....	168
Tab. A. 42: Übersicht über die Bodenwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen in 0-20cm Bodentiefe (Mittelwerte).	169
Tab. A. 43: Übersicht über die Bodenwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen in 80-100cm Bodentiefe (Mittelwerte).	169
Tab. A. 44: Einschätzung der Kalkungsbedürftigkeit der Vogesenstandorte aufgrund des pH-Wertes KCl, der Ca+Mg-Sättigung und des Ca/Al-Molverhältnisses.	170
Tab. A. 45: Korrelationen zwischen den chemischen Parametern in den beiden Umweltmedien.	172
Tab. A. 46: Anteil der Elemente an der KAK _{eff.} [%] in den Granitböden der Vogesenwestseite.	178
Tab. A. 47: Anteil der Elemente an der KAK _{eff.} [%] in den Granitböden des Vogesenkammes.	178
Tab. A. 48: Anteil der Elemente an der KAK _{eff.} [%] in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.	178

Tab. A. 49: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.	178
Tab. A. 50: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Vogesenostseite.	179
Tab. A. 51: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Schwarzwaldwestseite.	179
Tab. A. 52: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.	179
Tab. A. 53: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden des Schwarzwaldkammes.	179
Tab. A. 54: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Schwarzwaldostseite.	180
Tab. A. 55: Standardabweichungen zwischen der Ca^{2+} -Ionenkonzentration der Beprobungen.	181
Tab. A. 56: Molares Ca/Al-Verhältnis in den Quellen und in der Bodenlösung.	182
Tab. A. 57: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale im Oberboden (0-20cm).	185

Kartenverzeichnis Anhang

Karte A. 1: Lageübersicht der Quellgewässer in Vogesen und Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.	149
Karte A. 2: pH-Werte und Ca ²⁺ -Ionenkonzentration der Vogesenquellen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.....	164
Karte A. 3: Ca/Al-Verhältnis in den beiden Umweltmedien in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.	184

Abkürzungsverzeichnis Anhang

Abkürzung	Erklärung
BS	Buntsandstein
GR	Granit
Quellnr.	Quellnummer
Standardabw.	Standardabweichung
MW	Mittelwert
MW B.	Mittelwert aller Beprobungen
B.	Beprobung
meq	Milliäquivalent
Vog.WS	Vogesenwestseite
Vog.K	Vogesenkamm
Vog.OS	Vogesenostseite
Vog.WS_GR	Vogesenwestseite Granit
Vog.K_GR	Vogesenkamm Granit
Vog.OS_GR	Vogesenostseite Granit
Vog.WS_BS	Vogesenwestseite_Buntsandstein
Vog.K_BS	Vogesenkamm_Buntsandstein
Vog.OS_BS	Vogesenostseite_Buntsandstein
Schw.WS	Schwarzwaldwestseite
Schw.K	Schwarzwaldkamm
Schw.OS	Schwarzwaldostseite
Quellnr.	Quellnummer
Nr.SPSS	Nummer SPSS
k.A.	Keine Angaben
k.G.	Keine Gefährdung
g.G.	Geringe Gefährdung
s.G.	Starke Gefährdung
s.s.G.	Sehr starke Gefährdung

Klima- und Niederschlagsdaten

Tab. A. 1: Lufttemperaturen in Vogesen und Schwarzwald, aus: HENDEL 2002: 90/91.

Station	Höhe [m]	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Jahres- schwankung [K]
<i>Vogesen</i>														
Grand Ballon ¹	1390	-3,2	-3,2	-0,4	2,4	7,0	10,0	12,1	9,3	5,3	1,4	-2,5	4,2	15,3
Meyenheim ¹	209	1,0	2,3	6,1	9,9	14,0	17,0	19,1	15,9	10,6	5,5	1,4	10,2	18,3
[K/hm] ³		0,36	0,47	0,55	0,64	0,59	0,59	0,1	0,56	0,45	0,35	0,33	0,51	
<i>Schwarzwald</i>														
Feldberg ²	1486	-3,7	-3,6	-1,6	1,0	5,3	8,5	10,1	8,2	5,0	0,1	-2,2	3,1	14,2
Mengen ²	215	0,7	2,2	5,7	9,4	13,6	16,9	18,1	14,8	9,6	5,0	1,8	9,7	18,0
[K/hm] ³		0,35	0,46	0,57	0,66	0,65	0,66	0,1	0,52	0,36	0,39	0,31	0,52	

Stationspositionen:

Feldberg 47° 53' N/8° 00' E

Mengen 47° 58' N/7° 43' E

Grand Ballon de Guebwiller 47° 53' N/7° 06' E

Meyenheim 47° 55' N/7° 24' E

Tab. A. 2: Durchschnittliche Monats- und Jahresmittel der Lufttemperatur im südlichen Oberrheingraben, aus: HENDEL 2002: 93/94.

Station	Höhe [m]	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Jahres- schwankung [K]
		Colmar ¹	190	1,9	3,1	6,9	11,2	15,5	18,9	20,9	19,9	16,7	11,1	6,1	2,2
Mengen ²	213	0,7	1,7	5,7	9,6	13,8	17,0	18,8	18,1	14,9	9,5	4,9	1,5	9,7	18,1

¹ Bezugszeitraum 1921-1950

² Bezugszeitraum 1931-1960

Tab. A. 3: Durchschnittliche Anzahl der Frosttage, aus: HENDEL 2002: 93/94.

Station	Höhe [m]	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.
Zentrale Grabensenke Gernsheim Forchheim	90	18	15	10	3	0	-	-	-
	116	19	16	12	4	0	-	-	-
Grabenwestrand Neustadt Bergzabern	163	17	14	10	2	0	-	-	-
	180	18	14	10	2	0	-	-	-
Grabenoststrand Bensheim Lahr	140	18	15	10	3	0	-	-	-
	158	18	15	10	3	0	-	-	-
Randgebirge Beerfelden Hornisgrinde Feldberg	450	23	19	14	6	0	-	-	-
	1125	27	24	21	15	4	0	-	-
	1486	29	25	24	18	8	2	0	0

Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
-	2	8	16	72
-	2	9	17	81
-	1	7	15	66
-	1	7	16	68
-	2	7	15	68
-	1	8	16	71
-	1	11	21	95
0	6	18	25	139
2	10	21	26	165

Tab. 1.44:
Durchschnittliche Anzahl der Frosttage während des Bezugszeitraumes 1951–1980 für charakteristische Positionen im Oberrheingraben und in seinen Randgebirgen (Stationsauswahl nach einer Datensammlung von MÜLLER-WESTERMEIER 1990)

Stationspositionen:
Beerfelden/Odenwald 49°34' N/8°58' E
Bensheim 49°41' N/8°38' E
Bergzabern 49°06' N/8°00' E
Feldberg/Südschwarzwald 47°53' N/8°00' E
Forchheim 48°58' N/8°20' E
Gernsheim 49°45' N/8°29' E
Hornisgrinde/Nordschwarzwald 48°36' N/8°12'
Lahr 48°20' N/7°53' E
Neustadt/Weinstraße 49°22' N/8°08' E

Tab. A. 4: Durchschnittliche Niederschlagssumme in den Oberrheinrandgebirgen, aus: HENDEL 2002: 94/95.

Station	Stationshöhe [m]	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.
Südvogesen Remiremont Lepuix ¹	380	146	134	114	96	104	114	104	130
	1100	237	237	176	141	143	154	133	190
Nordvogesen Badonviller Le Hohwald	326	83	83	71	70	91	113	82	99
	776	107	96	88	79	98	115	86	106
Schwarzwald Badenweiler Triberg Feldberg Hornisgrinde	412	67	66	66	85	100	115	92	118
	683	156	142	130	114	125	142	135	135
	1486	157	149	133	139	152	178	170	183
	1125	166	150	124	142	168	209	190	200
Odenwald/Spessart Beerfelden Rohrbrunn ²	450	94	82	78	71	78	97	93	98
	464	103	91	68	84	80	99	113	105
Pfälzer Wald/Haardt Taubensuhl ²	513	91	78	59	67	69	88	83	80

Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Quotient Sommer/Winter
105	98	149	157	1451	0,79
155	151	231	258	2206	0,65
73	74	95	81	1015	1,19
80	77	114	112	1158	0,97
75	67	84	68	1003	1,62
103	111	162	156	1611	0,91
129	123	174	172	1859	1,11
136	143	156	172	1956	1,23
78	76	98	109	1052	1,01
95	101	96	92	1127	1,11
76	73	80	81	925	1,00

Tab. 1.45:
Durchschnittliche Niederschlagssummen während des Bezugszeitraumes 1951–1980 in den Oberrheingraben-Randgebirgen (Angaben in mm; Stationsauswahl nach Datensammlungen von MÜLLER-WESTERMEIER 1990 und dem Service Météorologique Métropolitain Français 1986)

¹ Bezugszeitraum 1955–1980
² Bezugszeitraum 1931–1960.
Daten nach SCHNEIDER & VON SCHMIDT (1979)

Stationspositionen:

Badenweiler 47° 48' N/7° 40' E
Badonviller 48° 30' N/6° 54' E
Beerfelden 49° 34' N/8° 58' E
Feldberg 47° 53' N/8° 00' E
Hornisgrinde 48° 36' N/8° 12' E

Le Hohwald/Welschbruch 48° 24' N/7° 20' E
Lepuix/Ballon d'Alsace 47° 46' N/6° 49' E
Remiremont 48° 01' N/6° 36' E
Rohrbrunn-Forstamt 49° 54' N/9° 23' E
Taubensuhl-Forsthaus 49° 17' N/7° 55' E
Triberg/Hochtalstation 48° 08' N/8° 14' E

Tab. A. 5: Durchschnittliche Niederschlagssummen im Oberrheingebiet, aus: HENDEL 2002: 96/97.

Station	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli
Worms	36	34	35	39	62	68	67
Forchheim	59	61	50	60	82	94	78
Neuf-Brisach	37	34	38	45	68	87	68

Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Quotient Sommer/Winter
65	47	42	46	39	580	1,83
91	61	56	71	67	830	1,41
82	51	38	48	32	628	2,30

Tab. 1.46: Durchschnittliche Niederschlagssummen während des Bezugszeitraumes 1951–1980 im Meridionalprofil durch den Oberrheingraben längs des Rheinlaufes (Angaben in mm; Stationsauswahl nach Datensammlungen von MÜLLER-WESTERMEIER 1990 und des Service Météorologique Métropolitain Français 1986)

Stationspositionen: Neuf-Brisach 48°01'N/7°32'E, 195 m
Forchheim 48°58'N/8°20'E, 116 m
Worms 49°38'N/8°23'E, 91 m

Station	Jan.	Febr.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli
Colmar	30	23	26	32	52	70	69
Neuf-Brisach	35	27	33	41	55	89	79
Freiburg	63	56	56	65	85	117	107

Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr	Quotient Sommer/Winter
61	54	36	42	24	514	2,60
72	65	46	44	30	616	2,61
106	95	69	71	54	944	1,91

Tab. 1.47: Durchschnittliche Niederschlagssummen während des Bezugszeitraumes 1931–1960 im südlichen Oberrheingraben in Abhängigkeit von der Zonaldistanz zu den Vogesen (Angaben in mm; Stationsauswahl nach Datensammlungen von GARNIER 1966 sowie SCHIRMER & VENT-SCHMIDT 1979)

Stationspositionen: Freiburg/Botanischer Garten 48°01'N/7°52'E, 259 m
Colmar 48°04'N/7°22'E, 190 m
Neuf-Brisach 48°01'N/7°32'E, 195 m

Tab. A. 6: H⁺-Ionen- und Al³⁺-Ionenkonzentration in den Niederschlägen der Vogesen- und Schwarzwaldlagen.

Lage	H ⁺ -Ionen [µmol/l]	Al ³⁺ -Ionenkonzentration [mg/l]
Vogesenwestseite	6,7	0,4
Vogesenkamm	2,9	0,5
Vogesenostseite	2,1	0,3
Schwarzwaldwestseite	5,3	0,4
Schwarzwaldkamm	1,8	0,1
Schwarzwaldostseite	6,8	0,4

Tab. A. 7: Übersicht über die ausgewählten Wetterstationen in den Vogesen; Jahresniederschlagssumme eingeteilt in die verschiedenen Vogesenlagen, Daten: Meteo France.

Stationsname	Lage	Jahresniederschlagssumme/Jahr (Mittelwerte) [mm]
Baccarat	Westseite	1063mm
Badonviller	Westseite	1141mm
Aillevillers-et-Lyaumont	Westseite	1228mm
Faucogney-et-la-Mer	Westseite	1600mm
Fougerolles	Westseite	1619mm
Servance	Westseite	1971mm
Bains-les-Bains	Westseite	1529mm
Ban-de-Sapt	Westseite	1206mm
Brouvelieures	Westseite	1151mm
Chenimenil	Westseite	1243mm
Dogneville	Westseite	961mm
Fraize	Westseite	1291mm
Le Menil	Westseite	2244mm
Nomexy	Westseite	1019mm
Padoux	Westseite	1054mm
Provencheres-sur-Fave	Westseite	1294mm
Remirement	Westseite	1600mm
Roville-aux-Chenes	Westseite	893mm
Rupt-sur-Moselle	Westseite	2012mm
Siante-Marguerite	Westseite	1163mm
Saulxures-sur-Moselotte	Westseite	2080mm
Xertigny	Westseite	1302mm
Xonrupt-Longemer	Westseite	2004mm
Dabo	Kamm	1431mm
Nitting	Kamm	1092mm
Saint-Quirin	Kamm	1182mm
Kruth	Kamm	2050mm
Kruth	Kamm	2081mm
Mittlach	Kamm	2071mm
Wildenstein	Kamm	2213mm
Barr	Ostseite	771mm
Cosswiller	Ostseite	1062mm
Ebersheim	Ostseite	696mm
Le Hohwald	Ostseite	1310mm
Ottrot	Ostseite	939mm
Selestat	Ostseite	661mm
Ville	Ostseite	1026mm
Aubre	Ostseite	1174mm
Bergheim	Ostseite	706mm
Bitschwiller-les-Thann	Ostseite	1422mm
Breitenbach-Haut-Rhin	Ostseite	1311mm
Colmar	Ostseite	623mm
Geishouse	Ostseite	1396mm
Guebviller	Ostseite	992mm
Jebsheim	Ostseite	661mm
Kaysersberg	Ostseite	772mm

Interaktion von Böden und Quellgewässern

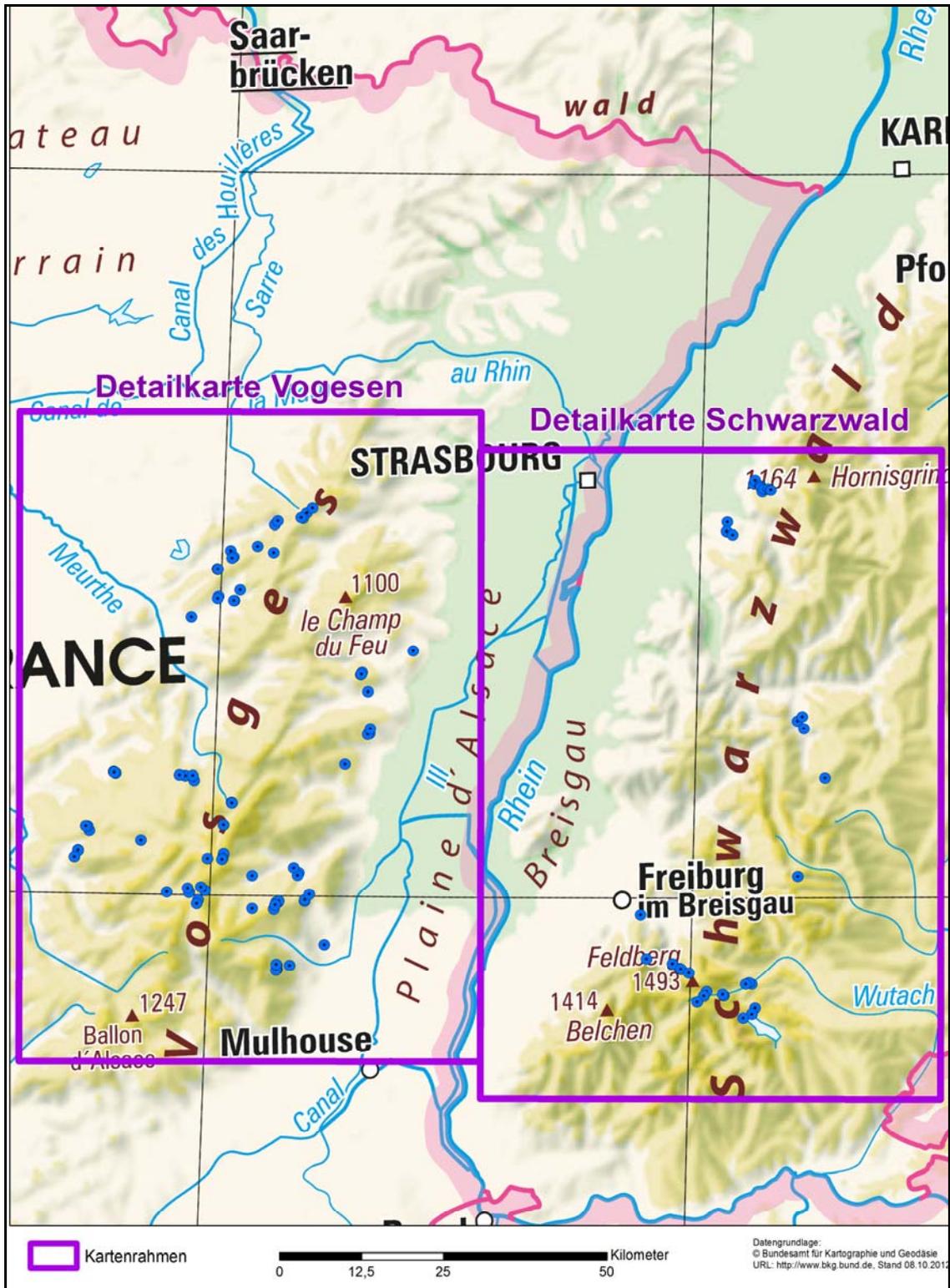
Stationsname	Lage	Jahresniederschlagssumme/Jahr (Mittelwerte) [mm]
Mulhouse	Ostseite	841mm
Oberentzen	Ostseite	677mm
Orbey	Ostseite	986mm
Orbey	Ostseite	1422mm
Ribeauvillé	Ostseite	1051mm
Ribeauvillé	Ostseite	748mm
Rouffach	Ostseite	690mm
Rouffach	Ostseite	648mm
Thann	Ostseite	1185mm
Turckheim	Ostseite	846mm

Tab. A. 8: Übersicht über die ausgewählten Wetterstationen im Schwarzwald; Jahresniederschlagssumme eingeteilt in die verschiedenen Schwarzwaldlagen, Daten: DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD).

Stationsname	Lage	Jahresniederschlagssumme/Jahr (Mittelwerte) [mm]
Feldberg/Schw. (Wewa)	Kamm	1909
Schauinsland	Kamm	1505
Hornisgrinde	Kamm	1931
Freiburg i. Breisgau (Awst)	Westseite	908,0
Freiburg i. Breisgau (Hauptbhf.)	Westseite	934
Freiburg i. Breisgau (Ebnet)	Westseite	1014
Freiburg i. Breisgau (Haslach)	Westseite	911
Freiburg i. Breisgau (Herdern)	Westseite	1000
Freiburg i. Breisgau (Mooswald)	Westseite	882
Freiburg i. Breisgau (Schlierberg)	Westseite	931
Oberkirch	Westseite	1146
Offenburg	Westseite	880
Haslach im Kinzigtal	Westseite	1084
Lahr/Schwarzwald	Westseite	810
Schluchsee	Ostseite	1503
Hinterzarten	Ostseite	1406
Titisee-N. - Titisee (Akkst.)	Ostseite	1329
Villingen-Schwenningen (Nst)	Ostseite	865
Villingen-Schwenningen	Ostseite	915
Sankt-Blasien	Ostseite	1702
Donaueschingen	Ostseite	819
Schramberg	Ostseite	1140
Schiltach	Ostseite	1388
Bonndorf/Schwarzwald	Ostseite	889
Königsfeld/Schwarzwald	Ostseite	1040

Übersicht über die Quell- und Bodendaten

Lage der Quellgewässer in Vogesen und Schwarzwald



Karte A. 1: Lageübersicht der Quellgewässer in Vogesen und Schwarzwald, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

Steckbriefe der Quellen

Vogesen

Tab. A. 9: Granitquellen der Vogesenwestseite.

Quell-Nr.	GPS-Daten	Höhe	Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]						Bemerkungen
	Breite+Länge		H ⁺ -Ionekonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
1	N 48 05 E 6 44	609m	2,1	14,6	0,6	5,1	5,0	1,2	gefasste Quelle
2	N 48 05 E 6 44	689m	6,7	1,7	0,5	1,2	1,8	0,9	gefasste Quelle
3	N 48 03 E 6 42	530m	8,4	2,6	0,4	1,1	0,7	1,2	ungefasste Quelle
4	N 48 03 E 6 42	530m	5,5	4,1	0,4	3,0	2,6	0,8	gefasste Quelle
5	N 48 03 E 6 42	530m	7,0	4,4	0,8	1,0	2,1	0,6	ungefasste Quelle
6	N 48 04 E 6 50	665m	5,2	2,5	0,3	1,2	1,7	1,0	gefasste Quelle
7	N 48 09 E 6 55	638m	2,2	5,7	0,6	2,1	2,9	0,9	gefasste Quelle
8	N 48 09 E 6 56	752m	0,8	4,3	0,5	1,2	1,9	1,1	gefasste Quelle
9	N 48 09 E 6 56	626m	1,5	4,5	1,0	2,1	2,9	0,9	gefasste Quelle
10	N 48 09 E 6 55	634m	3,3	4,4	0,6	1,9	2,7	0,9	gefasste Quelle
11	N 48 10 E 6 47	533m	1,8	3,9	0,3	1,3	3,0	0,9	gefasste Quelle
12	N 48 09 E 6 47	584m	2,0	3,1	0,3	1,4	2,9	2,2	gefasste Quelle
13	N 48 09 E 6 47	547m	2,5	3,3	0,2	1,8	3,4	1,9	gefasste Quelle
14	N 48 02 E 6 42	606m	11,5	2,3	0,2	1,4	2,7	0,8	ungefasste Quelle
15	N 48 05 E 6 43	631m	1,7	4,2	0,3	4,2	4,2	1,3	gefasste Quelle

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 10: Buntsandsteinquellen der Vogesenwestseite.

Quell-Nr.	GPS-Daten	Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]							Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
16	N 48 31 E 7 06	463m	0,5	1,5	1,0	5,5	9,8	0,9	gefasste Quelle
17	N 48 31 E 7 06	468m	0,2	1,5	0,9	13	13,7	1,1	ungefasste Quelle
18	N 48 31 E 7 06	518m	0,2	1,4	0,9	15,6	15,6	0,7	ungefasste Quelle
19	N 48 29 E 7 04	447m	0,1	2,2	1,4	21,5	19,5	1,2	ungefasste Quelle
20	N 48 28 E 7 00	372m	5,1	1,9	1,3	2,4	4,2	0,5	gefasste Quelle
21	N 48 28 E 7 01	392m	0,7	1,9	1,1	9,0	10,0	0,7	gefasste Quelle
22	N 48 28 E 7 00	420m	1,9	1,3	1,0	3,7	6,2	0,9	gefasste Quelle
23	N 48 27 E 6 59	430m	0,3	2,5	1,9	13,9	13,8	1,1	Ungefasste Quelle
24	N 48 27 E 6 59	434m	0,1	2,0	1,0	10,3	11,7	0,9	Ungefasste Quelle
25	N 48 27 E 6 59	436m	0,5	1,6	1,2	9,2	13,3	0,9	Ungefasste Quelle
26	N 48 23 E 6 56	362m	0,3	2,7	2,3	17,5	16,3	0,9	gefasste Quelle
27	N 48 24 E 6 59	415m	2,2	1,3	0,9	3,3	6,1	0,7	gefasste Quelle
28	N 48 24 E 6 59	394m	4,6	4,4	0,6	5,3	4,8	0,6	gefasste Quelle
29	N 48 25 E 7 02	399m	0,5	1,9	0,8	7,1	10,7	0,7	gefasste Quelle
30	N 48 24 E 7 01	462m	0,2	1,4	1,2	17,2	13,9	0,9	ungefasste Quelle
31	N 48 24 E 7 01	462m	0,3	1,7	1,2	20,6	16,6	1,1	ungefasste Quelle

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 11: Granitquellen des Vogesenkamms.

Quell-Nr.	GPS-Daten	Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]							Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
37	N 48 07 E 7 01	638m	2,6	5,1	0,5	2,8	4,0	0,8	gefasste Quelle
38	N 48 07 E 7 01	641m	2,7	4,7	0,4	2,8	4,7	0,7	gefasste Quelle
39	N 48 07 E 7 01	641m	2,3	5,0	0,6	3,0	4,5	0,5	gefasste Quelle
40	N 48 07 E 7 01	641m	2,5	4,7	0,4	2,9	4,5	0,8	gefasste Quelle
41	N 48 05 E 7 00	865m	5,0	2,4	0,2	2,6	1,9	0,5	gefasste Quelle
42	N 48 05 E 7 00	865m	3,5	2,3	0,3	1,7	2,1	0,5	gefasste Quelle
43	N 48 05 E 7 00	865m	1,7	2,6	0,3	1,2	2,4	0,8	gefasste Quelle,
44	N 48 03 E 7 00	1209m	1,7	3,9	0,2	2,3	3,0	0,8	gefasste Quelle
45	N 48 03 E 7 00	1237m	5,8	6,6	0,3	1,7	1,9	0,7	gefasste Quelle
46	N 48 02 E 7 00	1256m	4,6	1,5	0,2	0,7	1,5	0,7	gefasste Quelle
47	N 48 00 E 6 58	1202m	3,0	1,3	0,1	0,9	1,4	0,8	gefasste Quelle
48	N 48 00 E 6 58	1103m	16,4	1,9	0,1	0,6	1,2	1,0	ungefasste Quelle
49	N 48 00 E 6 56	957m	11,6	1,3	0,1	0,4	0,5	1,1	ungefasste Quelle
50	N 48 00 E 6 56	952m	19,9	1,8	0,1	0,5	1,0	1,1	ungefasste Quelle
51	N 48 02 E 6 58	933m	0,1	1,7	0,2	17,0	11,2	0,7	gefasste Quelle
52	N 48 00 E 6 56	798m	1,5	5,6	0,1	2,0	3,4	0,5	ungefasste Quelle
53	N 48 00 E 6 53	690m	9,9	1,3	0,1	0,4	1,2	0,8	gefasste Quelle,

Interaktion von Böden und Quellgewässern

54	N 47 59 E 6 57	719m	0,5	1,7	0,1	1,7	4,1	0,5	gefasste Quelle
55	N 47 59 E 6 57	662m	3,9	2,6	0,2	3,0	3,2	0,4	gefasste Quelle
56	N 47 58 E 7 07	1143m	0,8	1,6	0,9	3,4	4,4	0,8	gefasste Quelle
57	N 48 01 E 7 04	639m	1,0	3,9	0,6	2,8	4,5	0,5	gefasste Quelle
58	N 47 58 E 7 07	1149m	2,7	1,9	0,9	4,3	6,0	0,4	gefasste Quelle
59	N 47 59 E 7 07	1029m	1,3	2,3	0,4	3,4	4,4	1,0	gefasste Quelle
60	N 47 59 E 7 07	1054m	1,2	2,3	0,8	2,4	3,7	0,6	gefasste Quelle
61	N 47 59 E 7 07	1011m	0,7	2,6	0,7	2,5	3,4	0,9	gefasste Quelle
62	N 47 59 E 7 07	1126m	1,8	1,9	1,1	3,9	3,3	0,9	gefasste Quelle
63	N 47 59 E 7 07	1126m	1,6	2,0	0,8	14,9	4,5	0,8	gefasste Quelle
64	N 47 58 E 7 04	791m	1,1	3,3	0,5	3,0	5,3	0,5	gefasste Quelle

Tab. A. 12: Buntsandsteinquellen des Vogesenkamms.

Quell-Nr.	GPS-Daten		Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]						Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
32	N 48 28 E 7 06	763m	43,1	0,9	0,5	0,7	1,9	1,2	gefasste Quelle
33	N 48 32 E 7 10	803m	35,6	0,9	0,6	1,0	2,0	1,0	gefasste Quelle
34	N 48 31 E 7 09	646m	18,5	3,6	1,6	2,9	3,6	0,6	ungefasste Quelle
35	N 48 31 E 7 09	617m	1,1	18,4	2,2	6,4	7,1	0,8	ungefasste Quelle
36	N 48 32 E 7 10	652m	0,3	1,1	1,1	7,8	9,6	1,1	ungefasste Quelle

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 13: Granitquellen der Vogesenostseite.

Quell-Nr.	GPS-Daten		Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]						Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
71	N 47 53 E 7 07	839m	0,8	3,2	0,7	2,3	2,7	1,1	gefasste Quelle
72	N 47 53 E 7 07	847m	0,2	3,3	0,4	2,7	3,6	0,5	gefasste Quelle
73	N 47 54 E 7 07	820m	1,4	3,2	0,4	2,6	2,5	0,2	gefasste Quelle
74	N 47 53 E 7 0	859m	0,5	3,6	0,5	2,5	3,0	0,7	gefasste Quelle
75	N 47 54 E 7 07	889m	1,2	3,9	0,9	5,6	4,2	0,9	gefasste Quelle
76	N 47 54 E 7 09	549m	0,7	3,2	0,4	2,2	3,2	0,6	gefasste Quelle
77	N 47 59 E 7 10	624m	0,2	4,7	1,8	8,6	8,9	2,1	ungefasste Quelle
78	N 47 59 E 7 10	683m	0,2	6,4	0,7	13,4	12,1	1,5	ungefasste Quelle
79	N 48 00 E 7 11	686m	1,1	3,6	0,6	1,9	3,3	2,5	ungefasste Quelle
80	N 48 01 E 7 10	421m	2,0	5,1	0,5	3,4	4,9	1,0	gefasste Quelle
81	N 48 01 E 7 10	447m	0,2	7,5	1,1	16,2	12,3	1,9	ungefasste Quelle
82	N 48 02 E 7 09	379m	0,1	7,8	4,2	9,3	8,3	1,2	gefasste Quelle
83	N 48 13 E 7 18	417m	0,1	3,4	1,3	17,1	10,7	0,7	gefasste Quelle
84	N 48 13 E 7 18	470m	0,2	3,4	1,2	12,4	10,8	0,9	gefasste Quelle
85	N 48 14 E 7 18	486m	0,3	3,3	1,4	10,5	10,5	0,9	gefasste Quelle
86	N 48 20 E 7 23	351m	0,1	36,4	1,5	53,8	16,9	2,2	ungefasste Quelle

Tab. A. 14: Buntsandsteinquellen der Vogesenostseite.

Quell-Nr.	GPS-Daten		Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]						Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H^+ - Ionenkonz. (MW B.)	Na^+ - Ionenkonz. (MW B.)	K^+ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca^{2+} - Ionenkonz. (MW B.)	Mg^{2+} - Ionenkonz. (MW B.)	Al^{3+} - Ionenkonz. (MW B.)	
87	N 47 56 E 7 13	340m	0,3	2,6	1,3	5,4	3,9	0,7	ungefasste Quelle
65	N 47 56 E 7 13	341	1,7	2,5	0,5	6,4	8,9	1,1	Gefasste Quelle
67	N 48 17 E 7 18	468m	0,02	3,5	1,6	30,4	21,8	1,2	gefasste Quelle
68	N 48 18 E 7 17	411m	0,03	10,9	0,7	22,1	9,9	2,2	gefasste Quelle
69	N 48 18 E 7 17	433m	0,2	2,2	1,7	9,6	8,7	0,8	gefasste Quelle
70	N 48 18 E 7 17	421m	0,2	2,3	1,4	18,8	13,5	0,8	ungefasste Quelle

Schwarzwald

Tab. A. 15: Quellen der Schwarzwaldwestseite.

Quell-nr.	GPS-Daten	Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]							Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
108	N 48 34 E 8 05	339m	1,5	6,6	1,1	5,0	5,1	1,1	gefasste Quelle
109	N 48 34 E 8 05	345m	1,1	5,9	1,2	3,9	5,1	1,8	ungefasste Quelle
110	N 48 34 E 8 05	310m	0,2	5,1	3,2	17,5	10,0	0,9	gefasste Quelle
111	N 48 34 E 8 05	316m	0,7	6,2	4,2	15,0	14,1	0,6	gefasste Quelle
112	N 48 34 E 8 06	351m	0,8	21,9	1,5	7,8	7,4	1,7	ungefasste Quelle
113	N 48 34 E 8 06	378m	0,9	8,1	1,1	3,3	5,1	1,1	ungefasste Quelle
114	N 48 34 E 8 06	358m	0,1	8,3	0,7	9,2	7,5	0,7	gefasste Quelle
115	N 48 33 E 8 06	385m	0,5	4,3	0,6	2,1	2,9	0,7	gefasste Quelle
116	N 48 33 E 8 06	501m	1,6	3,9	0,3	2,9	2,9	0,8	gefasste Quelle
117	N 48 33 E 8 06	545m	2,2	4,7	0,5	3,7	3,7	0,8	gefasste Quelle
118	N 48 33 E 8 07	554m	1,7	4,6	0,3	2,8	2,8	0,7	gefasste Quelle
119	N 48 33 E 8 07	453m	2,7	4,3	0,5	1,7	1,7	1,1	ungefasste Quelle
120	N 48 33 E 8 07	452m	1,1	5,1	0,3	2,9	2,9	0,4	gefasste Quelle
121	N 48 31 E 8 02	228m	2,5	6,0	0,9	21,4	21,4	1,0	gefasste Quelle
122	N 48 30 E 8 02	278m	0,3	6,9	0,9	10,7	10,7	1,4	ungefasste Quelle
123	N 48 30 E 8 02	296m	0,9	5,7	0,7	3,4	3,4	1,2	ungefasste Quelle

Interaktion von Böden und Quellgewässern

124	N 48 29 E 8 02	286m	0,3	6,3	0,5	6,8	6,8	0,8	gefasste Quelle bei Langtritt
129	N 47 58 E 7 52	495m	0,2	4,6	0,8	6,4	6,4	1,0	gefasste Quelle bei Gasthof St. Valentin

Tab. A. 16: Quellen des Schwarzwaldkammes.

Quell-Nr.	GPS-Daten	Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]							Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Na ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	K ⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Mg ²⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	Al ³⁺ - Ionenkonz. (MW B.)	
130	N 47 54 E 7 53	1031m	1,1	2,3	0,3	2,7	3,5	0,9	ungefasste Quelle
88	N 47 53 E 7 57	741m	0,09	3,3	0,7	16,4	5,8	1,2	ungefasste Quelle
89	N 47 53 E 7 57	760m	0,04	3,6	0,3	31,8	27,7	0,9	gefasste Quelle
90	N 47 54 E 7 56	661m	0,07	3,3	1,0	9,8	8,1	0,5	gefasste Quelle
91	N 47 53 E 7 57	758m	0,03	5,2	0,4	45,9	31,9	0,7	gefasste Quelle
92	N 47 53 E 7 58	824m	0,6	3,0	0,3	3,1	3,3	0,7	gefasste Quelle
93	N 47 51 E 8 02	1253m	2,7	3,1	0,3	2,5	2,6	0,7	gefasste Quelle
94	N 47 51 E 8 02	1254m	2,6	2,8	0,2	1,6	2,2	0,8	ungefasste Quelle
95	N 47 51 E 8 02	1254m	3,4	2,8	0,3	1,7	2,2	0,7	ungefasste Quelle
96	N 47 51 E 8 02	1296m	3,1	2,9	0,2	2,2	2,6	1,0	gefasste Quelle
100	N 47 51 E 8 00	1106m	1,8	1,9	0,3	4,3	4,1	0,9	ungefasste Quelle
101	N 47 51 E 8 00	908m	0,4	8,3	0,5	13,9	4,3	1,4	ungefasste Quelle
102	N 47 51 E 8 00	900m	0,2	6,0	0,6	8,6	4,1	0,2	gefasste Quelle
103	N 47 50 E 7 59	835m	0,3	6,2	0,4	7,9	3,8	0,9	gefasste Quelle

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 17: Quellen der Schwarzwaldostseite.

Quell-Nr.	GPS-Daten		Wasserchemie [$\mu\text{mol/l}$, mg/l]						Bemerkungen
	Breite+Länge	Höhe	H^+ - Ionenkonz. (MW B.)	Na^+ - Ionenkonz. (MW B.)	K^+ - Ionenkonz. (MW B.)	Ca^{2+} - Ionenkonz. (MW B.)	Mg^{2+} - Ionenkonz. (MW B.)	Al^{3+} - Ionenkonz. (MW B.)	
125	N 48 14 E 8 11	438m	1,0	7,7	0,4	9,5	7,2	0,9	gefasste Quelle
126	N 48 14 E 8 11	358m	0,5	6,4	0,6	2,5	5,1	3,1	ungefasste Quelle
127	N 48 13 E 8 12	382m	2,1	4,2	0,8	3,0	4,0	0,7	gefasste Quelle
128	N 48 09 E 8 14	590m	0,1	5,1	1,0	5,8	7,4	0,4	gefasste Quelle
97	N 47 52 E 8 05	935m	0,2	23,5	0,8	13,9	5,6	1,7	gefasste Quelle
98	N 47 52 E 8 05	898m	3,9	7,7	0,4	5,3	3,1	0,6	gefasste Quelle
99	N 47 52 E 8 05	903m	0,1	22,8	0,6	28,1	6,0	1,0	gefasste Quelle
104	N 47 50 E 8 06	975m	5,4	1,6	0,3	2,1	2,6	0,4	gefasste Quelle
105	N 47 49 E 8 06	1029m	5,6	2,6	0,2	1,2	1,6	0,6	gefasste Quelle
106	N 47 49 E 8 04	1089m	3,6	17,6	0,4	2,6	2,6	0,9	ungefasste Quelle
107	N 48 01 E 8 11	999m	0,9	3,0	0,4	4,3	5,6	0,7	gefasste Quelle

Steckbriefe der Bodenstandorte

Vogesen

Tab. A. 18: Bodeneigenschaften der Granitstandorte an der Vogesenwestseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
A	6	4,9	4,9	1,4	26,3	5,5	7,8	58,4
BI	1	37,7	2,2	1,1	8	1,6	9,8	36,6
BII	2	130,0	3,4	1	5,3	1,8	27,4	22,5
BIII	2	51,8	1,7	1,1	6,8	1,5	34,9	22,5
CI	3,4,5	93,6	3,1	1,1	9,7	2	32,7	28,6
CII	3,4,5	49,4	2,6	1,4	18,4	2,6	27,7	28,6
CIII	3	212,4	3,5	1,1	5,6	1,8	41,6	28,6
D	10	17,3	1,7	1,3	4,8	1,6	22,6	21,6
E	7	30,0	1,0	0,2	2,4	1,2	17,2	9,5
FI	8,9	167,4	2,5	1,1	4,3	3,8	54,6	14,8
FII	8,9	41,1	1,7	1,2	2,7	6,3	30,3	14,8
GI	12,13	108,9	1,4	0,7	6,1	2,4	26,8	12,2
GII	12,13	152,7	2,7	1,1	3,5	3,7	26,2	12,2
GIII	11	34,5	2,0	0,9	2,7	3,1	23,1	20,8
U	14	33,1	2,6	0,3	3,1	2,2	25,6	16,1
AY	15	34,1	3,8	1,1	32	33,7	69,9	75,4

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 19: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte an der Vogesenwestseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
V	23,24,25	28,7	1,7	0,6	5,2	4,9	1,9	25,1
W	18	42,8	2,4	0,4	3,7	2,1	6,4	24,6
AV	21,22	36,3	3,5	0	11,5	14,3	6,7	72,7
AW	26	98,6	3,5	0	11,5	14,9	5,6	52,9
BR	16,17	26,9	2,9	0,9	20,9	11,4	11,5	71,2
BS	27	40,5	2,9	0,7	14,5	13,7	18,8	24,6
BX	20	49,7	2,9	0,6	14	10,4	11,2	48,6
CP	29	115,9	3,3	1,2	29	20,8	8,9	16,0
BY	28	13,8	1,3	0,8	3,7	2,7	22,0	76,6

Tab. A. 20: Bodeneigenschaften der Granitstandorte am Vogesenkamm.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
AD	51	14,0	2,1	0,9	31,3	24,1	12,2	79,5
AE	64	6,0	2,1	1	42,2	18,7	9,5	32,6
AK	44	66,7	2,2	0,5	4,7	7,9	25,3	34,3
AZ	45,46	106,2	3,8	0,6	14,4	18	25,8	55,3
BC	47,48	41,7	4,5	0,5	14,6	22,3	45,2	38,3
BD	56,58	43,3	4,5	0,6	14,9	20,3	40,8	38,3
BW I	37,38,39,40	73,4	3,1	0,7	14,8	12,3	23,2	53,6
CE	41,42,43	173,3	2,3	0,8	8,3	5,8	54,2	20,2
CF	49,50	123,2	2,4	0,8	9,6	4,5	36,3	20,2
CG	54	76,4	3,1	1,1	19,7	8,7	36,7	40,0
CI	55	99,6	2,5	0,8	13,9	5,4	38,2	30,3
CJ	52	124,2	2,7	0,6	7,9	4,4	29,1	32,6
CK	53	184,3	2,7	0,7	7,1	4,6	37,6	17,7
CS	62,63	45,4	1,2	0,8	3,3	2,8	42,6	17,7
CT	59,60,61	29,1	1,1	0,7	2,1	2,4	25,5	16,3
CU	57	17,9	0,8	0,6	4	2,7	15,9	19,3

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 21: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte am Vogesenkamm.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
AH I	32	70,4	2,2	0,3	3,6	4,9	22,9	20,0
AH II	32	105,2	1,8	0,4	1,8	6,7	16,8	20,0
AI	33	38,5	1,9	0,4	2,5	5,5	12,1	29,7
AJ	34	165,2	1,9	0,5	3,7	7,9	33,7	26,8
AU	35	51,5	3,8	0,3	18,5	20,1	13,8	71,5
AX	36	31,2	3,0	0	14,3	16,8	5,9	80,6

Tab. A. 22: Bodeneigenschaften der Granitstandorte an der Vogesenostseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
J	86	7,8	16,7	1,6	74,6	19,2	6,6	90,6
P	71,72	21,0	2,2	0,4	5,5	3,4	5,6	34,4
S	85	56,9	2,9	0,4	8	4,6	14,5	38,7
T	82	9,6	3,3	1,1	35,3	14	3,6	65,6
AL	74	30,1	1,9	0,3	7,9	7,4	21,0	31,6
AO	83	4,5	1,9	1,6	54,2	24,7	4,6	57,9
BE	75,76	24,5	3,8	0,5	22,2	22,5	27,3	57,9
BH	84	5,5	4,2	0,6	41,6	29,5	7,0	86,0
BP	79	74,5	4,1	0,1	17	18,2	28,1	19,4
BQ	78	22,7	4,4	0,8	37,5	31,6	29,9	43,5
BV	80,81	35,2	2,9	0,9	31,1	18,5	11,7	85,7
BZ	77	10,5	3,5	1	36,4	15,2	4,0	85,7
CQ	73	25,5	1,9	0,9	9,7	3,7	23,1	24,3

Tab. A. 23: Bodeneigenschaften der Buntsandsteinstandorte an der Vogesenostseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
AN	67	9,3	1,8	1	24,1	28	5,6	84,5
BG	68,69	28,4	3,9	0,4	13,1	17	15,9	52,0
BU	66	10,3	3,2	2,4	37,7	28,8	8,3	86,8
CA	70	45,0	2,5	0,8	12,1	7,8	10,2	62,8

Schwarzwald

Tab. A. 24: Bodeneigenschaften der Standorte an der Schwarzwaldwestseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
K	108,109	4,5	17,7	3,3	57,7	9,3	14,2	78,2
L	118	4,6	16,8	5,3	35,5	8,2	11,0	77,8
Z	112,113,114	4,6	2,5	0,7	5,8	7,9	35,1	31,1
AB	119,120	4,5	2,3	0,4	4,4	8,3	36,7	27,2
AC	121, 122,123	5,1	2,1	0,8	23,7	19,1	12,1	72,4
AP	115	4,5	2,6	0,5	14,3	15,8	15,0	54,3
AR	129	4,8	2,6	0,9	16,8	24,2	14,6	66,3
BI	116,117	4,4	4,3	0,4	15,4	22,6	60,9	40,6
CB	124	4,6	2,6	1,1	15,6	6,1	21,4	41,6
CR	110,111	4,8	1,6	2	17,3	4,4	23,8	32,1

Interaktion von Böden und Quellgewässern

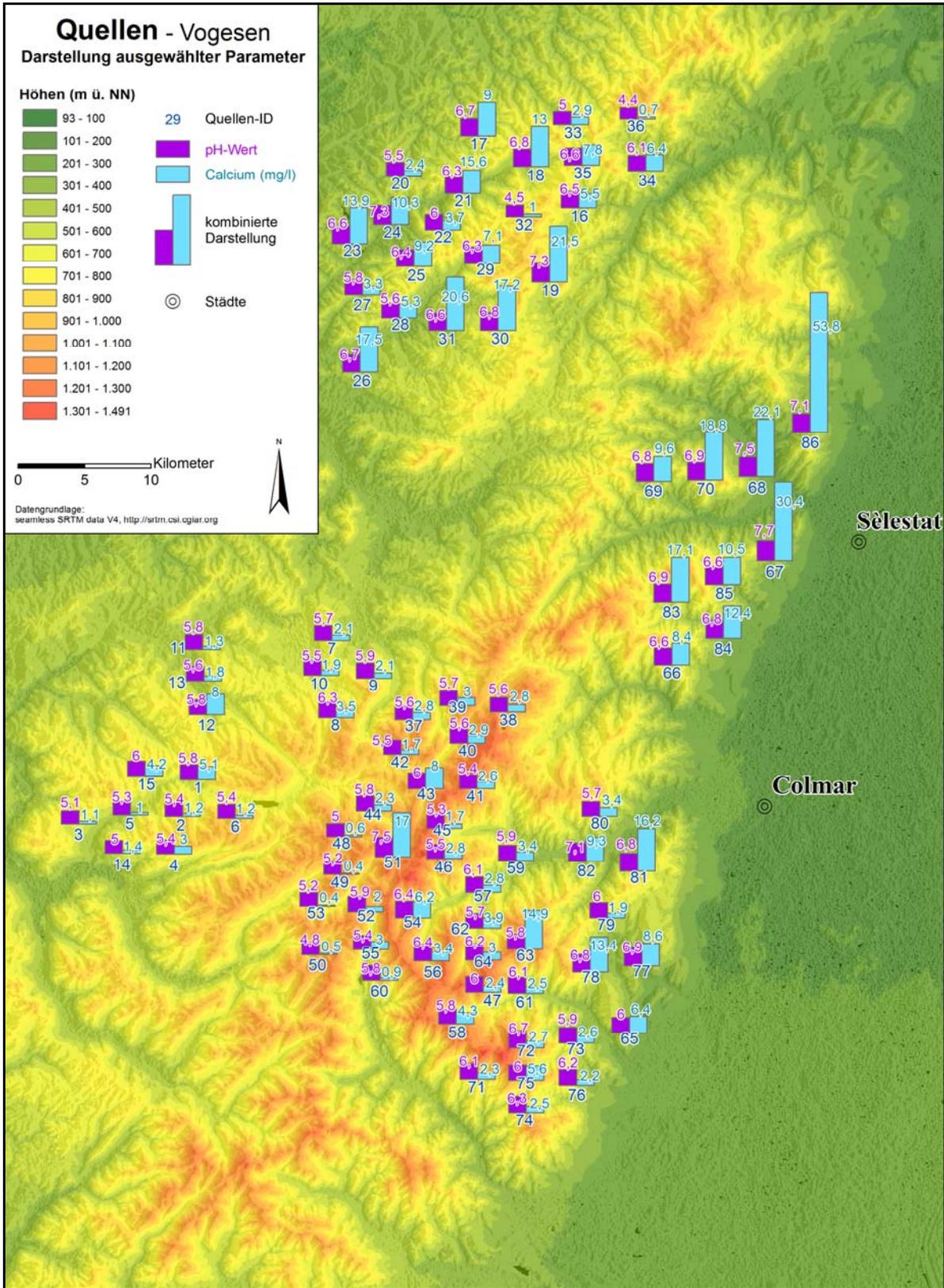
Tab. A. 25: Bodeneigenschaften der Standorte am Schwarzwaldkamm.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
O	90	4,9	2,5	0,7	45,9	5,6	7,3	61,2
AF	88, 89,91	4,7	2,1	0,8	13,0	8,9	29,7	42,7
AT	96	3,3	4,6	0,6	26,8	24,8	35,1	51,7
BK	92	4,7	3,7	1,6	23,0	14,9	45,5	32
CD	100	4,8	2,6	0,8	17,5	9,5	11,6	40,9
CM	96	3,9	1,4	2	6,7	5,0	55,3	14,1
CN	93,94,95	3,9	1,4	1,4	8,8	5,7	52,7	16,9
N	103	4,6	2,5	1,5	10,1	5,0	12,2	27,7
AS	130	3,8	4	0,4	14,7	19,9	27,1	44
BL	101,102	5,5	4	2,3	107,1	17,1	12,1	89,6
CC	130	4	2,8	1	9,1	6,5	39,7	30,6

Tab. A. 26: Bodeneigenschaften der Standorte an der Schwarzwaldostseite.

Standortnummer	Zuordnung Quelle	Bodenchemie [$\mu\text{mol/l}$, meq/kg]						
		H^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Na^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	K^+ -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Ca^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Mg^{2+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Al^{3+} -Ionenkonz. (MW 0-100cm)	Basensättigung (MW 0-100cm)
M	125,126	4,4	16,5	4,5	27,6	4,8	14,1	67,3
AG	106	5,3	3,8	0,8	14,7	9,8	11,5	64,7
BJ	127	5,3	4,1	0,7	27,4	37,9	36,9	57,5
BM	99	4,9	3,8	0,8	27,4	12,6	16,2	70,2
CL	128	4,3	2,7	1	18,2	7,3	30,7	36,1
CO	104	4,5	1,5	0,9	5,0	3,1	29,3	17,5
CV	105	4,6	0,9	0,8	4,3	2,5	22,8	14,2
CW	97	4,5	0,9	0,9	5,0	3,9	50,7	10,3
CX	98	4,7	4,5	0,8	18,6	3,7	42,9	31,4
CY	107	4,5	1,4	1,1	7,6	5,7	32,0	16

Quell- und Bodendaten in Abhängigkeit des Reliefs



Karte A. 2: pH-Werte und Ca²⁺-Ionenkonzentration der Vogesenquellen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

Tab. A. 27: Übersicht über die Quellwerte in den verschiedenen Vogesenlagen (Mittelwerte).

	H ⁺ -Ionenkonzentration (µmol/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)
Vog.WS_GR	3,9	4,8	0,5	2,7	2,8	1,1
Vog.K_GR	3,5	2,9	0,4	4	3,6	0,7
Vog.OS_GR	0,5	10,8	1,2	14,8	12,1	1,2
Vog.WS_BS	0,9	5,7	1,3	15,3	11,4	0,9
Vog.K_BS	20,0	5,7	1,3	3,7	4,7	0,9
Vog.OS_BS	0,2	3,9	2,3	21,5	18,5	1,5

Tab. A. 28: Übersicht über die Quellwerte in den verschiedenen Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

	H ⁺ -Ionenmenge (µmol/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)
Schw.WS	1,1	6,7	1	6,6	5,9	1
Schw.K	1,1	3,9	0,4	10,9	7,9	0,8
Schw.OS	2,2	8,7	0,5	7,1	4,6	1

Tab. A. 29: H⁺- Ionenmenge (µmol/l) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	146,2	82,3	58,8	45,2	43,7
Vog.K_GR	150,5	47,5	48,2	35,4	32,0
Vog.OS_GR	41,4	30,9	23,3	15,0	13,9
Vog.WS_BS	85,7	36,7	23,6	20,6	21,1
Vog.K_BS	139,7	92,6	84,8	36,1	31,8
Vog.OS_BS	43,9	26,6	15,8	18,4	14,4

Tab. A. 30: Al³⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	23,1	17,2	101,7	5,4	6,4
Vog.K_GR	47,6	42,4	27,9	16,7	16,1
Vog.OS_GR	17,3	20,2	13,5	10,5	7,8
Vog.WS_BS	16,8	13,5	8,9	7	5,9
Vog.K_BS	19,6	18,8	19,6	16,5	13,2
Vog.OS_BS	8,4	7,5	5,9	5,9	6,1

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 31: K⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	2,1	1,1	0,7	0,5	0,6
Vog.K_GR	1,2	1,0	0,7	0,4	0,4
Vog.OS_GR	1,3	0,8	0,8	0,6	0,7
Vog.WS_BS	1	0,5	0,4	0,5	0,5
Vog.K_BS	0,6	0,3	0,3	0,23	0,2
Vog.OS_BS	1,5	1,0	0,9	1,0	1,2

Tab. A. 32: Na⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	2,9	2,5	2,5	2,4	2,5
Vog.K_GR	2,8	2,6	2,5	2,4	2,6
Vog.OS_GR	4	4,1	4,2	4	4,3
Vog.WS_BS	3	3	3,1	3	3
Vog.K_BS	2,6	2,5	2,2	2,6	2,3
Vog.OS_BS	2,7	2,8	3	3	3

Tab. A. 33: Ca²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	14,2	6,5	7,1	8	7,8
Vog.K_GR	20,6	15,5	12,2	10,5	11,9
Vog.OS_GR	42,2	31,6	26,3	26,8	32
Vog.WS_BS	26,8	18	17,9	18,8	21
Vog.K_BS	11,5	7,5	5,5	6,7	5,8
Vog.OS_BS	27,2	21,9	20,5	22,6	27,9

Tab. A. 34: Mg²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Vogesenlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Vog.WS_GR	6,9	3,7	3,8	4,9	4,5
Vog.K_GR	13,7	11,2	9,1	8	9,6
Vog.OS_GR	19,2	16,4	15,2	15,8	17,3
Vog.WS_BS	15	13,5	13,8	14,9	16,5
Vog.K_BS	13,2	11,3	8,5	9,8	8,9
Vog.OS_BS	14	10,7	12,3	15,4	17,2

Tab. A. 35: H⁺- Ionenmenge (µmol/l) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	50,9	39,4	24,8	19,5	17,2
Schw.K	217,1	195,3	98,0	74,2	51,2
Schw.OS	54,9	39,0	29,5	18,1	17,8

Tab. A. 36: Al³⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	31,5	27,8	21,3	21	20,7
Schw.K	42,5	41,8	28,3	19,6	14,5
Schw.OS	43,6	36,7	27,7	19,1	16,5

Tab. A. 37: K⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	2	1,3	1,5	1,5	1,4
Schw.K	2,8	1,4	0,7	0,5	0,3
Schw.OS	1,8	1,3	1,1	1	1,1

Tab. A. 38: Na⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	5,3	5,1	5,8	5,6	5,7
Schw.K	3,2	3	2,9	2,8	2,4
Schw.OS	3,7	3,8	4,3	4,4	3,8

Tab. A. 39: Ca²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	30	16,6	16,7	19	21,1
Schw.K	49,3	20,2	27,3	18,4	5,9
Schw.OS	26,6	16,2	12,6	11,8	10,7

Tab. A. 40: Mg²⁺-Ionenkonzentration (meq/kg Boden) in den verschiedenen Bodentiefen der Schwarzwaldlagen (Mittelwerte).

Lage	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm
Schw.WS	16	10,8	9,6	12,8	13,9
Schw.K	17,6	11,9	9,6	8,4	6,6
Schw.OS	15	10,3	7	7,1	6,3

Quell- und Bodendaten in Abhängigkeit der Geologie

Tab. A. 41: Übersicht über die Quellwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen (Mittelwerte).

	H ⁺ -Ionenmenge (µmol/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)
Vog.WS_GR	3,9	4,8	0,5	2,7	2,8	1,1
Vog.WS_BS	0,9	5,7	1,3	15,3	11,4	0,9
Vog.K_GR	3,6	2,9	0,4	4,0	3,6	0,7
Vog.K_BS	19,6	5,7	1,3	3,7	4,7	0,9
Vog.OS_GR	0,5	10,8	1,2	14,4	12,1	1,2
Vog.OS_BS	0,2	3,9	2,3	21,5	18,5	1,5

Tab. A. 42: Übersicht über die Bodenwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen in 0-20cm Bodentiefe (Mittelwerte).

Lage/Geologie	H ⁺ -Ionenmenge (µmol/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)
Vog.WS_BS	85,7	3,0	2,1	14,2	6,9	23,1
Vog.WS_GR	146,2	2,9	1,0	26,8	15	16,8
Vog.K_BS	139,7	2,6	1,2	20,6	13,7	47,6
Vog.K_GR	150,5	2,8	0,6	11,5	13,2	19,6
Vog.OS_BS	43,9	2,7	1,3	42,2	19,2	17,3
Vog.OS_GR	41,4	4,0	1,5	27,2	14	8,4

Tab. A. 43: Übersicht über die Bodenwerte in Abhängigkeit der Geologie in den verschiedenen Vogesenlagen in 80-100cm Bodentiefe (Mittelwerte).

Lage/Geologie	H ⁺ -Ionenmenge (µmol/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Al ³⁺ (mg/l)
Vog.WS_BS	21,1	3,0	0,7	7,8	4,5	6,5
Vog.WS_GR	43,8	2,5	0,5	21	16,5	5,9
Vog.K_BS	31,8	2,3	0,4	11,9	9,6	16,1
Vog.K_GR	32,0	2,6	0,2	5,8	8,9	13,2
Vog.OS_BS	14,4	3,0	0,7	32	17,3	7,8
Vog.OS_GR	13,9	4,3	1,2	27,9	17,2	6,1

Kalkungsmaßnahmen

Tab. A. 44: Einschätzung der Kalkungsbedürftigkeit der Vogesenstandorte aufgrund des pH-Wertes KCl, der Ca+Mg-Sättigung und des Ca/Al-Molverhältnisses.

Standortnummer	Lage/Geologie	pH_Wert KCl [MW 0-100cm]	Ca+Mg-Sättigung [%]	Ca/Al [mmol]
B I	WS/GR	4,1	16	1,2
B II, BIII	WS/GR	4	15	0,3
C I, CII, CIII	WS/GR	3,9	22,2	0,4
A	WS/GR	4,3	48,4	5,1
E	WS/GR	4,1	7,2	0,1
FI	WS/GR	3,5	10,3	0,1
D	WS/GR	4,2	14,3	0,3
GIII	WS/GR	3,9	12,6	0,1
GI, GII	WS/GR	3,7	8,5	0,3
U	WS/GR	4	10,4	0,1
AY	WS/GR	3,9	69,3	0,7
BR	WS/BS	4,1	45,1	2,7
W	WS/BS	3,9	16,1	0,9
BX	WS/BS	3,8	42,9	1,9
AV	WS/BS	3,9	50,2	2,5
V	WS/BS	3,8	20,5	4,0
AW	WS/BS	3,7	46,7	3,1
BS	WS/BS	3,8	43,9	1,2
BY	WS/BS	3,9	70,3	4,9
CP	WS/BS	4	11,7	0,3
BW I	Kamm/GR	3,7	46,5	0,9
CE	Kamm/GR	3,7	16,4	0,3
AK	Kamm/GR	3,7	27,7	0,3
AZ	Kamm/GR	3,6	48,5	0,9
BC	Kamm/GR	3,8	33,3	0,6
CF	Kamm/GR	3,9	22,8	0,4
AD	Kamm/GR	3,9	75,4	3,9
CJ	Kamm/GR	3,8	25,8	0,4
CK	Kamm/GR	3,7	13,7	0,3
CG	Kamm/GR	4	34,8	0,7
CI	Kamm/GR	3,9	25,4	0,6
BD	Kamm/GR	3,6	35	0,4
CU	Kamm/GR	4,2	15,4	0,4
CT	Kamm/GR	4,1	10,2	0,1
CS	Kamm/GR	3,9	14,2	0,1
AE	Kamm/GR	4,3	78	6,6
AI	Kamm/BS	3,9	23	0,3

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Standortnummer	Lage/Geologie	pH_Wert KCl [MW 0-100cm]	Ca+Mg-Sättigung [%]	Ca/Al [mmol]
AJ	Kamm/BS	3,3	22,2	0,1
AU	Kamm/BS	3,9	64	1,9
AX	Kamm/BS	3,9	73,5	3,6
AH I, AH II	Kamm/BS	3,5	15,5	0,1
P	OS/GR	4,1	23,7	1,5
AL	OS/GR	3,9	27,2	0,6
BE	OS/GR	3,8	52,3	1,2
BZ	OS/GR	4,4	78,6	13,6
BQ	OS/GR	3,9	40,4	1,9
BP	OS/GR	3,6	15,8	0,9
BV	OS/GR	3,8	72,3	4,0
T	OS/GR	3,8	60,2	14,7
AO	OS/GR	4,3	87,2	17,7
BH	OS/GR	4,1	80,4	8,8
S	OS/GR	3,5	30,3	0,9
J	OS/GR	4	75,6	16,9
BU	OS/BS	4,1	80	6,7
AN	OS/BS	3,9	79,2	6,4
BG	OS/BS	3,9	45,5	1,2
CA	OS/BS	4	53,9	1,8
CQ	OS/BS	4	19,9	0,6
BE	OS/BS	3,8	52,3	1,2

Rot: Kriterium für dringende Kalkungsbedürftigkeit erfüllt

Blau: Kriterium für Kalkungsbedürftigkeit erfüllt

Schwarz: Kriterium für Kalkungsbedürftigkeit nicht erfüllt

Zusammenhänge zwischen chemischen Parametern in beiden Umweltmedien

Tab. A. 45: Korrelationen zwischen den chemischen Parametern in den beiden Umweltmedien.

	Vogesen		Schwarzwald	
	Quellen	Boden	Quellen	Boden
Korrelation H⁺-Ionen-/Ca²⁺-Ionenkonzentration	-0,79	-0,33 - -0,41	-0,73	-0,16 - -0,39
Korrelation H⁺-Ionen-/Mg²⁺-Ionenkonzentration	-0,79	-0,19 - -0,41	-0,74	0,02 - -0,17
Korrelation Ca²⁺-/Mg²⁺-Ionenkonzentration	0,94	0,69 - 0,82	0,87	0,34 - 0,52

Effektive Austauschkapazität ($KAK_{eff.}$)

Anteile der verschiedenen Elemente an der $KAK_{eff.}$

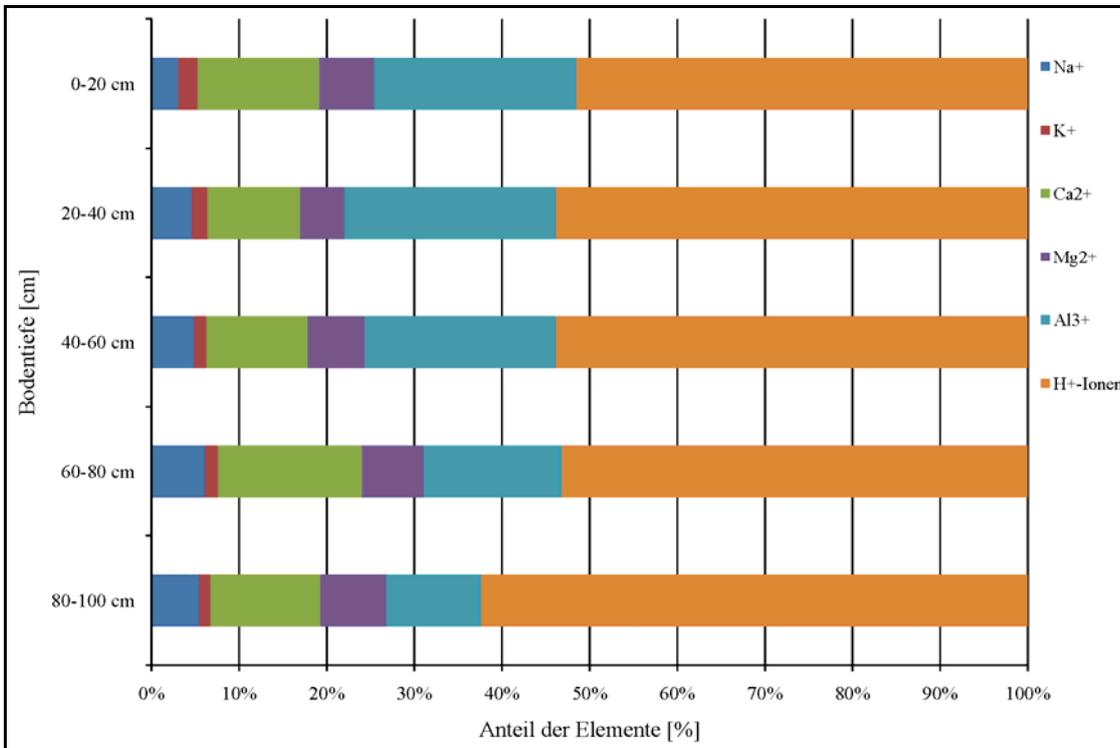


Abb. A. 1: Anteil der Elemente an der $KAK_{eff.}$ in den Granitböden der Vogesenwestseite

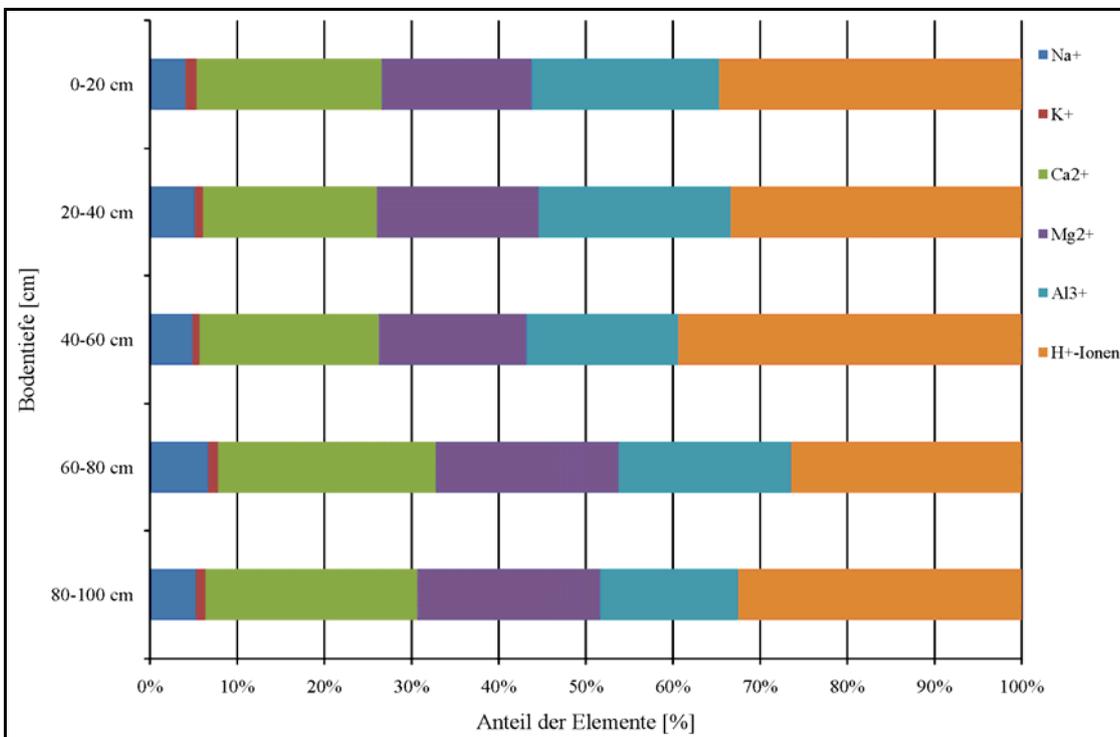


Abb. A. 2: Anteil der Elemente an der $KAK_{eff.}$ in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.

Interaktion von Böden und Quellgewässern

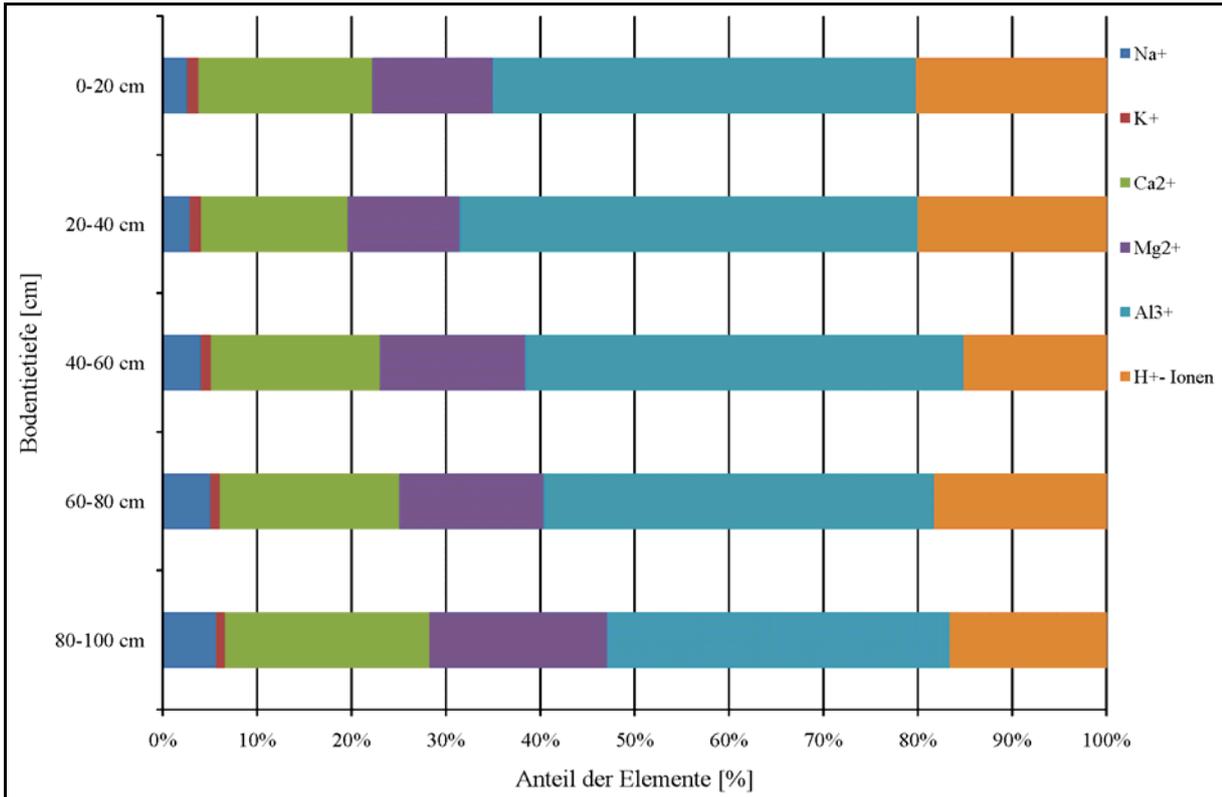


Abb. A. 3: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden des Vogesenkammes.

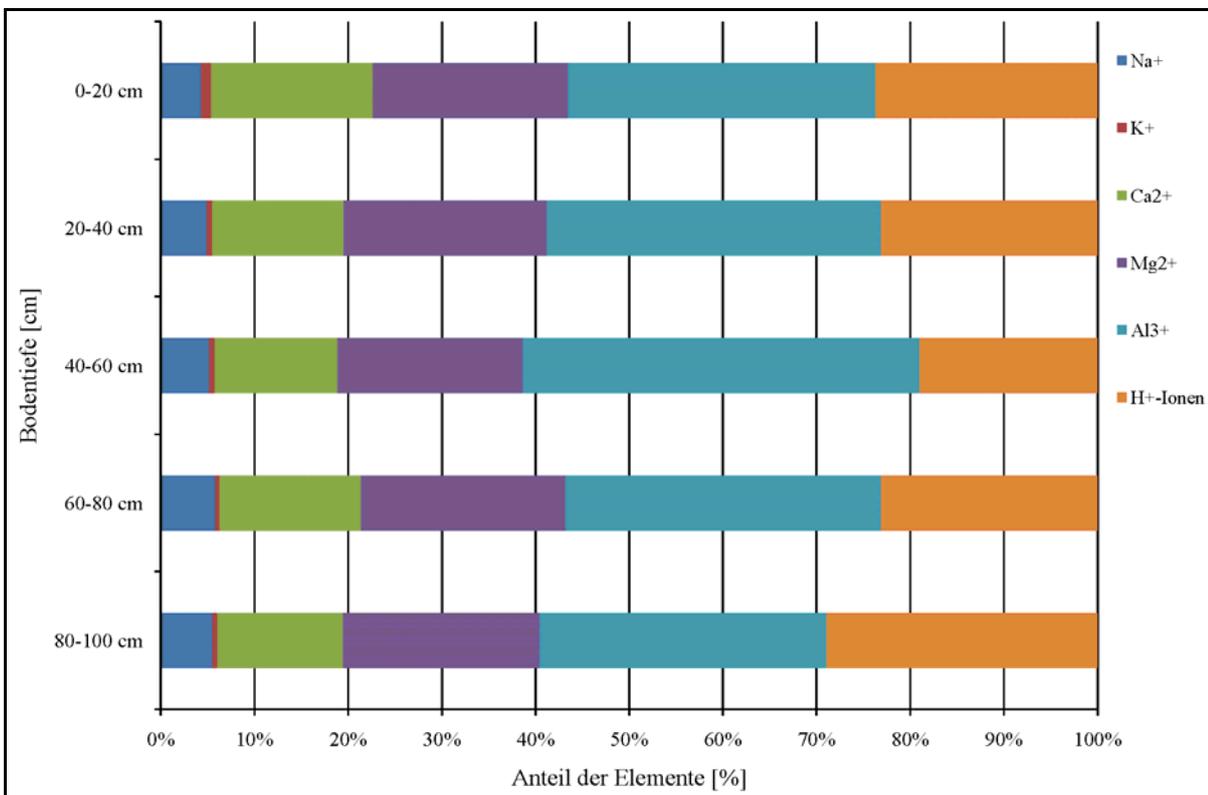


Abb. A. 4: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.

Interaktion von Böden und Quellgewässern

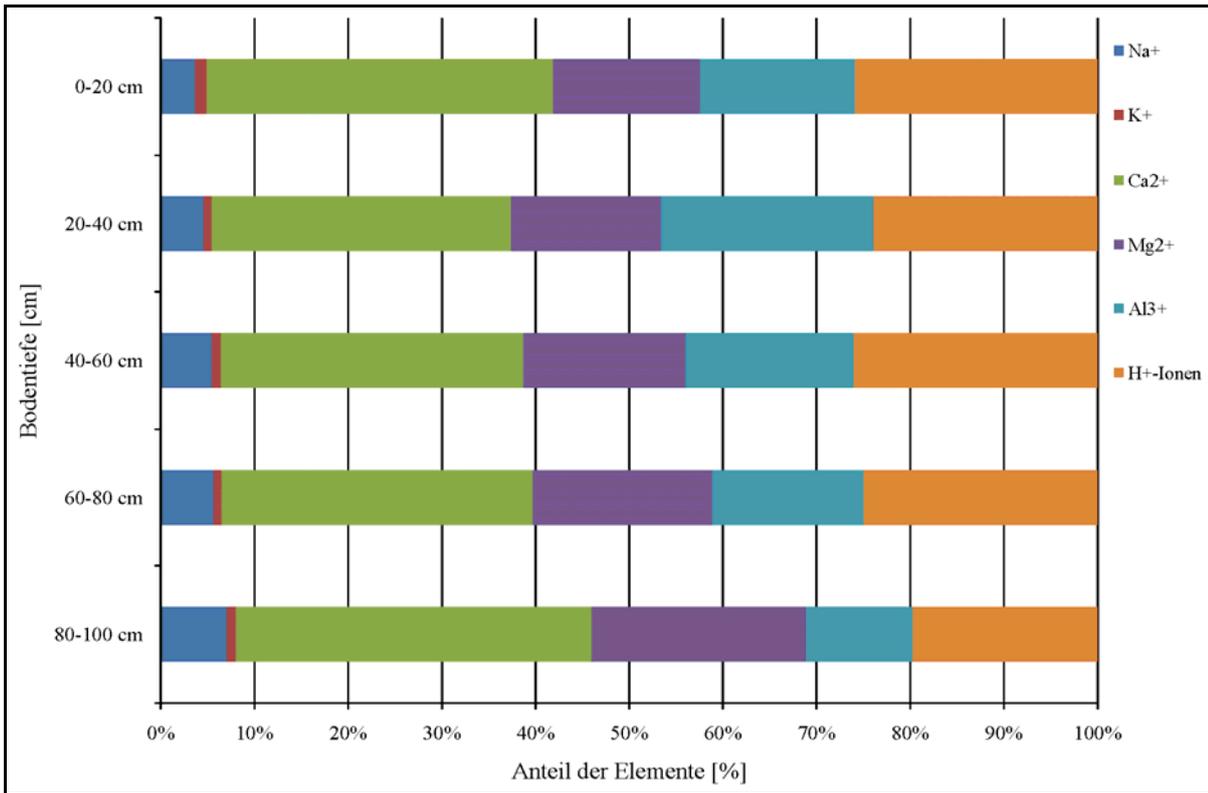


Abb. A. 5: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Vogesenostseite

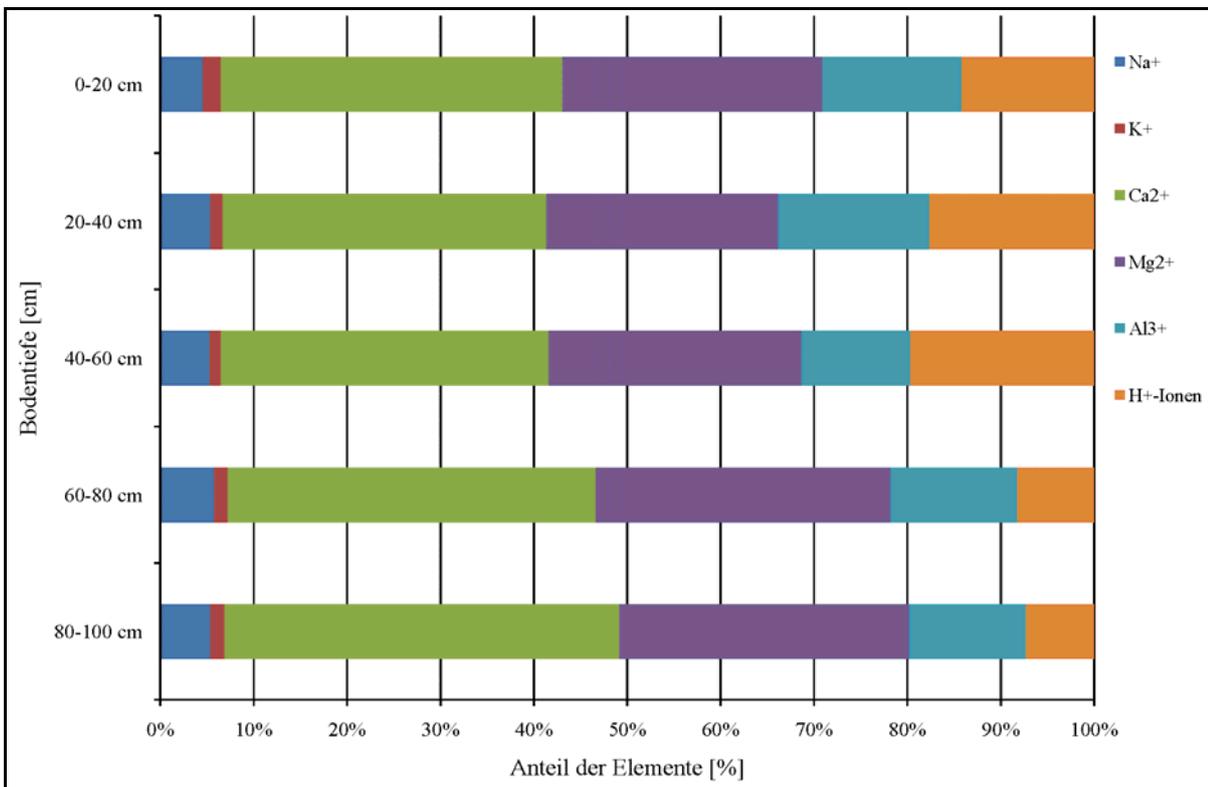


Abb. A. 6: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.

Interaktion von Böden und Quellgewässern

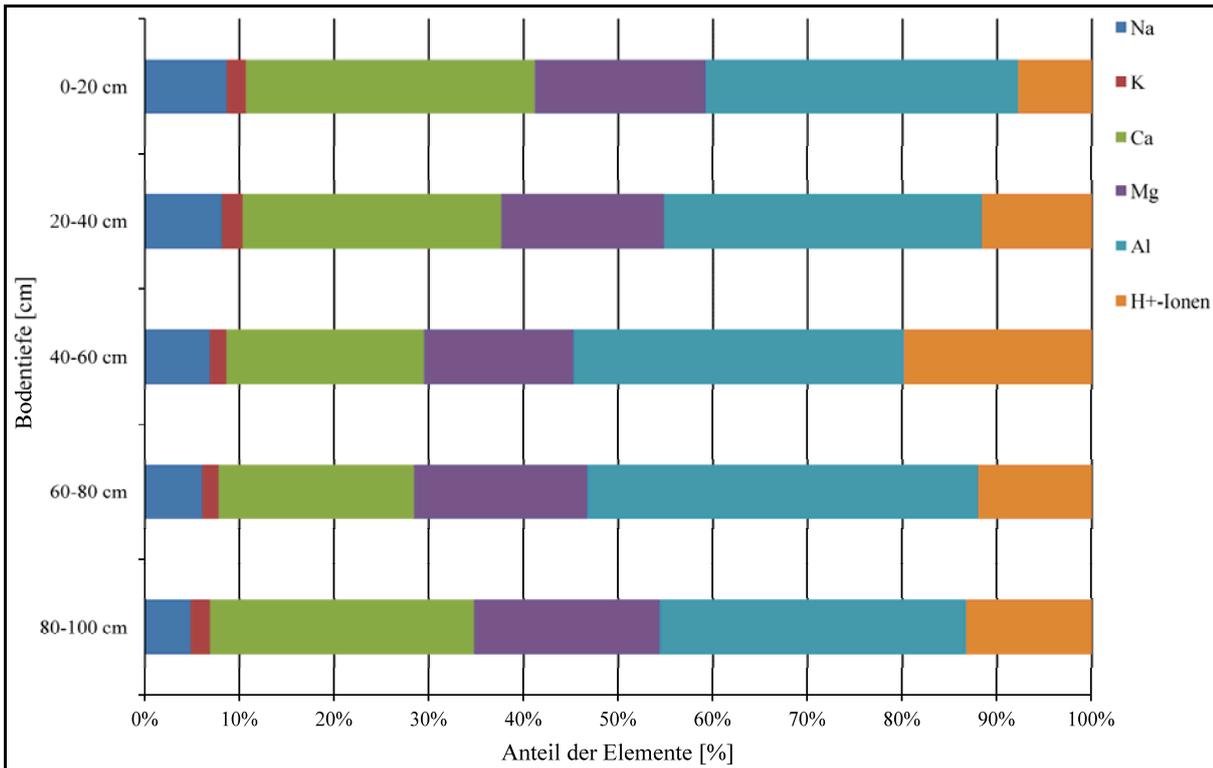


Abb. A. 7: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Schwarzwaldwestseite.

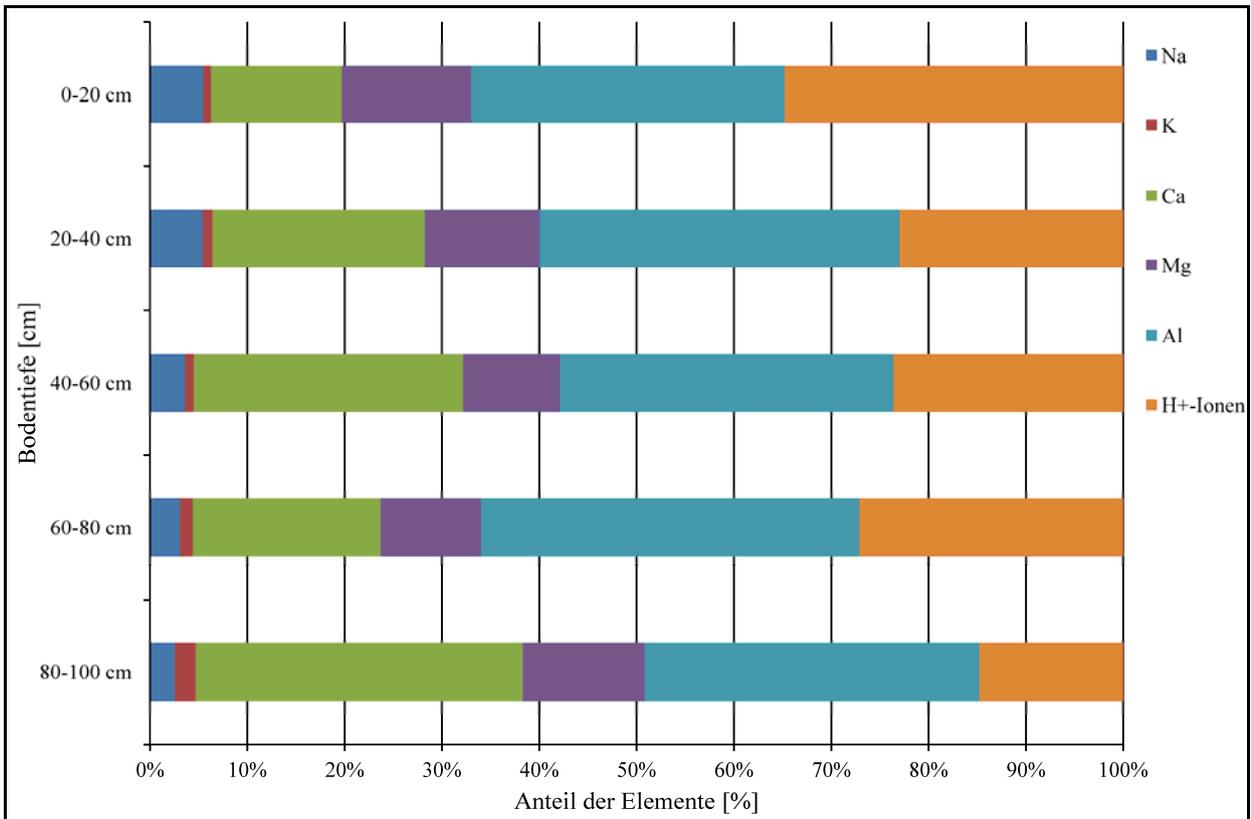


Abb. A. 8: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden des Schwarzwaldkammes.

Interaktion von Böden und Quellgewässern

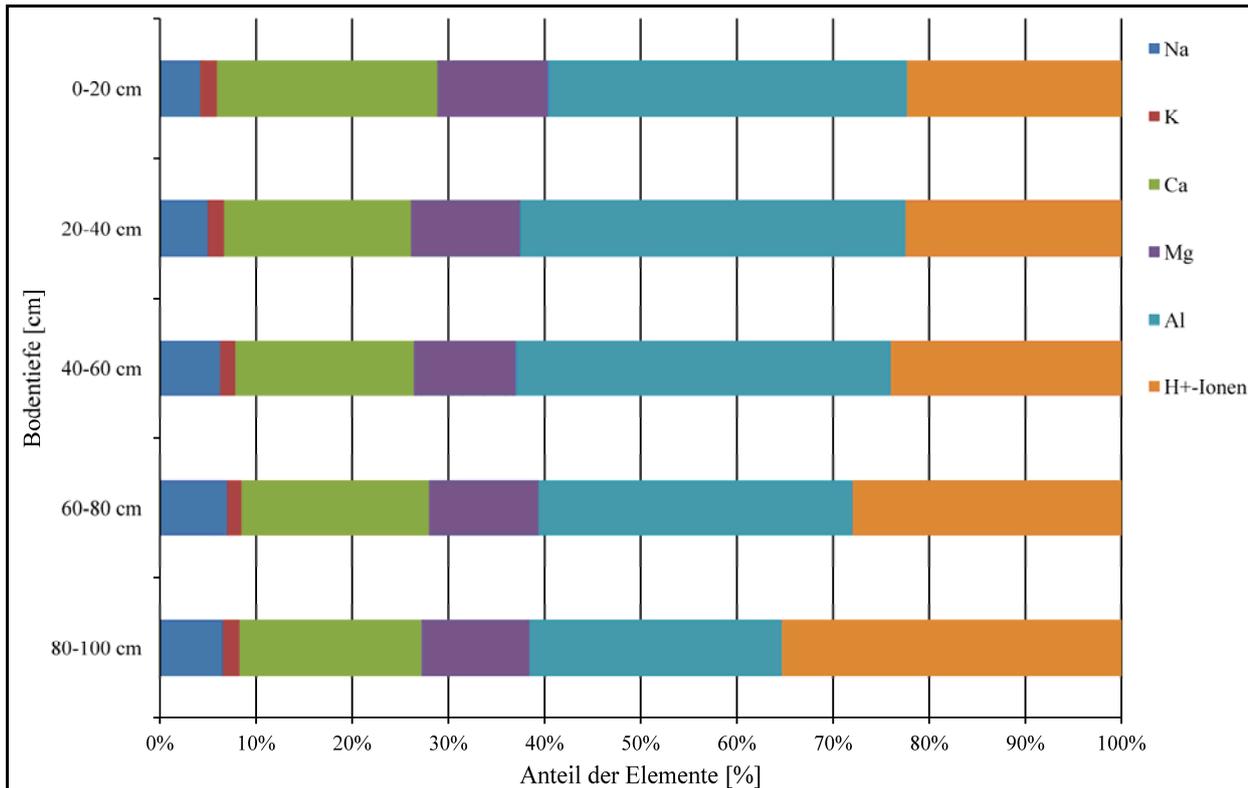


Abb. A. 9: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} in den Granitböden der Schwarzwaldostseite.

Tab. A. 46: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Vogesenwestseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	3,1	2,2	13,9	6,2	23,1	51,5	25,4	74,6
20-40 cm	4,7	1,8	10,8	5,2	24,6	55,0	22,6	77,5
40-60 cm	4,8	1,4	11,5	6,5	21,6	53,4	24,2	75,8
60-80 cm	6,2	1,4	16,5	7,1	15,7	53,2	31,1	68,9
80-100 cm	5,4	1,2	12,4	7,4	10,7	61,2	26,4	73,7

Tab. A. 47: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden des Vogesenkammes.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	2,6	1,2	18,58	12,8	45,1	20,3	35,2	2,6
20-40 cm	2,9	1,2	15,63	11,9	48,7	20,1	31,6	2,9
40-60 cm	4,2	1,1	18,31	15,8	47,6	15,5	39,4	4,2
60-80 cm	5,1	1	19	15,3	41,4	18,3	40,4	5,1
80-100 cm	5,7	0,9	21,66	18,8	36,3	16,6	47,1	5,7

Tab. A. 48: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Buntsandsteinböden der Vogesenwestseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	4,1	1,3	21,2	17,2	21,5	34,7	43,8	56,2
20-40 cm	5,2	0,9	20	18,5	22	33,4	44,6	55,4
40-60 cm	4,9	0,8	20,6	16,9	17,4	39,4	43,2	56,8
60-80 cm	6,7	1,1	25	21	19,8	26,4	53,8	46,2
80-100 cm	5,3	1,1	24,3	21	15,8	32,5	51,7	48,3

Tab. A. 49: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Buntsandsteinböden des Vogesenkammes.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	4,4	1,0	17,3	20,8	32,8	23,7	43,5	56,5
20-40 cm	4,9	0,6	14,0	21,7	35,7	23,1	41,2	58,8
40-60 cm	5,2	0,6	13,1	19,8	42,4	19,0	38,7	61,3
60-80 cm	5,8	0,5	15,1	21,8	33,7	23,1	43,2	56,8
80-100 cm	5,5	0,6	13,4	21,0	30,7	28,9	40,4	59,6

Tab. A. 50: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Vogesenostseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	3,7	1,3	37,0	15,7	16,5	25,9	57,6	42,4
20-40 cm	4,6	0,9	31,9	16,0	22,7	23,9	53,4	46,6
40-60 cm	5,4	1,0	32,3	17,3	17,9	26,1	56,1	43,9
60-80 cm	5,6	0,9	33,2	19,2	16,2	25,0	58,9	41,1
80-100 cm	7,1	1,0	38,0	22,9	11,3	19,8	68,9	31,1

Tab. A. 51: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Schwarzwaldwestseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	8,4	2,0	29,7	17,5	32,1	7,6	8,4	2,0
20-40 cm	8,0	2,2	26,9	16,9	33,0	11,4	8,0	2,2
40-60 cm	6,9	1,7	20,9	15,8	34,9	19,8	6,9	1,7
60-80 cm	6,2	1,8	21,0	18,6	42,0	12,2	6,2	1,8
80-100 cm	5,0	2,1	29,0	20,3	33,6	13,8	5,0	2,1

Tab. A. 52: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Buntsandsteinböden der Vogesenostseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	4,6	1,9	36,6	27,8	14,9	14,2	70,9	29,1
20-40 cm	5,4	1,3	34,6	24,8	16,2	17,6	66,1	33,9
40-60 cm	5,3	1,2	35,1	27,1	11,6	19,7	68,7	31,3
60-80 cm	5,8	1,4	39,4	31,5	13,6	8,2	78,1	21,9
80-100 cm	5,3	1,5	41,5	30,5	12,3	7,2	78,8	21,2

Tab. A. 53: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden des Schwarzwaldkammes.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	5,47	0,82	13,49	13,35	32,25	5,47	0,82	13,49
20-40 cm	5,45	0,97	21,89	11,82	37,08	5,45	0,97	21,89
40-60 cm	3,6	0,89	27,69	9,95	34,25	3,6	0,89	27,69
60-80 cm	3,08	1,3	19,32	10,32	38,87	3,08	1,3	19,32
80-100 cm	2,56	2,13	33,62	12,51	34,38	2,56	2,13	33,62

Tab. A. 54: Anteil der Elemente an der KAK_{eff} [%] in den Granitböden der Schwarzwaldostseite.

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H^+ -Ionen	Basen	Säuren
0-20 cm	4,21	1,71	22,94	11,49	37,37	22,29	40,35	59,65
20-40 cm	4,98	1,7	19,43	11,35	40,08	22,46	37,46	62,54
40-60 cm	6,25	1,6	18,58	10,58	39,02	23,99	37,01	62,99
60-80 cm	6,98	1,51	19,5	11,4	32,65	27,96	39,39	60,61
80-100 cm	6,57	1,73	18,95	11,23	26,25	35,37	38,48	61,52

Molares Ca/Al-Verhältnis in den beiden Umweltmedien

 Tab. A. 55: Standardabweichungen zwischen der Ca²⁺-Ionenkonzentration der Beprobungen.

Standortnummer	s[0-3cm]	s[3-10cm]
A	38,9	12,7
BI	6,3	2,5
B II	9,9	3,0
B III	21,8	5,8
CI	28,6	1,2
C II	63,2	35,9
C III	2,6	1,0
D	24,4	2,9
E	4,7	0,7
FI	7,3	2,2
GI	23,7	2,8
G II	2,5	1,6
G III	3,8	1,7
U	1,6	0,4
AY	18,8	12,9
BR	19,7	4,1
W	5,0	1,6
X	21,1	9,3
BX	24,0	2,6
AV	2,0	1,2
V	2,2	0,4
AW	3,1	1,0
BS	4,0	2,4
BY	6,8	5,4
CP	1,6	0,5
Y	3,6	1,8
BW	8,5	1,7
CE	1,9	1,3
AK	1,0	0,6
AZ	7,1	1,4
BC	5,2	4,1
CF	1,9	1,0
AD	20,9	19,5
CJ	4,6	0,8
CK	1,8	1,1
CG	26,1	10,3
CI	12,7	6,0
BD	6,4	3,7
CU	6,1	5,4
CT	5,3	0,6
CS	6,3	3,1

AE	89,6	92,3
AI	2,9	1,5
AJ	2,0	0,9
AU	67,7	22,8
AX	7,0	4,0
AH I	3,6	0,9
AH II	3,5	7,8
P	66,3	8,5
AL	21,6	4,9
BE	18,8	7,9
BZ	26,2	6,6
BQ	83,1	76,6
BP	77,0	10,3
BV	30,2	12,1
T	26,3	37,6
AO	12,0	19,0
BH	18,0	17,3
S	33,8	15,4
J	28,7	37,1
Q	9,9	10,3
BU	26,1	23,2
R	34,3	57,8
BF	2,2	1,9
AN	10,3	6,4
BG	4,2	2,6
CA	1,8	1,1
BT	73,0	43,0
BE	18,8	7,9

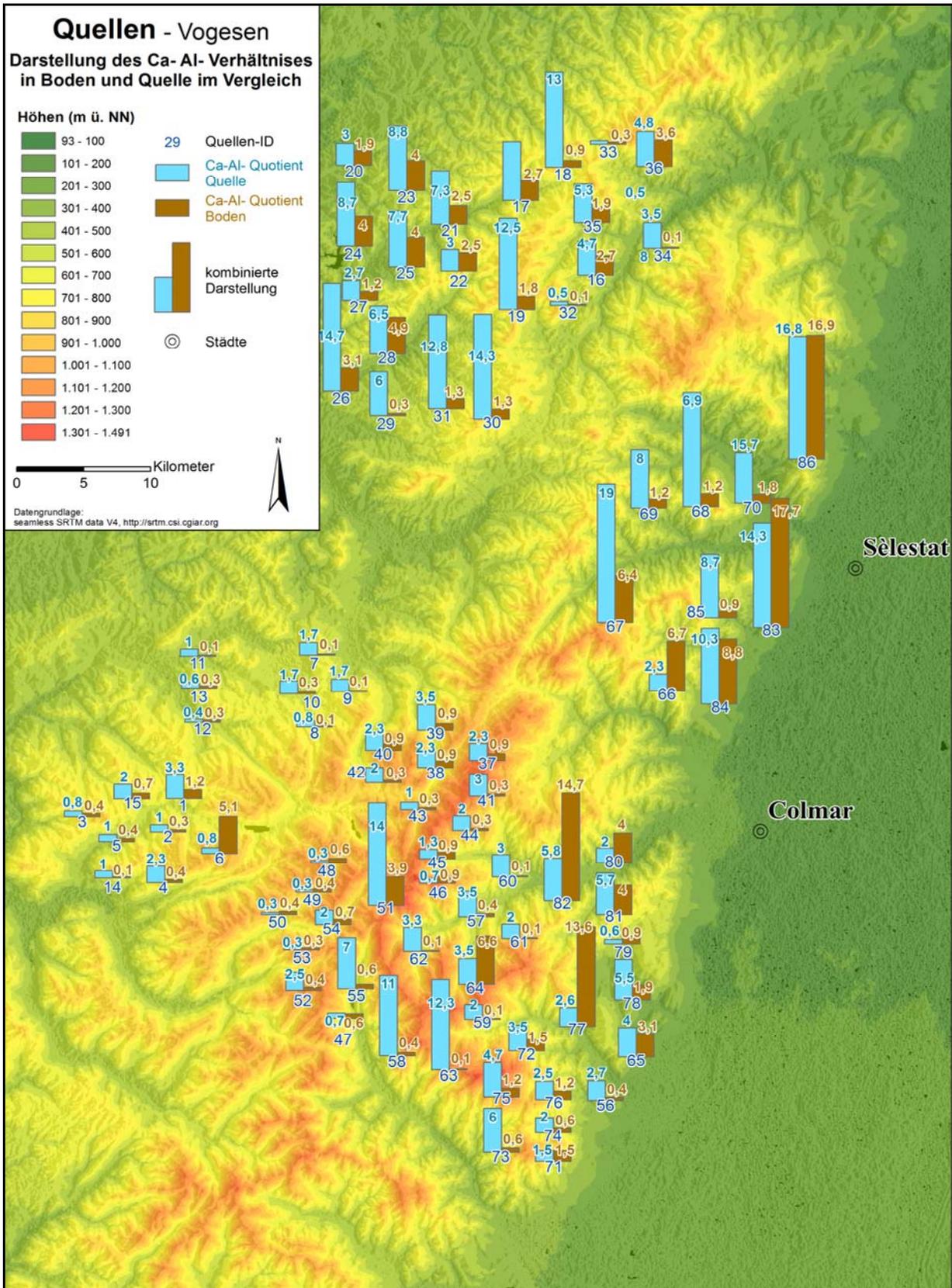
Interaktion von Böden und Quellgewässern

Tab. A. 56: Molares Ca/Al-Verhältnis in den Quellen und in der Bodenlösung.

Probenr._Qu.	Lage/Geologie	Ca/Al_0-100cm	Ca/Al_Quelle	Bewertung_Boden	Bewertung_Quelle
1	WS/GR	1,2	3,3	k.G	k.G
2	WS/GR	0,3	1	g.G	k.G
3	WS/GR	0,4	0,8	g.G	g.G
4	WS/GR	0,4	2,3	g.G	k.G
5	WS/GR	0,4	1	g.G	k.G
6	WS/GR	5,1	0,8	k.G	g.G
7	WS/GR	0,1	1,7	s.G.	k.G
8	WS/GR	0,1	0,8	s.G.	g.G
9	WS/GR	0,1	1,7	s.G.	k.G
10	WS/GR	0,3	1,7	g.G	k.G
11	WS/GR	0,1	1	s.G.	k.G
12	WS/GR	0,3	0,4	g.G	g.G
13	WS/GR	0,3	0,6	g.G	g.G
14	WS/GR	0,1	1	s.G.	k.G
15	WS/GR	0,7	2	g.G	k.G
16	WS/BS	2,7	4,7	k.G	k.G
17	WS/BS	2,7	8	k.G	k.G
18	WS/BS	0,9	13	g.G	k.G
19	WS/BS	1,8	12,5	k.G	k.G
20	WS/BS	1,9	3	k.G	k.G
21	WS/BS	2,5	7,3	k.G	k.G
22	WS/BS	2,5	3	k.G	k.G
23	WS/BS	4,0	8,8	k.G	k.G
24	WS/BS	4,0	8,7	k.G	k.G
25	WS/BS	4,0	7,7	k.G	k.G
26	WS/BS	3,1	14,7	k.G	k.G
27	WS/BS	1,2	2,7	k.G	k.G
28	WS/BS	4,9	6,5	k.G	k.G
29	WS/BS	0,3	6	g.G	k.G
30	WS/BS	1,3	14,3	k.G	k.G
31	WS/BS	1,3	12,8	k.G	k.G
37	Kamm/GR	0,9	2,3	g.G	k.G
38	Kamm/GR	0,9	2,3	g.G	k.G
39	Kamm/GR	0,9	3,5	g.G	k.G
40	Kamm/GR	0,9	2,3	g.G	k.G
41	Kamm/GR	0,3	3	g.G	k.G
43	Kamm/GR	0,3	1	g.G	k.G
44	Kamm/GR	0,3	2	g.G	k.G
45	Kamm/GR	0,9	1,3	g.G	k.G
46	Kamm/GR	0,9	0,7	g.G	g.G
47	Kamm/GR	0,6	0,7	g.G	g.G
48	Kamm/GR	0,6	0,3	g.G	g.G
49	Kamm/GR	0,4	0,3	g.G	g.G
50	Kamm/GR	0,4	0,3	g.G	g.G
51	Kamm/GR	3,9	14	k.G	k.G
52	Kamm/GR	0,4	2,5	g.G	k.G
53	Kamm/GR	0,3	0,3	g.G	g.G
54	Kamm/GR	0,7	2	g.G	k.G
55	Kamm/GR	0,6	7	g.G	k.G
56	Kamm/GR	0,4	2,7	g.G	k.G
58	Kamm/GR	0,4	11	g.G	k.G
59	Kamm/GR	0,1	2	s.G.	k.G
60	Kamm/GR	0,1	3	s.G.	k.G
61	Kamm/GR	0,1	2	s.G.	k.G

Interaktion von Böden und Quellgewässern

Probennr._Qu.	Lage/Geologie	Ca/Al_0-100cm	Ca/Al_Quelle	Bewertung_Boden	Bewertung_Quelle
62	Kamm/GR	0,1	3,3	s.G.	k.G
63	Kamm/GR	0,1	12,3	s.G.	k.G
64	Kamm/GR	6,6	3,5	k.G	k.G
33	Kamm/BS	0,3	0,5	g.G	g.G
34	Kamm/BS	0,1	3,5	s.G.	k.G
35	Kamm/BS	1,9	5,3	k.G	k.G
36	Kamm/BS	3,6	4,8	k.G	k.G
32	Kamm/BS	0,1	0,5	s.G.	g.G
71	OS/GR	1,5	1,5	k.G	k.G
72	OS/GR	1,5	3,5	k.G	k.G
74	OS/GR	0,6	2	g.G	k.G
75	OS/GR	1,2	4,7	k.G	k.G
77	OS/GR	13,6	2,6	k.G	k.G
78	OS/GR	1,9	5,5	k.G	k.G
79	OS/GR	0,9	0,6	g.G	g.G
80	OS/GR	4,0	2	k.G	k.G
81	OS/GR	4,0	5,7	k.G	k.G
82	OS/GR	14,7	5,8	k.G	k.G
83	OS/GR	17,7	14,3	k.G	k.G
84	OS/GR	8,8	10,3	k.G	k.G
85	OS/GR	0,9	8,7	g.G	k.G
86	OS/GR	16,9	16,8	k.G	k.G
87	OS/BS	3,1	4,3	k.G	k.G
65	OS/BS	3,1	4	k.G	k.G
66	OS/BS	6,7	2,3	k.G	k.G
67	OS/BS	6,4	19	k.G	k.G
68	OS/BS	1,2	6,9	k.G	k.G
69	OS/BS	1,2	8	k.G	k.G
70	OS/BS	1,8	15,7	k.G	k.G
73	OS/GR	0,6	6	g.G	k.G
76	OS/GR	1,2	2,5	k.G	k.G



Karte A. 3: Ca/Al-Verhältnis in den beiden Umweltmedien in den Vogesen, ENTWURF: STEFANIE HESSLER, KARTOGRAPHIE: BERNHARD MENDE.

Tonmineralanalyse

Tab. A. 57: Anteil der Drei- und Zweischichttonminerale im Oberboden (0-20cm).

Prob. Nr.	Anteil Zweischicht- und Dreischichttone	Lage, Geologie		Dreischichttone	
00310	Ausgeglichen	WS/GR	00312	Mehrheitlich Dreischichttone	K/BS
00410	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/GR	00412	Mehrheitlich Dreischichttone	K/BS
01110	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS	00510	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
01410	Ausgeglichen	WS/GR	00610	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
02410	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS	00810	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
00512	Ausgeglichen	WS/GR	01010	Mehrheitlich Zweischichttone	OS/BS
00612	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS	01210	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/BS
00712	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS	01310	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
00812	Mehrheitlich Dreischichttone	WS/BS	01610	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
00710	Mehrheitlich Zweischichttone	K/GR	01710	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/BS
00910	Mehrheitlich Zweischichttone	K/BS	01810	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
01510	Mehrheitlich Dreischichttone	K/GR	02010	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/GR
01910	Ausgeglichen	K/GR	02110	Mehrheitlich Zweischichttone	OS/GR
02210	Mehrheitlich Zweischichttone	K/BS	00912	Ausgeglichen	OS/BS
02310	Mehrheitlich Zweischichttone	K/BS	01012	Mehrheitlich Dreischichttone	OS/BS
00112	Mehrheitlich Zweischichttone	K/GR			
00212	Mehrheitlich	K/GR			

Lebenslauf

Name: Stefanie Heßler
Geburtsdatum: 16.03.1983
Geburtsort: 66740 Saarlouis
Vater: Bernd Heßler
Mutter: Gerda Heßler, geb. Sauer
Familienstand: ledig, keine Kinder
Wohnort: Im Rossfeld 20, 66333 Völklingen

Schule:

- seit 1993 Schülerin des Warndt-Gymnasiums in Geislautern
- Abschluss des Gymnasiums mit der Allgemeinen Hochschulreife 2002; außerdem Erwerb des Latinums

Universitäre Laufbahn:

- Studium auf Lehramt für Gymnasium in den Fächern Geographie, Sport und Geschichte seit dem WS 2002/2003 an der Universität des Saarlandes in Saarbrücken
- im Juni 2009 erfolgreicher Abschluss des Studiums in den Fächern Geographie und Sport mit dem Ersten Staatsexamen
- Abschluss des Drittfaches Geschichte ohne Abstufung
- seit 2009 Promotion im Fach Geographie: Bereich Physische Geographie (Doktorvater: Prof. Dr. Jochen Kubiniok)
- seit Juli 2009 Teaching Assistant an der Fakultät 5.4 Geographie bei Prof. Dr. Jochen Kubiniok.

Sonstige Tätigkeiten:

- Seit September 2004 eigenverantwortlicher Unterricht in Sportklassen an der ERS Güdingen im Rahmen des Förderprogrammes des LSVS für sportinteressierte Schulen
- seit Februar 2010 14 Stunden eigenverantwortlicher Unterricht an der Gesamtschule Wadgassen
- Juli 2011 bis Juli 2013 Referendariat in den Fächern Erdkunde und Sport am Staatlichen Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen
- seit August 2013 Anstellung in Vollzeit am Albert-Einstein-Gymnasium in Völklingen

Völklingen, den 14.04.2014