

Kapitel 9

Vergleich der wasserchemischen Eigenschaften von Waldquellen der silikatischen Mittelgebirge

Carl Beierkuhnlein, Ralf Riedel und Volker Audorff

1. Einleitung

Seit 1989 laufen an der Universität Bayreuth ökologische Untersuchungen an Waldquellen. Ausgehend von Frankenwald (BEIERKUHNLEIN 1991, 1994) und Fichtelgebirge (DURKA 1994) wurden wasserchemische Messungen inzwischen in fünf Mittelgebirgen (Thüringer Wald, Hohes Thüringer Schiefergebirge, Frankenwald, Fichtelgebirge und Westliches Erzgebirge) durchgeführt (SCHMIDT 1994, AUDORFF 1997, PEINTINGER 1998, RIEDEL 1999) (Abb. 9.1). In diesem Beitrag sollen für diese fünf Untersuchungsgebiete ausgewählte hydrochemische Kenngrößen in ihren qualitativen Eigenschaften dargestellt werden.

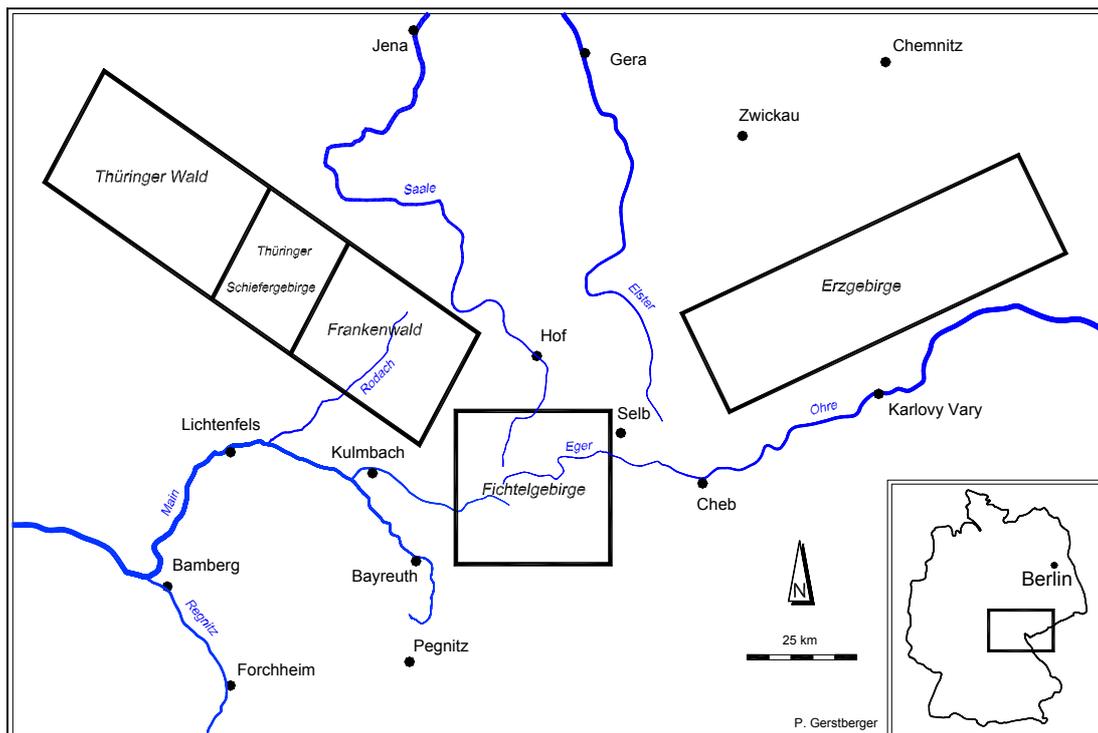


Abb. 9.1: Die geographische Lage der schematisch abgegrenzten Untersuchungsgebiete Thüringer Wald, Thüringer Schiefergebirge, Frankenwald, Fichtelgebirge, Erzgebirge

Vor bereits mehr als 20 Jahren wurde man in Skandinavien auf die Versauerung von Seen aufmerksam und konnte dies auf saure Depositionen anthropogener Herkunft zurückführen (ALMER 1974, DICKSON 1975, WRIGHT 1975). Kurze Zeit später wurde ein ähnliches Syndrom in Kanada beobachtet (BEAMISH 1976). Dabei waren die Depositionen nicht direkt wirksam, sondern über Veränderungen der Stoffausträge aus Einzugsgebieten (GORHAM & MCFEE 1980). In Mitteleuropa interessierten zu dieser Zeit zunächst die Vitalitätsverluste von Waldbeständen.

In den 80er Jahren bewegte sich dann jedoch, im Zusammenhang mit dem Waldsterben, auch die Versauerung von europäischen Mittelgebirgsbächen in die wissenschaftliche Diskussion (z.B. STUMM et al. 1983, LENHART & STEINBERG 1984, STEIDLE & PONGRATZ 1984, KRIETER & HABERER 1985, ULRICH 1986). Zwar wurden inzwischen wirksame Umweltschutzmaßnahmen in Angriff genommen, doch sind deren Auswirkungen nur mittelfristig zu erwarten. Das Phänomen wird nach wie vor als Problem erachtet (z.B. HAMM 1995).

Frühzeitig versuchte man einen geographischen Überblick über die Versauerung der Mittelgebirge zu bekommen. FAUTH (1984) erstellte eine Karte der pH-Situation für die Bundesrepublik Deutschland. Für Nordbayern finden sich umfangreiche regionale Daten bei HAMM (1984). Weitere gebietsspezifische Angaben für die nordostbayerischen Mittelgebirge finden sich bei SCHMITT et al. (1987). Allerdings waren die verfügbaren Datengrundlagen teilweise sehr heterogen, da sie aus bestehenden Messergebnissen zusammengestellt werden mussten und nicht eigens zum Zweck der Beurteilung der Säurebelastung erstellt werden konnten. Im Verlaufe eines Fließgewässers können vor allem im quellnahen Bereich bereits über kurze Entfernungen starke Veränderungen im Quellwasserchemismus auftreten.

Quellen werden in der hier vorliegenden Studie als sensitives integratives Indikationssystem für den ökochemischen Zustand von Einzugsgebieten in Waldökosystemen angesehen. Veränderungen in deren Chemismus (BACHE 1980) beeinflussen über das Sickerwasser und das Grundwasser die Quellwasserchemie. Solche Einflüsse können beobachtet werden, bevor Waldschäden offensichtlich werden (HAUHS 1985).

2. Untersuchungsgebiete

Die bearbeiteten Mittelgebirge besitzen silikatisches Ausgangsgestein. Sie weisen jedoch bezüglich ihrer petrographischen Eigenschaften starke Unterschiede auf. Im Fichtelgebirge und im Erzgebirge sind große Bereiche von Graniten aufgebaut. Hinzu treten im Fichtelgebirge Phyllite und andere metamorphe Gesteine, im Westlichen Erzgebirge Gneise. Frankenwald und Hohes Thüringer Schiefergebirge sind von metamorphen Sedimentgesteinen des Paläozoikums dominiert, wobei der Frankenwald neben den vorherrschenden karbonischen Tonschiefern nur in Teilbereichen devonische Diabasgesteine aufweist. Das Hohe Thüringer Schiefergebirge besitzt hingegen vor allem devonische, silurische und ordovizische Schichten, die von Quarziten, Grauwacken und Toschiefern bestimmt werden. Im Thüringer Wald schließlich treten vor allem permische Porphyrgesteine, Sandsteine und Konglomerate zutage.

Tab. 9.1: Landesnatur der Untersuchungsgebiete

	Thüringer Wald	Thüringer Schiefergebirge	Frankenwald	Fichtelgebirge	Erzgebirge
erste Beprobung	1997	1993	1989/90	1989/90	1997
Höhenlagen der Quellen [m ü.NN]	535 - 890	380 - 810	410 - 730	510 - 1000	625 - 925
Gestein	Porphyrit, Konglomerat	Schiefer, Quarzit	Schiefer	Granit, Phyllit	Granit, Gneis
Mittlerer Jahresniederschlag [mm/a]	800 - 1200	550 - 1200	600 - 1000	600 - 1200	700 - 1200
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	4 - 7	4 - 7	5 - 7	4 - 6	4 - 6
Dominante Waldbaumarten	Fichte (Buche)	Fichte (Buche)	Fichte (Buche)	Fichte	Fichte
potentiell natürliche Vegetation	<i>Luzulo-Fagetum, Vaccinio-Abietetum, Calamagrostio Piceetum</i>	<i>Luzulo-Fagetum, Vaccinio-Abietetum</i>	<i>Luzulo-Fagetum, Galio-Fagetum</i>	<i>Luzulo-Fagetum, Vaccinio-Abietetum, Calamagrostio Piceetum</i>	<i>Luzulo-Fagetum, Vaccinio-Abietetum, Calamagrostio Piceetum</i>

Das Relief der Gebirge weist ebenfalls deutliche Unterschiede auf. Thüringer Wald und Erzgebirge besitzen aus tektonischen Gründen eher Kammrückencharakter, während Frankenwald und Thüringer Schiefergebirge deutlich eingerumpft sind und eher den Eindruck einer Hochfläche erwecken. Das Fichtelgebirge ist durch die Form der Granitintrusion geprägt und folgt damit einer hufeisenartigen Aufwölbung. Die höchsten Erhebungen reichen von knapp 800 m ü.NN (Frankenwald) bis über 1000 m ü.NN (Westliches Erzgebirge, Fichtelgebirge) und modifizieren die mesoklimatischen Verhältnisse.

Alle Landschaften liegen schon aufgrund ihrer räumlichen Nähe zueinander in einem vergleichbaren Klimabereich. Dennoch ist ein deutlicher Kontinentalitätsgradient von eher subatlantischem zu subkontinentalen Klima festzustellen. Die Jahresniederschläge bewegen sich zwischen 600 und 1200 mm/a. Die Jahresdurchschnittstemperaturen liegen zwischen 4 und 7 °C. In allen Gebieten herrschen heute Fichtenforsten vor, wobei in einzelnen Gebieten durchaus noch naturnahe Buchenwälder anzutreffen sind. Einen Überblick über die Landesnatur der Untersuchungsgebiete bietet Tabelle 9.1. Genauere Angaben zu den landschaftlichen Gegebenheiten sind den folgenden Kapiteln zu entnehmen.

3. Methoden

In allen fünf Mittelgebirgen folgte die Probennahme im wesentlichen der selben Methodik. Beprobt wurden Waldquellen in allen Höhenlagen, um die klimatische Varianz innerhalb der Gebiete zu berücksichtigen, mit den untersuchten Standorten wurde jeweils das gesamte Gebiet abgedeckt. Offensichtliche menschliche Störwirkungen (Wegebau im Einzugsgebiet, Kahlschlagflächen im direkten Quellungriff etc.) wurden ausgeschlossen.

Die Untersuchung hydrologischer Kenngrößen wurde jeweils zu mindestens zwei Zeitpunkten durchgeführt. Die Beprobung im Frühjahr, nach Abschluss der Schneeschmelze mit starken oberflächennahen Abflüssen, diente der Ermittlung von Extremwerten der Versauerung, mit der Beprobung im Herbst, deren Ergebnisse im folgenden dargestellt sind, kann eher eine Aussage über die Systembelastung der Einzugsgebiete (Basisabfluss) getroffen werden. Im Frankenwald (BEIERKUHNEIN 1994) und im Fichtelgebirge (DURKA 1994) wurden auch Zeitreihen mit einer monatlichen Probennahme über ein Jahr hinweg angefertigt.

Sämtliche Messungen in situ und alle Entnahmen von Wasserproben erfolgten möglichst nahe am Quellaustritt, sobald eine fließende Welle festzustellen war. An der Quelle wurden die hydrophysikalischen Parameter Wassertemperatur und Schüttungsmenge sowie die hydrochemischen Parameter Elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, Säurekapazität bis pH 4,3 (Alkalinität) und Basenkapazität bis pH 8,3 (Acidität) ermittelt. Zur Analyse der Stoffgehalte des Quellwassers wurden Wasserproben entnommen, die anschließend im Labor auf die Kationen Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ und Na^+ , die Anionen SO_4^{2-} , NO_3^- und Cl^- sowie die Spurenmetalle Al, Mn und Cd analysiert wurden.

Neben den hydrologischen Untersuchungen wurden vegetationskundliche Daten erhoben (s.a. Tabelle 1.1, Kapitel 1 in diesem Band). Deren Ergebnisse sind in den Kapiteln zu den jeweiligen Gebieten nachzulesen (Kapitel 13 bis 17). Die wichtigsten hydrologischen Ergebnisse werden zusammenfassend im folgenden dargestellt, weitergehende Informationen zu den Methoden und detaillierte Ergebnisse sind den entsprechenden Arbeiten zu entnehmen.

4. Ergebnisse

4.1. pH

Das pH ist, wie auch die Alkalinität, eine wichtige kumulative Kenngröße zur Beurteilung der Versauerung von Gewässern. Für eine Reihe von Elementen ist eine eindeutige Beziehung der Messwerte zum Quellwasser-pH gegeben (z.B. Al, Mn, Cd, Zn). Andere zeigen keine oder nur undeutliche pH-Abhängigkeit (z.B. Pb, Ni, NH_4 , PO_4) (BEIERKUHNEIN 1994, DURKA 1994). Erwartungsgemäß besteht eine enge Beziehung zur Alkalinität (Abb. 9.2) und damit zur Pufferkapazität der Wässer. Abb. 9.2 zeigt, dass in Fichtelgebirge und Erzgebirge weder hohe pH-Werte, noch hohe Alkalinitätswerte auftreten.

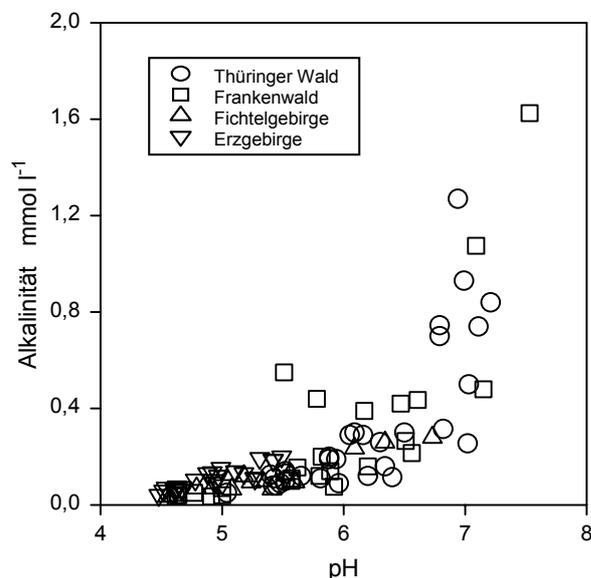


Abb. 9.2:

Alkalinität und pH-Wert von Quellwässern der Untersuchungsgebiete.

(Thüringer Wald: n=29, Frankenwald: n=22, Fichtelgebirge: n=13, Erzgebirge: n=20)

Innerhalb der Untersuchungsgebiete zeigen sich teilweise deutliche räumliche Muster niedriger pH-Werte. Dies gilt vor allem für den Frankenwald (BEIERKUHNEIN 1991, 1994) und eingeschränkt auch für das Fichtelgebirge (DURKA 1994). Im Frankenwald konzentrieren sich saure Quellen mit pH-Werten unter pH 4,5 auf die nördlichen Hochlagen und sind in den ebenso hochgelegenen Bereichen im Südosten nicht anzutreffen. Im Fichtelgebirge hingegen findet man niedrige pH-Werte vor allem in den höheren Lagen, wobei diese gleichzeitig auch die Granitgebiete ausmachen. Im Erzgebirge ist keine räumliche Differenzierung erkennbar (RIEDEL 1999), doch liegen die Werte insgesamt im sauren Bereich. Im Thüringer Wald ist ebenfalls keine räumliche Musterbildung zu finden, doch liegen nun die Werte insgesamt eher im neutralen Bereich, so dass auch hier keine Differenzierung erkennbar ist (PEINTINGER 1998).

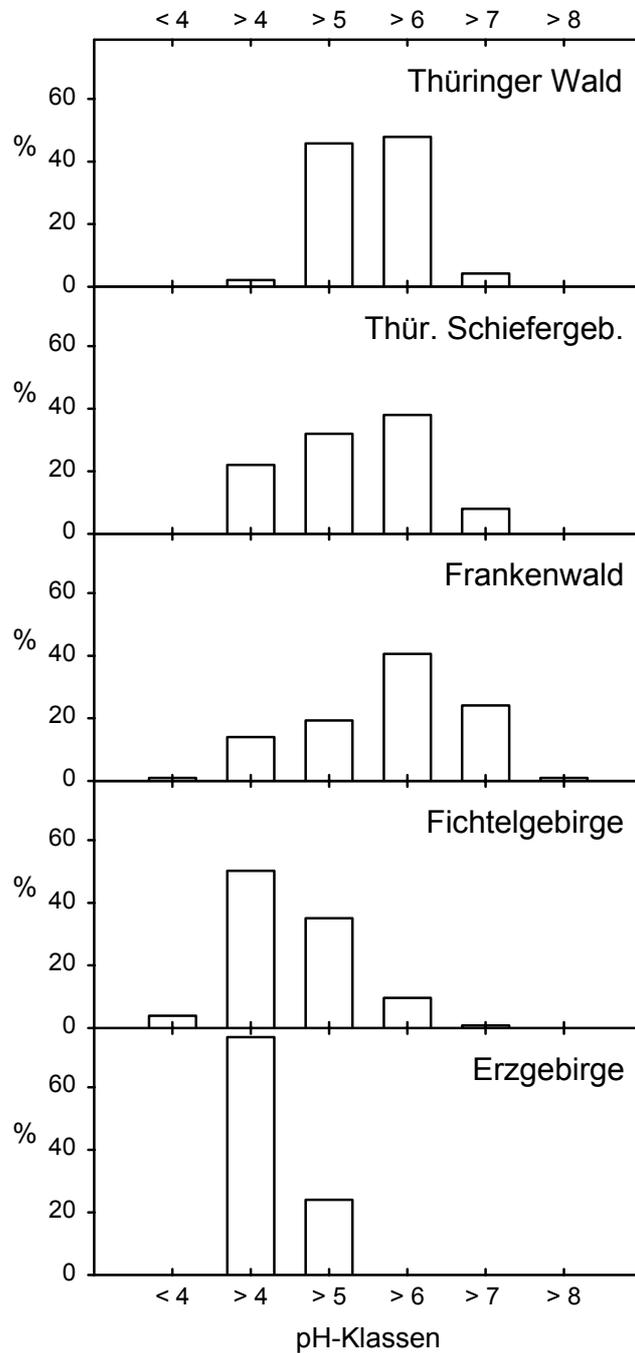


Abb. 9.3: Prozentuale Verteilung der pH-Werte der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete. (Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

Jahreszeitliche Schwankungen der Stoffkonzentrationen und der pH-Werte sind zwar an den Quellen feststellbar, überlagern jedoch die räumlichen Charakteristika der Stoffgehalte nicht. Bei den wiedergegebenen Werten handelt es sich um die Ergebnisse sommerlicher Messungen. Die Frühjahrswerte können in Einzelfällen starke Abweichungen nach unten aufweisen.

Im Vergleich der Mittelgebirge wird eine Zunahme des Anteils von Quellen mit stärkerer Säurekonzentration von Westen nach Osten, vom Thüringer Wald bis hin zum Erzgebirge offensichtlich (Abb. 9.3). Dabei ist aufgrund der petrographischen Unterschiede nicht zu klären, ob diese räumlichen Unterschiede eher geochemisch bedingt sind oder durch unterschiedlich starke Immissionen hervorgerufen wurden. Es fällt jedoch auf, dass die beiden Granitgebirge, Fichtelgebirge und Erzgebirge, sich bezüglich des prozentualen Auftretens verschiedener pH-Wert-Klassen sehr deutlich von den anderen Mittelgebirgen abheben.

4.2. Elektrische Leitfähigkeit

Die Elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter und kann auf verschiedenste Weise beeinflusst werden. Die Herleitung von Korrelationen ist daher problematisch (BEIERKUHNLEIN 1994). Niedrige Leitfähigkeitswerte sind aber in Verbindung mit geringen pH-Werten ein Indiz für pufferungsschwache Gewässer, erhöhte Werte können auf eine verstärkte Inanspruchnahme der Puffersysteme, die mit der Freisetzung von Kationen einhergeht, hindeuten. Allerdings sind einzelne Extremwerte (Abb. 9.4) auf die Auswirkung des Einsatzes von Streusalzen auf Straßen in den Einzugsgebieten bedingt. Die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Untersuchungsgebieten sind vor allem durch das verschiedenartige Ausgangssubstrat bedingt. Erneut heben sich die granitischen Mittelgebirge von den aus Sedimentiten und Vulkaniten aufgebauten ab.

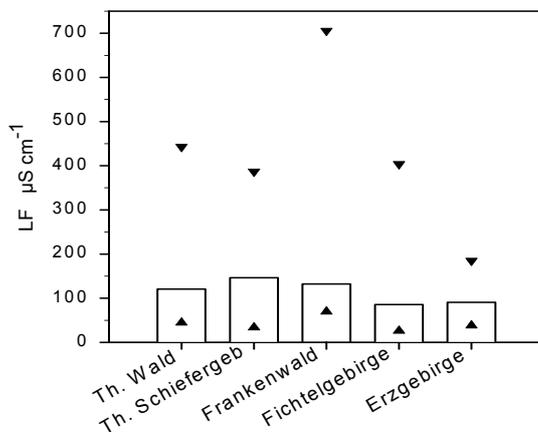


Abb. 9.4: Mittlere Leitfähigkeitswerte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete. (Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

4.3. Sulfat und Nitrat

Sulfat und Nitrat stellen die wesentlichen atmosphärischen Säurebildner dar. Hohe Sulfatkonzentrationen im Quellwasser spiegeln in ihrem räumlichen Bild das regionale Depositionsgeschehen wider. Allerdings ist in den Hochlagen mit podsolierten Böden in den Einzugsgebieten eine Fixierung von Sulfat durch Anionensorption, und somit kein quantitativer Austrag, zu erwarten. Im Vergleich der untersuchten Gebiete sind keine klaren Unterschiede oder räumliche Trends zu erkennen (Abb. 9.5). Zurückgehende Depositionsraten (KREBS & MORITZ 1995) könnten sich in den nächsten Jahren im Quellwasserchemismus bemerkbar machen.

Nitrat wird in etwa zu gleichen Teilen von Industrie, Verkehr und Landwirtschaft freigesetzt und unterliegt im Boden starken und raschen redoxchemischen Umsetzungen, die unter anderem vom aktuellen hydrologischen Geschehen abhängig sind. Auch wirkt die Eigenschaft als quantitativ bedeutsamer Pflanzennährstoff modifizierend auf die Stickstoffflüsse im Boden und ins Grundwasser (s.a. Kapitel 6 in diesem Band). Unterschiede zwischen den Gebieten sind nicht festzustellen (Abb. 9.6). Einzelne Extremwerte (Frankenwald) erwiesen sich als Einflüsse agrarischer Nutzungen in nicht völlig forstlich genutzten Einzugsgebieten und stützen so die These des interflowgeprägten Grundwassertransportes über längere Entfernungen.

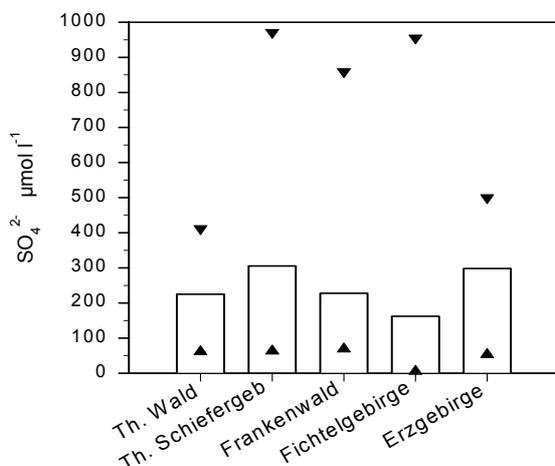


Abb. 9.5:

Mittlere Sulfatgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete.
(Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

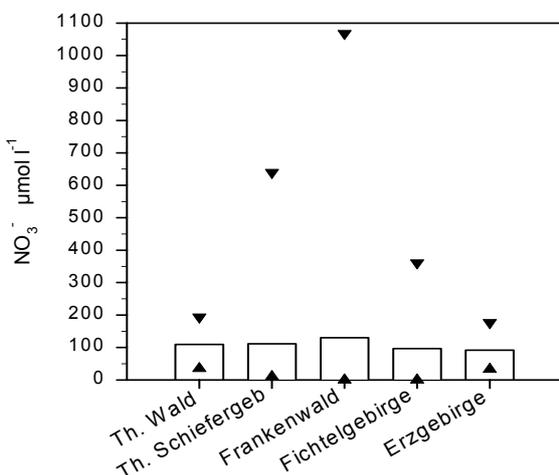


Abb. 9.6:

Mittlere Nitratgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete.
(Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

4.4. Calcium, Magnesium und Kalium

Neben dem pH-Wert geben vor allem die Konzentrationen der Elemente, die in die Puffersysteme in Boden und Grundwasser (s.o.) involviert sind, wertvolle Hinweise zum Versauerungszustand des Quellwassers. Höhere Calcium- und Magnesium-Konzentrationen deuten darauf hin, dass sich das Quellwasser noch im neutralen Bereich des Kohlensäure-Carbonat-Puffers befinden. Allerdings wird durch den Versauerungsprozess auch Calcium freigesetzt.

Die einzelnen hohen Calciumwerte des Thüringer Schiefergebirges könnten auf kleinräumiges Ausstreichen devonischer Kalke zurückzuführen sein (Abb. 9.7). Ansonsten ist, ähnlich wie beim Magnesium (Abb. 9.8) kein geographisch zu interpretierendes Muster der Messwerte zu erkennen. Auffallend sind lediglich die sehr geringen Calcium- und Magnesiumwerte im Erzgebirge. Eventuell ist dort die Pufferung durch diese Kationen bereits erschöpft.

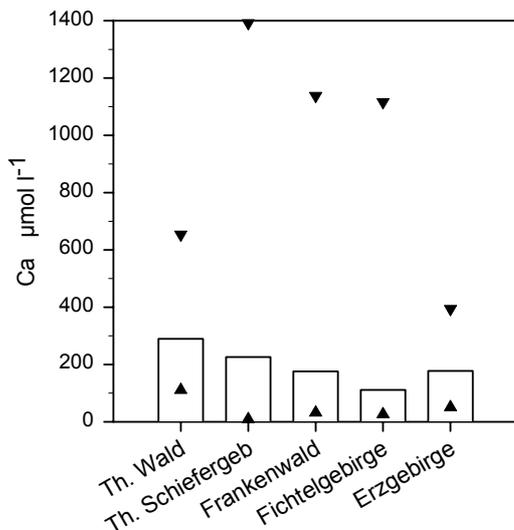


Abb. 9.7:

Mittlere Calciumgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete. (Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

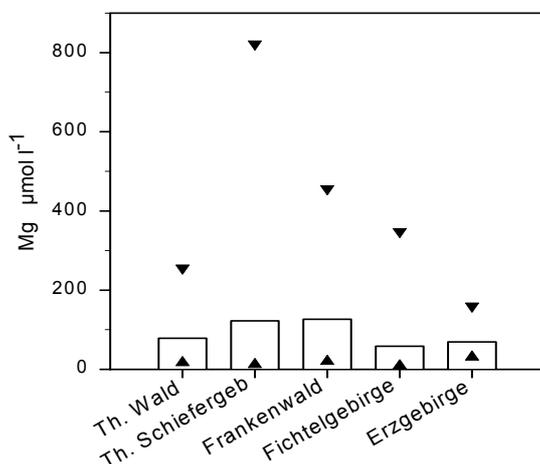


Abb. 9.8:

Mittlere Magnesiumgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete. (Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

Die Kaliumgehalte zeigen geogen bedingt vor allem geringe Werte in den glimmerarmen Schiefergebirgen, Frankenwald und Thüringer Schiefergebirge (BEIERKUHNLEIN & DURKA 1994). Im Fichtelgebirge und Erzgebirge sind die Werte höher. Die weitaus höchsten Gehalte finden sich jedoch in den aus Porphyren aufgebauten Einzugsgebieten des Thüringer Waldes (Abb. 9.9).

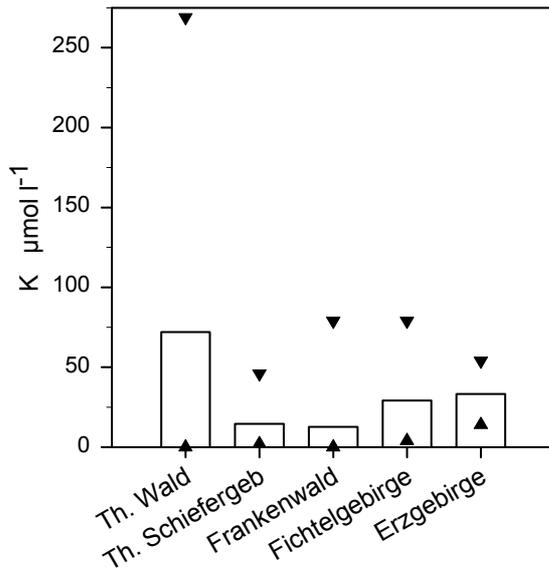
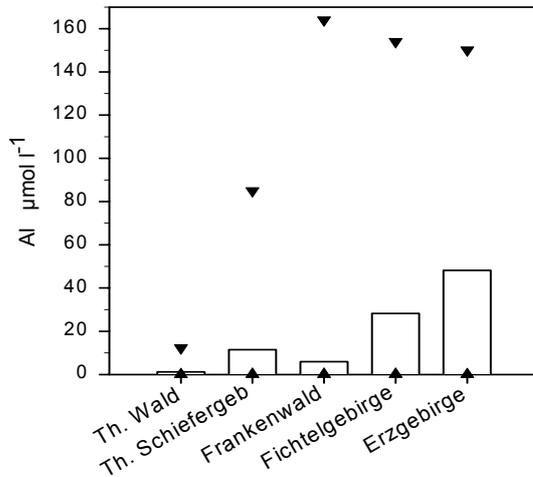


Abb. 9.9:
Mittlere Kaliumgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete.
(Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

4.5. Aluminium

Hohe Aluminium-Konzentrationen zeigen an, dass der Carbonat-Puffer ausgeschöpft ist und durch Beanspruchung des Aluminium-Puffers im pH-Bereich unter 4,2 Aluminium freigesetzt wird. Dies ist in Quellen der höheren Lagen der Mittelgebirge der Fall. Es ist aber vor allem ein gebiets-spezifisches Muster zu erkennen, was durch die hohen mittleren Aluminiumgehalte im Fichtelgebirge und vor allem im Erzgebirge hervorgerufen wird (Abb. 9.10). Im Thüringer Wald liegen die Messwerte, folgend aus den hohen pH-Werten erwartungsgemäß, in einem sehr niedrigen Bereich.

**Abb. 9.10:**

Mittlere Aluminiumgehalte sowie Minima und Maxima der Quellwässer der fünf Untersuchungsgebiete. (Thüringer Wald: n=48, Thüringer Schiefergebirge: n=50, Frankenwald: n=206, Fichtelgebirge: n=261, Erzgebirge: n=50)

5. Diskussion

Die untersuchten Mittelgebirge zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der hydrochemischen Eigenschaften der Quellwässer. Dabei konnten die formulierten Hypothesen (stärkere Belastung im Osten, Zunahme der Versauerung mit der Höhenlage) zwar teilweise bestätigt werden, allerdings mussten sie in einigen Gebieten deutliche Modifikationen erfahren. Vor allem erwiesen sich die einzelnen Mittelgebirge als sehr individuell bezüglich ihrer geoökologischen Differenzierung. Eine Zusammenfassung der wichtigsten hydrologischen Ergebnisse bietet die Tabelle 9.2.

Wenn auch eine deutliche Korrelation besteht, so ist die Acidität von Quellen insgesamt nicht einfach durch die Höhenlage (und somit durch die Niederschlagsmenge) zu erklären. Vielmehr zeigen die verschiedenen Landschaften teilweise charakteristische Muster, welche als Belastungsgebiete interpretiert werden können. Allerdings erfolgt durch das Ausgangsgestein, d.h. durch seine geochemischen Eigenschaften und durch seinen Verwitterungsgrad, eine starke Überlagerung der anthropogenen Versauerung. Dasselbe gilt für den im gesamten Mittelgebirgsbereich diagnostizierten West-Ost-Gradienten. Zwar sind die Quellen der östlich gelegenen Mittelgebirge (Fichtelgebirge, Erzgebirge) tatsächlich deutlich saurer als jene der westlichen Gebiete (Thüringer Wald), doch sind erstere Gebiete gleichzeitig aus deutlich weniger basenreichen Gesteinen aufgebaut, so dass dort eine geringere geogene Pufferung unterstellt werden kann.

Ein Einfluss der unterschiedlichen Massenerhebung der Mittelgebirge auf die Versauerungstendenzen der Gebirge konnte nicht gefunden werden, auch wenn innerhalb der Untersuchungsgebiete durchaus höhenzonale Trends festzustellen waren. Stark saure Quellen traten, mit Ausnahme des Thüringer Waldes, in allen Mittelgebirgen auf. Allerdings ist der Anteil saurer und neutraler Quellen in den verschiedenen Gebieten sehr unterschiedlich, aber eher von Gestein geprägt, als von der allgemeinen Höhenlage und damit vom Klima des Gebietes.

Um das Versauerungsgeschehen in Waldquellen und ihren Einzugsgebieten beurteilen zu können, reicht es nicht aus, alleine die pH-Werte zu betrachten. Erhöhte Konzentrationen der Elemente, die an den Puffersystemen beteiligt sind, geben Hinweise darauf, ob im Ökosystem Immissionen von säurebildenden Stoffen noch ausgeglichen werden können. Der Nachweis der Säurebildner Sulfat und Nitrat selbst im Quellwasser ist nur wenig aussagekräftig.

In der Zusammenschau ist aber deutlich zu erkennen, dass ein größerer Anteil der Quellen in den östlichen beiden Mittelgebirgen Erzgebirge und Fichtelgebirge versauert ist, was sich an tieferen pH-Werten und höheren Aluminiumkonzentrationen zeigt. In den westlich gelegenen Untersuchungsgebieten Frankenwald, Thüringer Schiefergebirge und Thüringer Wald beschränken sich versauerte Quellen auf Teilräume der jeweiligen Gebiete. Dort befindet sich die Mehrzahl der Quellen im Carbonat- und im Silikat-Pufferbereich, was sich in höheren pH-Werten und Calcium- und Magnesiumkonzentrationen manifestiert.

Der quantitativ bedeutsamste Weg des Grundwassertransportes erfolgt in den silikatischen Mittelgebirgen über oberflächennahes Grundwasser beziehungsweise Interflow. Die hohe Zahl der Quellen, ihr Chemismus und ihr Schüttungsverhalten bestätigen dies. Damit können Quellen als Indikationssysteme für den Zustand von Waldökosystemen genutzt werden. Die Qualität des Stoffaustrags der Waldeinzugsgebiete kann mit geringem Aufwand unter vergleichbaren Bedingungen erfasst werden. Die absolute Menge der aus dem Waldökosystem ausgetragenen Stoffe kann aber durch das vorgestellte Vorgehen nicht festgestellt werden, da dazu eine exakte Ermittlung der Schüttung und eine möglichst genaue Abgrenzung der Einzugsgebiete durchgeführt werden müsste (s.a. Kapitel 2 und 7 in diesem Band).

Alle in dieser Studie ausgewerteten Quellen wurden in ihrer Lage dokumentiert. Für die einzelnen Mittelgebirge wurden auf dieser Basis jeweils ca. 50 Waldquellen als Dauerbeobachtungsflächen etabliert (s.a. Kapitel 1 in diesem Band). Mit der Festlegung dieser Dauerflächen und der dortigen Ermittlung des "status quo" für die 90er Jahre wurden die Grundlagen für Vergleichsuntersuchungen, für ein Monitoring-System der Stoffausträge gelegt. Eventuelle Veränderungen im Chemismus der Quellwässer und somit in der Zusammensetzung des Stoffaustrags von Waldeinzugsgebieten können künftig objektiv nachvollziehbar und vor allem im räumlichen Zusammenhang dokumentiert werden. AUDORFF (1997, Kapitel 10 in diesem Band) unternahm bereits einen ersten Versuch einer vergleichenden Analyse und konnte Trends der wasserchemischen Kenngrößen feststellen.

In der Vergangenheit wurden großflächig Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit montaner Waldgebiete eingeleitet. Vor allem wurden zum Ausgleich der Säureeinträge in großem Umfang Kalkungen und andere Düngungsmaßnahmen durchgeführt. Diese Aktivitäten sind durchaus umstritten, da sie einen erheblichen Eingriff in den stofflichen Landschaftshaushalt darstellen und Organismen der Waldökosysteme beeinträchtigen können. Es ist zu erwarten, dass künftige Kompensations-Düngemaßnahmen, insofern sie auch weiterhin als erforderlich angesehen werden sollten, nicht mehr flächendeckend erfolgen müssen, sondern gezielt in bestimmten Gebieten mit versauerten Einzugsgebieten eingesetzt werden können.

Tab. 9.2: Hydrochemische Kenngrößen der untersuchten Quellwässer

	Thüringer Wald	Thüringer Schiefergebirge	Frankenwald	Fichtelgebirge	Erzgebirge
Proben (n =)	48	50	206	261	50
pH-Werte (Extrema)	4,95 - 7,23	4,20 - 7,80	3,57 - 8,57	3,46 - 7,04	4,11 - 5,53
pH 3-4 (%)	0 (0,0)	0 (0,0)	2 (0,9)	10 (3,9)	0 (0,0)
pH 4-5 (%)	1 (2,1)	11 (22,0)	29 (14,0)	130 (50,2)	38 (76,0)
pH 5-6 (%)	22 (45,8)	16 (32,0)	40 (19,3)	91 (35,1)	12 (24,0)
pH 6-7 (%)	23 (47,9)	19 (38,0)	84 (40,6)	25 (9,6)	0 (0,0)
pH 7-8 (%)	2 (4,2)	4 (8,0)	50 (24,1)	2 (0,8)	0 (0,0)
pH > 8 (%)	0 (0,0)	0 (0,0)	2 (0,9)	0 (0,0)	0 (0,0)
Calcium [$\mu\text{Mol/l}$]	111 - 654	9 - 1392	32 - 1138	26 - 1116	51 - 394
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	289	226	176	111	177
Magnesium [$\mu\text{Mol/l}$]	17 - 256	12 - 822	20 - 456	9 - 348	31 - 159
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	78	122	126	58	69
Kalium [$\mu\text{Mol/l}$]	0 - 261	2 - 46	0 - 79	4 - 79	14 - 54
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	72	14	12	29	33
Aluminium [$\mu\text{Mol/l}$]	0 - 12,3	0 - 85	0 - 164	0 - 154	0 - 150,1
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	1	11	5	28	48
Nitrat [$\mu\text{Mol/l}$]	35 - 194	10 - 630	0 - 1068	0 - 361	34 - 177
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	109	111	130	96	91
Sulfat [$\mu\text{Mol/l}$]	61 - 412	63 - 971	69 - 859	5 - 955	53 - 500
Mittelwert [$\mu\text{Mol/l}$]	225	305	227	162	298
Leitfähigkeit [$\mu\text{S/cm}$]	44,3 - 443	33,5 - 387	69,5 - 706	26 - 404	38,4 - 184,7
Mittelwert [$\mu\text{S/cm}$]	120	146	132	85	90

6. Zusammenfassung

In den verglichenen Mittelgebirgen Thüringer Wald, Thüringer Schiefergebirge, Frankenwald, Fichtelgebirge und Erzgebirge wurden jeweils mindestens 48 Quellen hydrochemisch untersucht. Diese Quellen wurden i.d.R. auf der Grundlage eines Rasters systematisch ausgewählt und im Verlauf eines Jahres mehrfach beprobt. Sie wurden als Dauerflächen kartiert und ihre exakte Lage festgehalten. In Fichtelgebirge und Frankenwald wurde eine höhere Grundgesamtheit untersucht, weshalb dort von der systematischen Verteilung der Messpunkte abgewichen werden konnte. Mit den ausgewiesenen Dauerflächen ist die Grundlage für künftige Vergleichsuntersuchungen gelegt. Eine räumlich differenzierte Beurteilung der Belastungssituation von Waldgebieten, und von deren zeitlicher Veränderung, wird angestrebt.

In diesem Beitrag werden die Daten der ersten Untersuchungsreihen miteinander verglichen. Es werden die Quellwasseranalysen aus den Sommerhalbjahren benutzt, da sie am ehesten einem Gleichgewichtszustand entsprechen und nicht kurzfristigen Schwankungen unterliegen, wie sie während der Schneeschmelze auftreten. Die bearbeiteten Mittelgebirge zeigen sich für eine Reihe von Messparametern räumliche Muster, die ökologisch gut interpretiert werden können. Insgesamt ist ein Gradient von West nach Ost zu erkennen. Dieser geht jedoch mit einem Wechsel der geochemischen Eigenschaften des Ausgangsgesteins einher (Porphyry im Westen, dann Tonschiefer, dann Granit), so dass eine abschließende Interpretation der Messwerte im Hinblick auf die Belastungssituation der Waldeinzugsgebiete nicht möglich ist. Es wird jedoch angestrebt, weitere Mittelgebirge zu bearbeiten.

Literatur

- ALMER, B. (1974): Effects of acidification on Swedish lakes. *Ambio* **3** (1): 30-36
- AUDORFF, V. (1997): Vergleichende Untersuchung der Vegetationsdynamik und wasserchemischer Gegebenheiten von Waldquellfluren in Frankenwald und Fichtelgebirge. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Pflanzenökologie, Universität Bayreuth, 83 S.
- BACHE, B.W. (1980): The acidification of soils. In: HUTCHINSON, T.C., M. HAVAS (Hrsg.): Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. 183-202, New York
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1995): Internationales Symposium – Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen – Sanierungsstrategien. Informationsberichte Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Heft **3/95**: 175-182
- BEAMISH, R.J. (1976): Acidification of lakes in Canada by acid precipitation and the resulting effects on fishes. *Water, Air and Soil Pollution* **6**: 501-514
- BEIERKUHNLIN, C. (1991): Räumliche Analyse der Stoffausträge aus Waldgebieten durch Untersuchung von Waldquellfluren. *Die Erde* **122**: 291-315
- BEIERKUHNLIN, C. (1994): Waldquellfluren im Frankenwald - Untersuchungen zur reaktiven Bioindikation. *Bayreuther Forum Ökologie* **10**: 253 S.
- BEIERKUHNLIN, C., W. DURKA (1993): Beurteilung von Stoffausträgen immisionsbelasteter Waldökosysteme Nordostbayerns durch Quellwasseranalysen. *Forstw. Cbl.* **112**: 225-239

- DICKSON, W. (1975): Acidification of Swedish lakes. Inst. of Freshwater Research Rep. **54**: 8-20, Drottningholm
- DURKA, W. (1994): Isotopenchemie des Nitrat, Nitrataustrag, Wasserchemie und Vegetation von Waldquellen im Fichtelgebirge (NO-Bayern). Bayreuther Forum Ökologie **11**: 197 S.
- DURKA, W. & E.-D. SCHULZE (1992): Hydrochemie von Waldquellen des Fichtelgebirges - Ein Indikator für den Stoffhaushalt von Waldökosystemen. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. **4**: 217-226
- FAUTH, H. (1984): pH-Gewässerkarte der Bundesrepublik Deutschland und ein Beispiel für ein regionales Detailergebnis. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Materialien **1/84**: 149-152
- GORHAM, E. & W.W. McFEE (1980): Effects of acid deposition upon outputs from terrestrial to aquatic ecosystems. in: HUTCHINSON, T.C. & M. HAVAS (Hrsg.): Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, 465-480, New York
- HAMM, A. (1984): Vergleichende Untersuchungen zur pH-Wert-Situation in Beziehung zu anderen chemischen Parametern in Gewässern im nord- und nordostbayerischen Raum, Spätherbst 1983. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Materialien **1/84**: 39-49
- HAMM, A. (1995): Saure Niederschläge und ihre Folgen für die Gewässer. Informationsberichte Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Heft **3/95**: 37-44
- HAUHS, M. (1985): Der Einfluß des Waldsterbens auf den Zustand von Oberflächengewässern. Z. dt. Geol. Ges. **136**: 585-597
- KREBS, M. & K. MORITZ (1995): Deposition von Luftschadstoffen in Waldgebieten Bayerns. Informationsberichte Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Heft **3/95**: 57-70
- KRIETER, M. & K. HABERER (1985): Gefährdung des Grundwassers durch saure Niederschläge. Vom Wasser **64**: 219-242
- LENHART, B. & C. STEINBERG (1984): Limnochemische und limnobiologische Auswirkungen der Versauerung von kalkarmen Oberflächengewässern - Eine Literaturstudie. Informationsberichte Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Heft **4/84**: 210 S.
- PEINTINGER, P. (1998): Hydrochemische und vegetationskundliche Untersuchungen an Waldquellen im Thüringer Wald. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Biogeographie, Universität Bayreuth, 94 S.
- RIEDEL, R. (1999): Vergleichende Untersuchungen an Waldquellfluren des Westlichen Erzgebirges anhand floristischer und hydrochemischer Parameter. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Biogeographie, Universität Bayreuth, 114 S.
- SCHMIDT, J. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der Bioindikation an Waldquellen des Hohen Thüringer Schiefergebirges. Diplomarbeit Lehrstuhl Biogeographie, Universität Bayreuth, 130 S.
- SCHMITT, P., R. LEHMANN & J. BAUER (1987): Gewässerversauerung im ost- und nordostbayerischen Grundgebirge. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Texte **22/87**: 66-75
- STEIDLE, L. & P. PONGRATZ (1984): Versauerung von Oberflächengewässern im Fichtelgebirge. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Materialien **1/84**: 24-38
- STUMM, W., J.J. MORGAN & J.L. SCHNOOR (1983): Saurer Regen, eine Folge der Störung hydrogeochemischer Kreisläufe. Naturwissenschaften **70**: 216-223
- ULRICH, B. (1986): Natural and anthropogenic components of soil acidification. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **149**: 702-717
- WRIGHT, R.F., T. DALE, E.T. GJESSING, G.R. HENDREY, A. HENDRIKSEN, M. JOHANESSEN, J.P. MUNIZ (1976): Impact of acid precipitation on freshwater ecosystems in Norway. Water, Air and Soil Pollution **6**: 483-499.

