

# Bericht zur Versauerung der Umwelt

 Medienübergreifende Bewertung der Versauerung  
der letzten drei Dekaden in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg



# Bericht zur Versauerung der Umwelt

 Medienübergreifende Bewertung der Versauerung  
der letzten drei Dekaden in Baden-Württemberg

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	ARGE Arbeitsgemeinschaft Versauerung der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Klaus-Peter Barufke, Werner Borho, Christiane Lutz-Holzhauser, Dr. Andreas Prüefß, Kay Rahtkens (Vorsitz), Renate Semmler-Elpers; zeitweilig: Yvonne Buchleither, Corinna Croner, Sabina Drechsler Grafik und Satz: Michael Keßler
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg ARGE Versauerung
<b>BEZUG</b>	Die Broschüre ist kostenlos bei der Verlagsauslieferung der LUBW erhältlich JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstraße 111, 68169 Mannheim Telefax 06 21/3 98-3 70 <a href="mailto:bibliothek@lubw.bwl.de">bibliothek@lubw.bwl.de</a> Kostenfreier Download: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a> <a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de</a> > Umweltbeobachtung > ID U93-S1-J09
<b>ISBN</b>	987-3-88251-343-1
<b>STAND</b>	Januar 2010
<b>DRUCK</b>	Nino Druck GmbH, Im Altenschemel 21, 67435 Neustadt Gedruckt auf Recyclingpapier
<b>BILDNACHWEIS</b>	Die uneingeschränkten Nutzungsrechte liegen bei der LUBW.

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

**ZUSAMMENFASSUNG**

**1 EINLEITUNG**

1.1	Geschichte der Versauerung	9
-----	----------------------------	---

**2 FACHLICHE EINFÜHRUNG**

2.1	Was ist Versauerung?	11
2.2	Wie wirkt Versauerung?	12

**3 DATENGRUNDLAGEN UND METHODEN**

3.1	Atmosphäre	17
3.2	Biosphäre	17
3.3	Pedosphäre	18
3.4	Hydrosphäre	18

**4 LANDESWEITE TRENDS DER VERSAUERUNG**

4.1	Die Situation in der Atmosphäre	22
4.2	Die Situation in der Pedosphäre	23
4.3	Die Situation in der Hydrosphäre	24
4.4	Die Situation in der Biosphäre	29

**5 ERGEBNISSE AUS DEN VERSAUERUNGSENSITIVEN GEBIETEN VON BADEN-WÜRTTEMBERG**

5.1	Das Einzugsgebiet von Alb, Murg und Schön Münzach im nördlichen Schwarzwald	34
5.2	Das Einzugsgebiet von Eyach, Enz, kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald	43
5.3	Das Einzugsgebiet von Oosbach, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald	50
5.4	Das Einzugsgebiet von Kinzig, Wolfach, Schiltach, Gutach und Erlenbach im Mittleren Schwarzwald	57
5.5	Das Einzugsgebiet von Elz, Wilde Gutach, Dreisam, Brugga im Hochschwarzwald	63
5.6	Das Einzugsgebiet von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald	69
5.7	Das Einzugsgebiet von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese im südlichen Schwarzwald	75
5.8	Das Einzugsgebiet von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald	81
5.9	Das Einzugsgebiet von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland	87

**6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK**

6.1	Die atmosphärischen Stickstoffeinträge sind noch zu hoch	93
6.2	Die Bodenversauerung ist bei forstlicher Nutzung von Bedeutung	93
6.3	Anthropogen versauerte Grundwässer treten vereinzelt auf	94

6.4	Die Qualität der Lebensräume hat sich verbessert	94
6.5	Im Nordschwarzwald und im Odenwald sind Verbesserungen möglich	95
6.6	Globale Emissionen beeinflussen die Situation im Land	96
6.7	Maßnahmen gegen die Versauerung können auch negative Folgen haben	96
6.8	Die Aktualisierung des Berichtes erfolgt durch kurze Fachbeiträge	97
<b>7</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>98</b>

# Zusammenfassung

Durch den „Sauren Regen“ verursachte Umweltschäden waren ein Anlass für umfassende Luftreinhaltemaßnahmen ab den 1980er Jahren. Welche Bedeutung die anthropogene Versauerung heute noch für Baden-Württemberg hat, wurde von einer Arbeitsgemeinschaft der LUBW durch Zusammenführung von bis zu drei Dekaden umfassenden Datenreihen der landesweiten Messnetze medienübergreifend ausgewertet. Letztmalig wurde die Versauerungssituation vor 15 Jahren dokumentiert.

Ergebnisse:

(1) Die atmosphärischen Säureeinträge haben sich in Baden-Württemberg in den letzten 25 Jahren im Mittel von 2,0 auf 1,0 kmol<sub>c</sub>/ha a (Kilomol Säureäquivalent je Hektar und Jahr; Standardeinheit für den Säureeintrag) halbiert. Dieser Rückgang wurde im Wesentlichen durch die Emissionsminderung bei SO<sub>2</sub> ermöglicht. Derzeit sind die atmosphärischen Säureeinträge maßgeblich durch NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> Emissionen verursacht und immer noch zu über 90 % anthropogen. Die atmosphärischen Säureeinträge sind in den von Natur aus extrem sauren und pufferarmen Gebieten Nord-Schwarzwald und Odenwald besonders spürbar.

Die zweite, heute stellenweise ebenso wichtige Ursache der anthropogenen Versauerung ist die Landnutzung. Die Entnahme von Erntegütern wirkt grundsätzlich versauernd. Im Boden addieren sich die Effekte von atmosphärischen Säureeinträgen und nutzungsbedingter Säurebildung. In der Landwirtschaft wird diese versauernde Wirkung in der Regel durch Kalkung ausgeglichen. In der Forstwirtschaft kann die Entnahme von Holz, insbesondere wenn die Rinde nicht im Wald verbleibt und nicht gekalkt wird, zu einer nutzungsbedingten Bodenversauerung in der Größenordnung von bis zu 1,0 kmol<sub>c</sub>/ha a führen. In Baden-Württemberg sind 600.000 ha Waldfläche in pufferarmen Gebieten betroffen.

(2) Versauerungsbedingte Veränderungen der Lebensräume sind in Baden-Württemberg heute kein Problem in der Fläche mehr. Das belegt der Zustand der Flechten. Die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* signalisiert bei alleinigem Vorkommen eine extrem hohe Belastung mit SO<sub>2</sub>. Landesweit ist ihr Anteil seit 1985 rückläufig. Die Flechtenkartierung zeigt dabei, dass der nordwestliche Teil von Baden-Württemberg nach wie vor stärker von sauren Immissionen geprägt ist als der südliche Landesteil.

In hochgelegenen, naturnahen Seen des Schwarzwaldes wurden in den 1980er Jahren Schäden bei Amphibien festgestellt. Die versauerungsbedingten Laichschäden und Schäden in den Anfangsstadien der Amphibienentwicklung sind an fast allen untersuchten Schwarzwaldseen seit Mitte der 1990er Jahre zum Teil deutlich zurückgegangen. Allerdings wurde bislang keine Erweiterung des Artenspektrums festgestellt. Ob dies versauerungsbedingt ist oder andere Gründe hat kann derzeit nicht beurteilt werden.

Auch Fließgewässer waren von der anthropogenen Versauerung betroffen. Heute weisen sieben von acht untersuchten Bächen in den versauerungssensitiven Gebieten eine höhere Bachforellendichte oder eine bessere Altersstruktur auf als in den Jahren bis 1995. Ein Überleben der Bachforelle scheint in diesen Bächen gesichert zu sein. Die Lebensgemeinschaft des Makrozoobenthos weist beim Vergleich der Jahre 1995 und 2007 eine Zunahme säureempfindlicher Arten auf und deutet somit auf eine Verminderung

der Säurebelastung der Fließgewässer hin. Abnehmende Schwermetallgehalte in der Regenwurmart *Lumbricus rubellus* seit den 1980er Jahre belegen die Verbesserung des Lebensraumes für Regenwürmer in Böden unter Wald.

Für die Pflanzen und Tiere, die sich teilweise an das von Natur aus saure Milieu gut angepasst haben, sind aber die Lebensbedingungen im Einzugsgebiet der Bachoberläufe des Schwarzwaldes und Odenwaldes noch anfällig gegenüber Versauerungsschüben in Folge von Starkniederschlägen und Schneeschmelze.

(3) Nur in den Gebieten mit von Natur aus pufferarmen Gesteinen im Schwarz- und Odenwald - das sind 20 % der Landesfläche - treten natürlich saure und anthropogen verstärkt versauerte Grundwässer mit pH-Werten  $< 6,5$  auf. In diesen Gebieten wurde an oberflächennahen Quellen eine Stabilisierung der Versauerungssituation beobachtet. Seit dem Beginn zeitlich hochauflösender pH-Wertmessungen Mitte der 1990er Jahre sind erheblich seltener oder keine pH-Wert-Absenkungen zu beobachten. Allerdings zeigt der langfristige pH-Trend im Quellwasser keine deutliche Tendenz (hier seit den 1960er Jahren).

Die Rohwässer aus oberflächennah gespeisten Quellen im Schwarzwald und im Odenwald sind von der anthropogenen Versauerung betroffen, da diese insbesondere bei hohen Niederschlägen durch gering gepufferte Wässer gespeist werden. Es ist zu erwarten, dass sich eine weitere Minderung der atmosphärischen Säureeinträge bei den Wasserversorgungen in jeder 5ten bis 10ten Gemeinde im Schwarzwald und Odenwald positiv bemerkbar machen wird. Jedoch wird hier trotz erwarteter zukünftiger Verbesserungen die technische Entsäuerung weiterhin unumgänglich sein, da die natürliche Versauerung der stärkere Einflussfaktor ist.

(4) Für die Summe der atmosphärischen und nutzungsbedingten Säurebelastung im Schwarzwald und Odenwald könnte sich ein Zielwert um  $1 \text{ kmol}_e/\text{ha}/\text{Jahr}$  als praktikabler Kompromiss für die Bodenfruchtbarkeit, die Lebensgemeinschaften und das Trinkwasser erweisen. Bei Emissionsminderungsmaßnahmen muss der technisch notwendige Energie- und Rohstoffeinsatz berücksichtigt werden. Durch Kalkung von Böden kann der Bodenversauerung entgegengewirkt werden, die Nachteile dieser Maßnahme sind neben dem Ressourceneinsatz eine mögliche Stickstoffauswaschung und  $\text{CO}_2$ -Freisetzung. Das medienübergreifende Versauerungsmonitoring soll auf einem Gebiet im Odenwald und im Nord-schwarzwald zur besseren Bestimmung des natürlichen und anthropogenen Anteils der Versauerung konzentriert werden.

# 1 Einleitung

## 1.1 Geschichte der Versauerung

Beim Verbrennen von fossilen Energieträgern wie beispielsweise Kohle oder Erdöl werden Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Stick(stoff)oxide ( $\text{NO}_x$ ) freigesetzt.  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  können in der Atmosphäre mit Wasser zu Schwefelsäure und Salpetersäure reagieren. Diese Säuren gelangen mit den Niederschlägen auf Pflanzen, Tiere, in Böden und Gewässer sowie auf Gebäude. Dort wirken sie verändernd auf die Artenzusammensetzungen, versauernd auf Böden und Gewässer und zerstörend auf Baudenkmäler. Aufgrund der versauernden Wirkung wurde der Begriff vom „Sauren Regen“ geprägt.

Zu Beginn des 19. Jahrhundert traten versauernde Wirkungen überwiegend in der Nähe der Emissionsquellen in Städten auf. Mit dem allgemeinen Trend der Schornsteinerhöhung in den 1950er Jahren wurden die Luftschadstoffe in höhere Luftschichten verlagert. Von dort aus wurden sie weiträumig und grenzüberschreitend in entferntere Regionen transportiert. Aus einem überwiegend regionalen Phänomen wurde ein weiträumiges globales Phänomen. In Schweden wurden Anfang der 1970er Jahre kristallklare Seen beobachtet, in denen kein Leben mehr existierte. Der Grund hierfür war die Versauerung der Gewässer, die mancher Orts den sehr niedrigen pH-Wert von 3 erreichte. In Deutschland wurde ab Anfang der 1980er Jahre das sogenannte „Waldsterben“ mit dem „Sauren Regen“ in Verbindung gebracht.

Deutschland reagierte auf diese Situation mit dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) von 1974 und 1983. Hierin wurden konkrete Vorgaben zur Luftreinhaltung gemacht. Durch den geforderten Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Steinkohlekraftwerken und Großfeuerungsanlagen konnte eine Reduzierung des Luftschadstoffs Schwefeldioxid erzielt werden. Dies war ein Meilenstein auf dem Weg zur Verbesserung der Luftqualität. Im Jahr 1986 folgte die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Da die Luftschadstoffe jedoch weiträumig transportiert werden, sind nationale Bemühungen zur Reinhaltung der Luft nicht ausreichend. Dies war der Auslöser für eine ganze Reihe internationaler Abkommen zur Luftreinhaltung der UN ECE bzw. zu

dem „Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung“ im Jahre 1979 in Genf (Genfer Konvention).

Auf dieser Basis wurden in den 1980er Jahren weitere internationale Protokolle zur Luftreinhaltung festgelegt. Mit dem Ziel den „Sauren Regen“ zu bekämpfen, verpflichteten sich die Unterzeichner des Protokolls von 1985 (Helsinki) erstmals, die Schwefelemissionen gegenüber 1980 um 30 % zu reduzieren. Mit dem Protokoll von Oslo 1994 erfolgte eine weitere Reduktion der Schwefelemissionen. Eine Abnahme der Stickstoffemissionen sollte über das Sofia-Protokoll von 1988 erreicht werden. Erstmals wurden mit dem Göteborg-Protokoll von 1999 Emissionshöchstgrenzen für die vier wichtigsten Vorläufersubstanzen, die für die Versauerung, Eutrophierung und das bodennahe Ozon verantwortlich sind, festgelegt. Dieses Protokoll (Multikomponentenprotokoll) wurde auf europäischer Ebene mit der NEC-Richtlinie (Nationale Emission Ceilings - RL 2001/81/EG) umgesetzt. Mit der 33. BImSchV vom Juli 2004, der Verordnung zur Verminderung von Sommersmog, Versauerung und Nährstoffeinträgen, wurden diese Vorgaben auf die Bundesebene übertragen. Dies bedeutet, dass bis zum Jahre 2010 in Deutschland die Emissionen von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) auf 520 kt/a, Stickoxide ( $\text{NO}_2$ ) auf 1.051 kt/a und von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) auf 550 kt/a zu begrenzen sind.

Bereits seit 1985 werden die Auswirkungen des „Sauren Regens“ auf Tiere und Pflanzen, Gewässer und Böden in Baden-Württemberg untersucht. Ziel dieses Berichtes ist es, auf Grundlage der an der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) erhobenen Messdaten einen bewertenden Überblick über die zeitliche und räumliche Entwicklung der Versauerung in Baden-Württemberg in den letzten drei Dekaden zu geben. Die Notwendigkeit einer medienübergreifenden Analyse und Bewertung ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass die Versauerung nicht nur sämtliche Umweltkompartimente betrifft, sondern diese Kompartimente (Atmo-, Bio-, Hydro-, Pedo- und Technosphäre) auch über komplexe Wechselbeziehungen miteinander verbunden sind.



## 2 Fachliche Einführung

### 2.1 Was ist Versauerung?

Unter Versauerung versteht man die Erhöhung der Wasserstoffionen-(H<sup>+</sup>)-Konzentration in der Umwelt. Diese Konzentration wird als pH-Wert gemessen. Niedrige pH-Werte entsprechen einem sauren Milieu, hohe (mit einem pH-Wert über 7) einem alkalischen Milieu. Versauerung ist im humiden, mitteleuropäischen Klimabereich ein natürlicher Prozess. Dieser ist auch in anthropogen unbeeinflussten Gebieten wirksam, kann aber durch anthropogene Einflüsse verstärkt werden (Abb. 2.1-1). Sowohl die Atmosphäre als auch Gewässer und Böden können von der Versauerung betroffen sein (Abb. 2.2-1).

#### ■ natürliche Säureinträge:

Unbelastete Niederschläge haben einen pH-Wert von ca. 5,6. Dieser pH-Wert stellt sich in der Atmosphäre im Gleichgewicht mit den dort vorhandenen säurebildenden Gasen ein. Unter natürlichen Bedingungen dominiert dabei die Kohlensäure, die sich aus gasförmigem CO<sub>2</sub>, das sich in Wolken und Niederschlagströpfchen löst, bildet.

Auch durch natürliche Emissionen entstehen in der Atmosphäre starke Säuren. Dazu zählt SO<sub>2</sub> aus Vulkanen und Waldbränden sowie Dimethylsulfid (DMS (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S) aus Algen der Ozeane, aus denen in der Atmosphäre Schwefelsäure entsteht. Durch Blitze, aber auch aus Böden werden NO<sub>x</sub>-Verbindungen freigesetzt, die in der Atmosphäre zu Salpetersäure umgewandelt werden. Weitere vulkanische

Emissionen wie Salzsäure (HCl) und Fluorwasserstoffsäure (HF) und natürliche Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) - Emissionen spielen nur eine geringe Rolle.

In der Pedosphäre (Böden) kommen weitere natürliche, ihrem Wesen nach biologische Säurequellen hinzu. So erhöhen die Wurzelatmung der Pflanzen und der mikrobielle Abbau der Streu den CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Bodenluft signifikant und damit den Kohlensäuregehalt im Bodenwasser. Durch Nitrifizierung stickstoffhaltiger Pflanzenteile und eingetragenen NH<sub>4</sub><sup>+</sup> entsteht zusätzlich Salpetersäure. Beim Abbau organischer Substanz entstehen aber auch eine Vielzahl mittelstarker bis starker organischer Säuren, wie etwa Essig- oder Oxalsäure. Lebende Pflanzen geben darüber hinaus organische Säuren aktiv über die Wurzeln ab, um im Boden fixierte Nährstoffe aufzuschließen.

#### ■ anthropogener Beitrag zur Versauerung:

Anthropogene Säureinträge verstärken die natürliche Versauerung. In den letzten 100 Jahren gelangten - bis Mitte der 1980er Jahre zunehmend - säurebildende Abgase aus Industrie, Verkehr, intensiver Landwirtschaft und Hausbrand in die Atmosphäre. Seit Anfang der 1990er Jahre sind die Emissionen rückläufig. Bei Verbrennungsprozessen werden allgemein NO<sub>x</sub>-Verbindungen (NO, NO<sub>2</sub>) freigesetzt und je nach Schwefelgehalt des Brennstoffs und Abgasnachbehandlung zusätzlich SO<sub>2</sub>. NH<sub>3</sub> wird durch die Landwirtschaft emittiert. Nach einer Schätzung

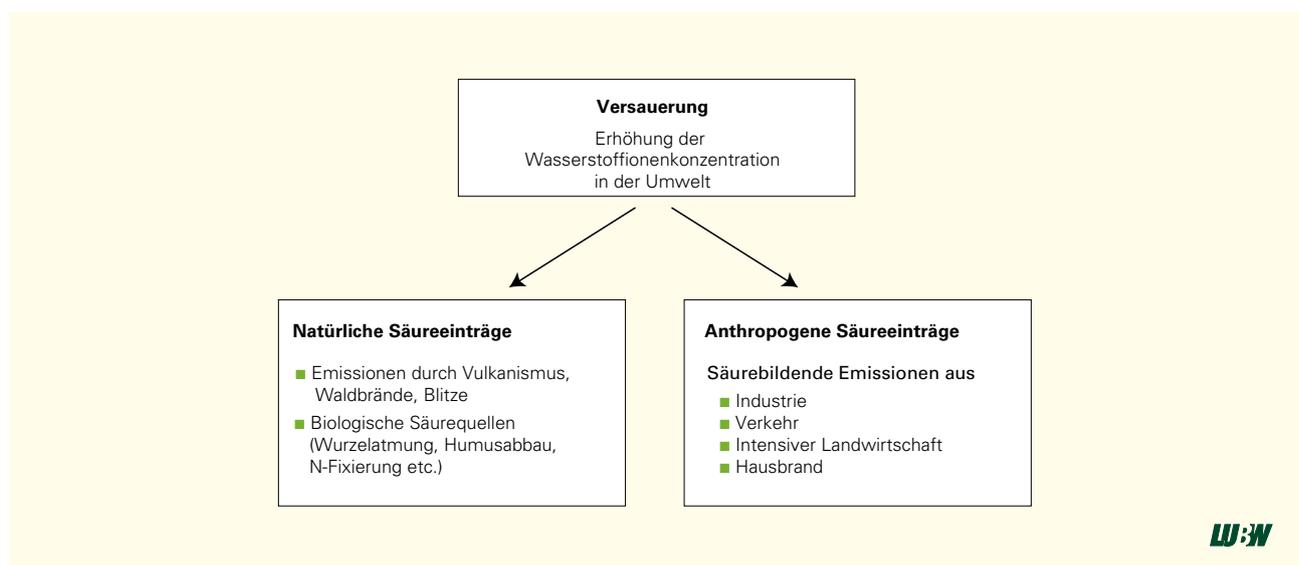
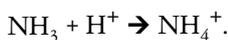


Abb. 2.1-1: Schematische Darstellung der Versauerung durch natürliche und anthropogene Säureinträge

des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landwirtschaft [BUWAL 1996] beträgt der Anteil der anthropogenen Emissionen an den maßgeblichen Gasen, die (starke) Säuren bilden ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ ), rund 98 % (Stand 1995). Demgegenüber spielt die anthropogene Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre als Säurequelle bei der Fragestellung der terrestrischen Versauerung keine dominante Rolle, hier überwiegt sehr deutlich der biogene Anteil in der Bodenluft (Bodenluft ca. 1-2 % gegenüber aktuell 0,037 %  $\text{CO}_2$ -in der Atmosphäre).

Die Verweildauer der Gase und Partikel in der Atmosphäre ist von den meteorologischen und chemischen Verhältnissen abhängig und beträgt mehrere Tage bis Wochen. Daraus resultiert die weiträumige Verbreitung von Schwefel und Stickstoffverbindungen, die über Entfernungen von mehreren tausend Kilometern erfolgen kann.

Indirekt versauernde Wirkungen gehen von der Landnutzung aus. So wird aus Tierhaltung und Ammoniumdüngung Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) emittiert. In Wolken und Regentropfchen gelöst, reagiert Ammoniak unter Aufnahme eines Protonenäquivalentes (basisch) sehr schnell zu Ammonium:



Durch Niederschläge in Böden eingetragen wird Ammonium mikrobiell zu Nitrat oxidiert (Nitrifikation), so weit dieses nicht sofort durch Pflanzen aufgenommen wird. Als Nebenprodukt entstehen zwei Äquivalente Protonen:



In der Nettobetrachtung wirken landwirtschaftliche Ammoniumemissionen also versauernd.

Des Weiteren wirken Ernteentzüge von Nährkationen wie Ca, Mg und K versauernd auf Böden [vgl. UMEG 2003]. Großflächige Versauerungsschübe entstehen in der Folge von Kahlschlag bzw. Sturmschäden durch Mineralisierung des in der Auflage und im Oberboden organisch gebundenen Stickstoffs. Auch Fichtenmonokulturen forcieren die Versauerung durch Produktion schwer abbaubarer Nadelstreu, aus der organische Säuren gebildet werden.

Die genannten Prozesse werden in Abbildung 2.2-3 illustriert. Dargestellt ist die typische pH-Veränderung, die das Niederschlagswasser bei der Passage durch das Kronendach der Bäume, die organische Auflage, den Boden bis hin zum Quellaustritt erfährt und zwar am Beispiel eines Standorts unter Fichte auf pufferarmem Boden aus Buntsandstein. Abnahmen des pH-Wertes zeigen Säureproduktion an - hier im wesentlichen Nitrifikation eingetragenen Ammoniums und organische Säuren aus Streuabbau - Zunahmen des pH-Wertes zeigen Säureverbrauch durch Pufferung an (siehe hierzu Kapitel 2.2.2).

## 2.2 Wie wirkt Versauerung?

Naturgemäß lassen sich Art und Menge von umweltbeeinflussenden Stoffen häufig nicht direkt wahrnehmen. Sie müssen entweder durch biologische, chemische und/oder physikalische Methoden detektiert oder ihre Wirkung anhand von Bioindikatoren beobachtet werden (Abb. 2.2-1). Hierzu führt die LUBW seit über zwei Jahrzehnten Untersuchungen durch.

### 2.2.1 Atmosphäre

Säuren in der Atmosphäre entstehen erst in Verbindung mit Wasser aus den säurebildenden Gasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  etc.), die sich über den Niederschlag auf Böden und Gewässer (s. Kap. 2.2.2 und Kap. 2.2.3) auswirken.

Direkte Schäden durch Versauerung können an Denkmälern und Gebäuden hervorgerufen werden. Diese Effekte werden durch nitrifizierende Bakterien verstärkt, die  $\text{NH}_4^+$  zu salpetriger Säure und schließlich zu Salpetersäure oxidieren. Die dabei gebildeten anorganischen Säuren lösen Mineralien z.B. aus Sandstein und führen so zu den bekannten Schäden. Über den Eintrag von organischen Säuren aus der Atmosphäre ist hingegen wenig bekannt. Sie können jedoch mit Metallionen stabile Komplexe bilden und so den Lösungsprozess von Gestein beschleunigen.

## 2.2.2 Pedosphäre (Böden)

Der aktuelle pH-Wert des Bodens ist ein Ergebnis der natürlichen gesteinsbedingten Bodenentwicklung, der Niederschlagsintensität, der historischen Landnutzung, und der historischen atmosphärischen Säureinträge. Die Landnutzung wirkt sich über die Ernte und den Humusabbau negativ auf den Säurehaushalt aus.

Die natürliche Säure-Pufferkapazität des Bodens (Abb. 2.2-2) beschreibt die Fähigkeit des Bodens den Säureeinwirkungen über die Landnutzung und die atmosphärischen Einträge entgegen zu wirken. Die Pufferkapazität hängt im Wesentlichen von der Art des Ausgangsgesteins ab. Böden sind Gemische verschiedener Puffersubstanzen, die jeweils in bestimmten pH-Bereichen wirksam sind. Sie lassen sich grob in folgende Stoffgruppen mit zugehörigen Pufferbereichen einteilen: Karbonatpuffer pH 7,7 – pH 7; Austauscherpuffer pH 7,0 – 4,2; Silikat-/Al-Puffer pH 5 – 3;

Eisen-Puffer pH < 3 (alle gemessen als pH CaCl<sub>2</sub>). Natürliches Bodenwasser hat gegenüber der Bestimmung mit CaCl<sub>2</sub> um 0,5 bis 1 Einheit höhere pH-Werte. Die jeweilige Pufferkapazität (d. h. die von ihnen ohne pH-Änderung neutralisierbare Säuremenge) richtet sich dabei nach der im Boden jeweils vorhandenen Stoffmenge.

Sehr saure Böden entwickelten sich nacheiszeitlich auf pufferarmen Ausgangsgesteinen, wie Buntsandstein, Teilen des Kristallin und auf Sanden (vgl. Abbildung 2.2-2). Ein Karbonatpuffer fehlte hier völlig und auch die jeweils folgenden Puffersysteme waren schwach ausgeprägt, so dass heute in den Oberböden pH-Werte < 3, in den Unterböden um pH 4 herrschen. Gebiete mit diesen Gesteinen sind als versauerungssensitiv einzustufen. Ein typischer Boden in einem solchen Gebiet ist der Podsol. Er entwickelte sich nacheiszeitlich auf pufferarmen Ausgangsgesteinen bei gleichzeitig hohen Niederschlägen und

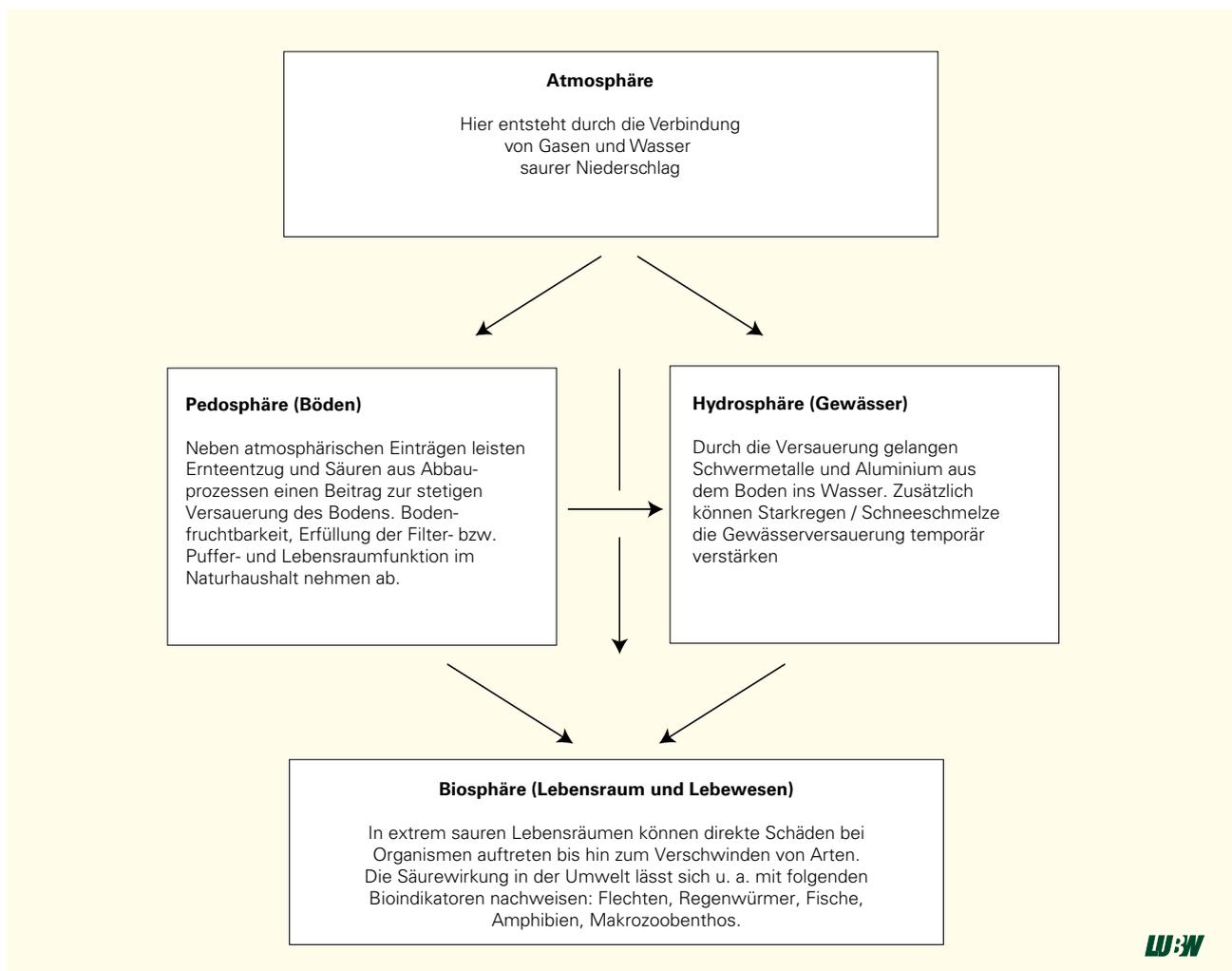


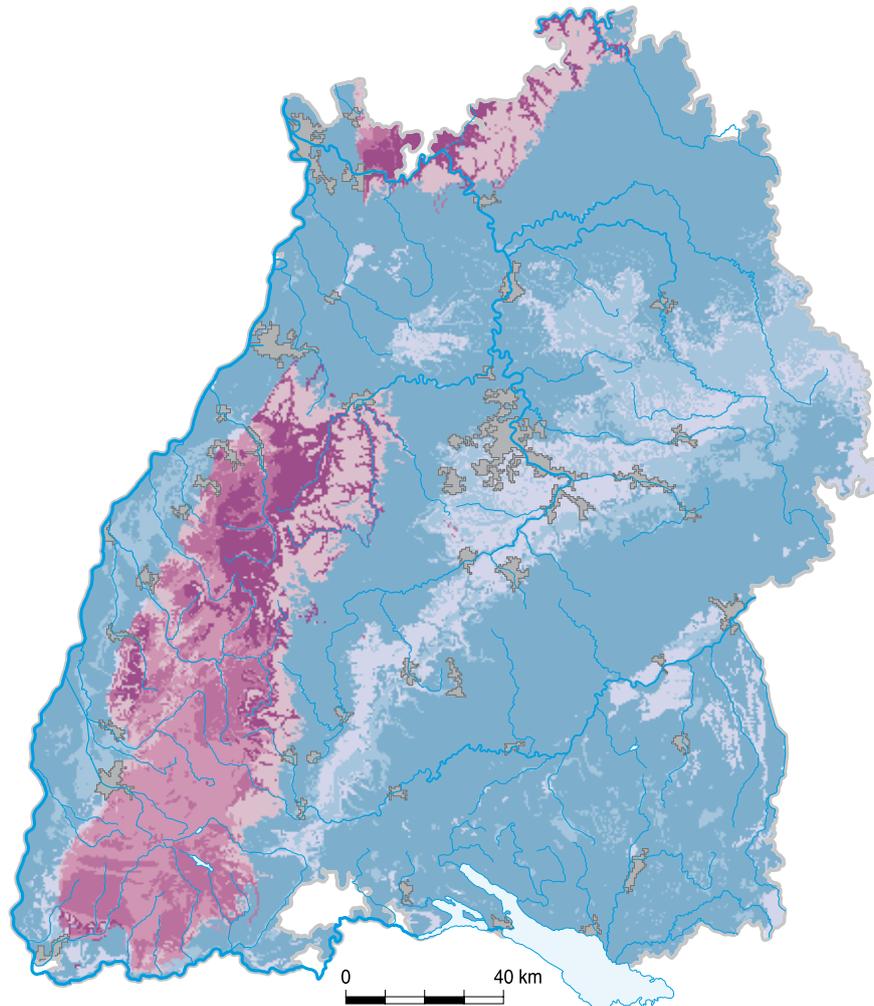
Abb. 2.2-1: Wirkungspfade der Versauerung

geringen Temperaturen. Er ist deshalb orografisch bedingt typisch für die Hochlagen des Untersuchungsgebietes im Buntsandstein. Bei seiner Entstehung nehmen starke organische Säuren eine Schlüsselrolle ein, die bei der mikrobiellen Zersetzung der schwer abbaubaren Nadelstreu unter ungünstigen Klimabedingungen entstehen.

Verbreitet liegen diese Böden zudem in Hanglage und neigen deshalb zum schnellen Zwischenabfluss. In diesen

Fällen kann das gering vorhandene Puffervermögen der Böden aus kinetischen Gründen nicht ausgeschöpft werden, so dass Säureflüsse nur gering gepuffert in Bäche und Flüsse gelangen können.

Böden mit sehr geringer Pufferkapazität reagieren empfindlicher, da der pH schneller absinkt. Die Versauerung ist mit einem Verlust an den Nährkationen Ca, Mg und K verbunden, an deren Stelle zunehmend  $H_3O^+$



Pufferkapazität		Geologischer Untergrund	
	sehr gering		Unterer und Mittlerer Buntsandstein
	sehr gering bis gering		Granit, Orthogneis, Quarzporphyr
	gering		Paragneis, Diatexit
	gering bis mittel		Oberer Buntsandstein
	mittel		(keine nähere Untergliederung)
	hoch bis sehr hoch		stellenweise carbonatisches Fest- bzw. Lockergestein
	sehr hoch		vorherrschend carbonatisches Fest- bzw. Lockergestein
	Siedlungen		



Abb. 2.2-2: Säure-Pufferkapazität der Böden Baden-Württembergs [UVM 2004]

(H<sup>+</sup>) und toxisches Aluminium treten. Gleichzeitig werden Schwermetalle wie Cadmium, Blei und Zink mit sinkendem pH mobilisiert.

Auf Ackerflächen, in jüngster Zeit aber auch auf Forstflächen, wirkt der Mensch der Bodenversauerung zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit durch Kalkungsdüngung entgegen.

### 2.2.3 Hydrosphäre

Nicht nur terrestrische Ökosysteme sind von Versauerung betroffen. So steht die Gewässerversauerung in engem Kontext zur Bodenversauerung, da die Gewässer aus den Böden und dem Ausgangsgestein gespeist werden. Versauerte Gewässer sind deshalb in Einzugsgebieten mit nur schwach puffernden Ausgangsgesteinen und Böden anzutreffen (Abb. 2.2-2).

Wie die terrestrischen, können auch die aquatischen Lebensgemeinschaften von der Versauerung negativ beeinflusst sein. Für eine Schädigung aquatischer Biozönosen reichen dabei mitunter schon sehr kurzzeitige Versauerungsereignisse aus, die durch ungepufferten oberflächlichen Abfluss, etwa nach Schneeschmelze oder Starkregen ausgelöst werden können.

Der im Gewässer wirksame Säurestress kann bei Gewässerorganismen zu Haut-, Organ- und Gewebeschädigungen sowie zur Verpilzung des Laiches (Sekundäreffekt) von Fischen, Amphibien und Gewässerbodenorganismen (Makrozoobenthos) führen [GEBHARDT et al. 1990, BÖHMER & RAHMANN 1992, GEBHARDT 1995, GEBHARDT 2007]. Infolgedessen kann es zu Beeinträchtigungen bishin zum Verlust ganzer Populationen in Bächen und Seen kommen. Auch die im Boden durch Säure mobilisierten Schwermetalle und Aluminium-Ionen können Gewässerorganismen schädigen.

Mit der Versauerung von Böden und Gewässern geht in manchen Gebieten auch eine Versauerung des Quell- und Grundwassers einher. Da das Grundwasser die Hauptgrundlage der Trinkwasserversorgung darstellt, ist es in Hinblick auf die menschliche Gesundheit von besonderem Interesse. Durch die Versauerung können vermehrt

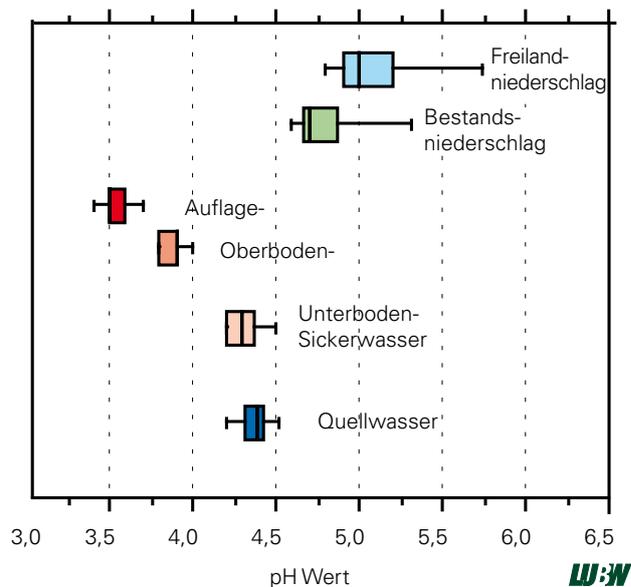


Abb. 2.2-3: pH-Verlauf von Niederschlagswasser bei der Passage durch Vegetation, Boden, Buntsandsteinaquifer bis Quellaustritt unter Fichte auf mittlerem Buntsandstein

Aluminium und Schwermetalle aus Boden und Aquifermaterial gelöst werden und im Grundwasser gesundheitsschädliche Konzentrationen erreichen. Stark saures Grundwasser kann bei Nutzung als Trinkwasser die Förderleitungen korrodieren, wodurch Schwermetalle auch aus dem Leitungsmaterial gelöst werden. Deshalb sieht die Deutsche Trinkwasserverordnung zum Schutz des Verbrauchers einen Mindest-pH-Wert von 6,5 vor. Unterhalb dieses Wertes sind Schwermetallfreisetzungen aus Wasserleitungen möglich. Wässer mit niedrigerem pH-Wert müssen deshalb vor der Abgabe an die Verbraucher aufbereitet werden z.B. durch Entsäuerung mit Kalk oder Belüftung, wobei sauerwirkendes Kohlendioxid entweicht.

### 2.2.4 Biosphäre (Lebensraum und Lebewesen)

Manche Tier- und Pflanzenarten verschwinden aus einem Lebensraum, wenn dieser zu sauer wird. Andere Organismen können sich zwar halten, zeigen aber Stresssymptome oder chronische Schädigungen.

Die Flechtenart *Lecanora comizaeoides* ist ein Indikator für atmogene Säureinträge, denn sie ist säureresistenter als die meisten anderen Flechtenarten und unter extrem sauren Umweltbedingungen oft die einzige Flechtenart, die überhaupt noch überleben kann.

Im Boden nimmt die mikrobielle Aktivität mit zunehmender Bodenversauerung deutlich ab. Die Folge der reduzierten biologischen Aktivität ist eine Verlangsamung des Streuabbaus, was zu einer unvollständigen Zersetzung der Streu und damit einer aus pflanzenphysiologischer Sicht gesehenen negativen Rohhumusanhäufung am Standort führen kann.

Die meisten Regenwurmarten meiden saure Böden und sterben auf diesen sehr sauren Böden mittelfristig aus (Reaktionsindikatoren). Die übrigbleibenden Arten leben überwiegend in der humosen Auflage der Waldböden. *Lumbricus rubellus* gehört zu den wenigen Arten, die auch in den sauren Nadelwaldböden des Odenwaldes und des Schwarzwaldes leben können. Steigt unter den sehr sauren Bedingungen in Böden die Mobilität von Schwermetallen, kann diese Art die durch Säure freigesetzten Schwermetalle in ihrem Körper anreichern (akkumulieren) und ist somit ein guter Akkumulationsindikator [LUBW 2006, RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

Pflanzen sind nicht nur indirekt über das Wurzel-Bodensystem betroffen, sondern auch direkt von Säureeinträgen aus der Luft. Schon bei der Passage des Regenwassers durch die Baumkrone kommt es zu einem Auswaschen von Mineralstoffen aus den Blättern. Dieser Effekt tritt besonders beim sauren Regen mit pH-Werten unter 5 auf. Sichtbare Zeichen für die Schädigung sind Absterbeerscheinungen (Nekrosen) von Blättern. Durch die Schädigung der Assimilationsorgane wird die Photosyntheseleistung der Bäume herabgesetzt.

Nicht nur Blätter und Nadeln sind durch die Depositionen beeinflusst. Auch der pH-Wert der Baumborke wird durch saures Stammabflusswasser erniedrigt. Eine Veränderung des spezifischen, von Baumart zu Baumart variierenden pH-Milieus der Borke ist eigens für die dort ansässigen Lebewesen (Epiphyten), wie die Moose und Flechten kritisch. Viele Arten werden dadurch direkt geschädigt oder in ihrer Vitalität so stark beeinträchtigt, dass sie von anderen, durch saure Immissionen in ihrer Konkurrenzkraft geförderte Arten, verdrängt werden.

Dass insbesondere Wälder von Versauerung betroffen sind, beruht auf dem sog. Auskämmeffekt der Bäume gegen-

über Luftmassen. Der Auskämmeffekt führt zu erheblich höheren Depositionsraten als in waldfreien Gebieten.

Säureschübe, die insbesondere bei Schneeschmelze und nach Starkregen auftreten, führen zu einem verstärkten, oberflächennahen Zwischenabfluss, bei dem nicht nur Wasser, sondern auch viele organische Säuren aus dem Abbau organischer Substanz kurzzeitig in die Fließ- und Stillgewässer eingetragen werden. Dort können Eier, Larven und Jungtiere von Fischen und Amphibien geschädigt werden. Im Extremfall können bei der Bachforelle ganze Jahrgänge ausfallen, wodurch es zu einer ungünstigen Alterspyramide (Altersstruktur) kommt. Sie sind durch ihre empfindliche Reaktion auf die Umweltbedingungen ein guter Reaktionsindikator. Eine Reihe solcher aufeinanderfolgender Jahre kann zum Erlöschen einer Population führen.

# 3 Datengrundlagen und Methoden

Mitte der 1990er Jahre wurde der Stand der Messungen und Erhebungen zum Zustand der Versauerung letztmalig dokumentiert [LfU 1994]. Die Tabelle 3-1 gibt den aktuellen Stand der Anzahl von Messstellen in versauerungs-sensitiven Gebieten wieder, die für die Trendanalysen in diesem Bericht genutzt wurden.

## 3.1 Atmosphäre

Datengrundlagen für die Beurteilung der Atmosphäre sind SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> Immissionsmessungen und Messungen der Gesamtdeposition im Freiland (bulk-Sammler) von SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> und NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Bei den Depositionsmessungen wurde keine Seesalzkorrektur durchgeführt. Der Anteil der durch NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Einträge verursachten Säureinträge wurde ab 2004 erfasst.

Die Gesamtdeposition wird als Einzelwert angegeben in mg/m<sup>2</sup> d oder speziell für die Beurteilung der versauernden Wirkung in Kilomol Säureäquivalent je Hektar und Jahr (kmol<sub>e</sub>/ha a), der Standardeinheit für den Säureeintrag (vgl. Abb. 4-4).

## 3.2 Biosphäre

Die Auswirkungen der Versauerung auf die biologische Situation verschiedener Kompartimente der Umwelt (Wald, Boden, Gewässer) werden seit Mitte der 1980er Jahre in verschiedenen Dauerbeobachtungsprogrammen der MUB Medienübergreifenden Umweltbeobachtung (ehemals Ökologisches Wirkungskataster) an Hand von Bioindikatoren ermittelt [LfU 1991, 1992a

Tab. 3-1: Anzahl der Messstellen der LUBW in den versauerungssensitiven Gebieten\*

Kompartiment	Messnetz	Parameter	Gebiet**								
			Bioindikator	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
Atmosphäre	Luftmessnetz***	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub>	2	1	1	0	1	0	1	1	1
	Depositionsmessnetz	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Biosphäre	Karseen	Amphibien	5	2	0	0	0	0	0	0	0
	MUB Fließgewässer	Bachforellen	2 (4)	24	1 (2)	2 (6)	0	1	1 (3)	0 (3)	0
	Fließgewässermessnetz****	Makrozoobenthos	57	16	24	57	27	17	28	13	6
	MUB Wald	Flechten	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hydrosphäre	MUB Wald	Regenwürmer	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fließgewässermessnetz	pH-Wert	0	1 (1)	0	5	2	0	0	1	2
Pedosphäre	Grundwassermessnetz	pH-Wert	9 (14)	3 (11)	3 (6)	7 (14)	3 (10)	4 (6)	1 (11)	3 (20)	1 (8)
	BMN Grundmessnetz	pH-Wert	1	2	2	1	2	0	5	1	2
	BMN Basismessnetz	pH-Wert	0	1	0	1	2	1	0	0	0
	BMN Intensivmessnetz	pH-Wert	0	2	0	0	0	0	0	1	0
	MUB Wald	pH-Wert	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Anmerkungen:

\* Anzahl der Messstellen im jeweiligen Einzugsgebiet, die für die Auswertung herangezogen wurden; in Klammern Gesamtzahl der Messstellen; BMN Bodennessnetz, MUB Medienübergreifende Umweltbeobachtung

- \*\* 5.1 Einzugsgebiet von Alb, Murg und Schönmünzsch im nördlichen Schwarzwald  
 5.2 Einzugsgebiet von Eyach, Enz, kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald  
 5.3 Einzugsgebiet von Oosbach, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald  
 5.4 Einzugsgebiet von von Kinzig, Wolfach, Schiltach, Gutach und Erlenbach im Mittleren Schwarzwald  
 5.5 Einzugsgebiet von Elz, Wilde Gutach, Dreisam, Brugga im Hochschwarzwald  
 5.6 Einzugsgebiet von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald  
 5.7 Einzugsgebiet von von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese im südlichen Schwarzwald  
 5.8 Einzugsgebiet von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald  
 5.9 Einzugsgebiet von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland

\*\*\* Gebiet 5.7 bis 2005

\*\*\*\* Stand 1995, Details siehe Kap. 4 und 5; einschließlich Quellen

und 1992b]. Ziel der Programme war und ist unter anderem die Beobachtung und Bewertung der Auswirkungen immissionsbedingter Versauerung. Im Bereich der Fließgewässer wurden aus den unterschiedlichen Naturräumen in Baden-Württemberg Oberläufe von Bächen mit natürlichem Vorkommen der Bachforelle ausgewählt. Inzwischen umfasst das Messnetz 38 Bäche, die in ein Intensiv- und ein Extensivmessnetz unterteilt sind und mit unterschiedlicher Untersuchungshäufigkeit beprobt und untersucht werden. Alle Bäche wurden zunächst in regelmäßigem Abstand von zwei Jahren, später in größeren Abstand befishet. Die gefangenen Bachforellen werden gezählt und vermessen (Länge, Gewicht) und in Altersklassen (juvenil, subadult und adult) eingeteilt (Reaktionsindikation auf Populationsebene). In diesen Bächen sind darüber hinaus auch gewässerchemische Untersuchungen zur Zeit der Schneeschmelze mit besonders niedrigen pH-Werten durchgeführt worden. In einem anderen Teilprogramm der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung wurden 60 Wald-Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet - verteilt über ganz Baden-Württemberg - an denen u. a. Flechten und Regenwürmer untersucht wurden.

### 3.3 Pedosphäre

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Bodendaten stammen von Grund- und Basismessstellen des Bodendauerbeobachtungs-Programms von Baden-Württemberg, die in den hier als versauerungssensitiv eingestuften Einzugsgebieten liegen. Um den Versauerungszustand der Böden zu kennzeichnen, werden an diesen Messstellen pH (CaCl<sub>2</sub>) - Messungen in den Bodenhorizonten in der Regel bis zum anstehenden Gestein durchgeführt. Entsprechende Messungen wurden 1989 an allen Messstellen durchgeführt, Wiederholungsmessungen liegen ab dem Jahr 2000 für ausgewählte Messstellen vor.

### 3.4 Hydrosphäre

Seit Ende der 1980er Jahre wurden in Baden-Württemberg in kleinen, saprobiell unbelasteten Fließgewässern in den kalkarmen, gering gepufferten „Weichwassergebieten“ Schwarzwald und Odenwald chemische und biologische Veränderungen im Zusammenhang mit versauernd wirkenden Luftschadstoffen beobachtet. Auf der Grundlage

von mehrjährigen chemischen und biologischen Messreihen wurde daraus ein Verfahren zur Indikation des Säurezustandes von Bächen anhand des Makrozoobenthos entwickelt [BRAUKMANN 1995]. Aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeit zahlreicher Bergbachorganismen gegenüber Säure erlaubt die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft der wirbellosen Kleintiere der Gewässersohle (Makrozoobenthos) eine Aussage über den Säuregrad des betreffenden Fließgewässers. Darüber hinaus bietet diese Organismengruppe den Vorteil, dass sie in allen Fließgewässern vorkommt und hinreichend langlebige Tiere umfasst, die eine biologische Indikation der ökologischen Situation über einen längeren Zeitraum von einigen Monaten bis mehreren Jahren erlaubt. Den häufigsten und wichtigsten Bergbachorganismen wurden zur Säureindikation Indikatorwerte von 1 (sehr säureempfindlich) bis 4 (sehr säureresistent) zugeordnet und diese in 4 Säureklassen eingeteilt (vgl. Abbildung 4.3.1-1). Zur Ermittlung des Säurezustands wurden nach dem Prinzip maximaler Empfindlichkeit von Bioindikatoren gegenüber einem vorherrschenden Umweltfaktor die Häufigkeitsklassen aller Indikatororganismen aufaddiert [siehe LfU 1998].

Mit der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurden für die Gewässerbewertung für alle relevanten biologischen Qualitätskomponenten neue Verfahrensvorschriften (Beprobung, Berechnung, Bewertung) entwickelt. Dabei steht die gewässertypspezifische, leitbildorientierte 5-stufige biologische Bewertung im Vordergrund. Daher ist eine Anpassung des ehemals 4-stufigen Säureindikationssystem auf ein 5-stufiges Bewertungssystem notwendig geworden. Nach den neuen WRRL-konformen Methoden weist die biologische Qualitätskomponente Makrozoobenthos im Modul Versauerung 5 Säureklassen aus (vgl. Abbildung 4.3.1-1).

Das Verfahren hat für die versauerungsgefährdeten Fließgewässertypen 5 (grobmaterialreiche, silikatische Mittelgebirgsbäche) und 5.1 (feinmaterialreiche, silikatische Mittelgebirgsbäche) Gültigkeit. Neben der neuen Klassifizierung wurden zusätzlich die Indikatortaxa neu zusammengestellt und teilweise neu eingestuft, sowie der Schwellenwert im Berechnungsverfahren von ehemals 5 auf 4 gesetzt. Da daher die Versauerungsergebnisse

aus den 1990er Jahren nur eingeschränkt mit den neuen Ergebnissen nach WRRL vergleichbar sind, wurden einerseits die neuen Daten mit dem alten Verfahren berechnet und die identischen Messstellen miteinander verglichen und andererseits alle Daten der Gewässertypen 5 und 5.1 aus dem neuen Monitoringmessnetz mit dem neuen Verfahren berechnet und dargestellt.

Das Grundwasserbeschaffenheitsmessnetz des Landes setzt sich aus mehreren Teilmessnetzen mit insgesamt 1.800 bis zeitweilig über 2.400 Messstellen zusammen (Basis-, Rohwasser-, Vorfeld-, verschiedene Emittentenmessnetze). Das Quellmessnetz besteht aus ca. 200 Messstellen. Die Messstellenverteilung deckt dabei alle hydrogeologischen Grundwasserlandschaften im Lande ab. Durch das Beschaffenheitsmessnetz wird das Grundwasser sowohl in anthropogen weitgehend unbeeinflussten Gebieten, mit dem Basismessnetz, als auch im oft anthropogen belasteten Abstrom von potentiellen Emittenten überwacht. Die Messstellen werden mindestens einmal jährlich untersucht. Vierzig Messstellen in besonders versauerungsgefährdeten Gebieten werden mehrmals im Jahr beprobt, um die zum Teil jahreszeitlich unterschiedlichen Versauerungssituationen zu erfassen. Diese Messstellen sind besonders geeignet, um Entwicklungen der Versauerungssituation aufzuzeigen. Als Versauerungsparameter wird hier der pH-Wert gemessen.

Bei den für Trendbetrachtungen zur Versauerung nicht geeigneten Messstellen liegt zum Teil zwar auch saures Grundwasser vor, jedoch zeigt sich in den chemischen Analysen, dass hier auch direkte anthropogene Beeinflussungen durch Landwirtschaft, Industrie und Siedlungen vorliegen, so dass evtl. Verbesserungen bei der Versauerung auf Kalkdüngungen oder Bauaktivitäten mit kalkhaltigen Materialien zurückgeführt werden könnten. Auch liegen hier zum Teil sinkende pH-Werte vor, welche auf nachlassende Einflüsse von alkalischem Abwasser oder von Infiltrationen von gereinigtem Abwasser führenden Bächen zurückgeführt werden können. Ungereinigte und gereinigte Abwässer sind meist alkalisch und enthalten große Mengen an säureabpuffernden Substanzen wie z.B. Phosphate.



## 4 Landesweite Trends der Versauerung

Bereits Mitte der 1980er Jahre hat die damalige Landesanstalt für Umweltschutz umfangreiche Untersuchungsprogramme zur Erfassung der Versauerungszustände und deren Veränderungen im Laufe der Jahre gestartet. Daneben wurden auf Landes- und Bundesebene technische Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft getroffen.

Die in Baden-Württemberg bislang erreichten Emissionsminderungen der versauernd wirkenden Stoffe Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Im Zeitraum von 1985 bis 2006 gingen die Emissionen bei  $\text{SO}_2$  um rund 80 % und bei  $\text{NO}_x$  um rund 60 % zurück. Ammoniak wird hauptsächlich aus Massentierhaltung und Düngung in der Landwirtschaft emittiert. Hierzu liegen erst ab 1994 Daten vor. Zwischen 1994 und 2006 betrug die Reduktion bei  $\text{NH}_3$  6 %.

Die quellspezifische Entwicklung der Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen in Baden-Württemberg ist in den Abbildungen 4-2 und 4-3 dargestellt. Sie zeigen für beide Schadstoffe eine starke Abnahme. Ein Großteil der Emissionsminderungen in der Quellengruppe Industrie und Gewerbe wurde bei den Großfeuerungsanlagen erzielt. Die Emissionsminderungen wurden durch Abgasreinigungsanlagen, Sanierung oder Umstellung auf

umweltfreundlichere Energieträger sowie durch den Neubau von Anlagen mit modernster Technik erreicht.

Während jedoch bei den Schwefeldioxidemissionen der Hauptbeitrag von der Quellengruppe Industrie und Gewerbe stammt, ist und bleibt bei den Emissionen der Stickoxide der Verkehr der Hauptverursacher. Aber auch hier ist in den letzten 20 Jahren durch verbesserte Motorentechnik und den Einsatz von Katalysatoren ein Rückgang von 56 % zu verzeichnen.

Die Emissionen von Ammoniak sind in Baden-Württemberg von 1994 bis 2006 nur um 6 % zurückgegangen (Abb. 4-1). Hauptemittent ist die Landwirtschaft mit 53.600 t/a. Der Verkehr trägt mit 1.350 t/a zu den Ammoniak-Emissionen bei. Der Rückgang der Ammoniak-Emissionen ist im Bereich der Landwirtschaft erzielt worden, während die Ammoniakemissionen aus dem Verkehr in den letzten 14 Jahren um 35 % gestiegen sind.

Für die Interpretation der versauernden Wirkung der  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ -Emissionen werden die Emissionsmassen (Abb. 4-1) in „Versauerungsäquivalente“ umgerechnet (Abb. 4-4). Durch die Umrechnung wird die Gewichtung der verschiedenen Komponenten erkennbar. Aktuell wird

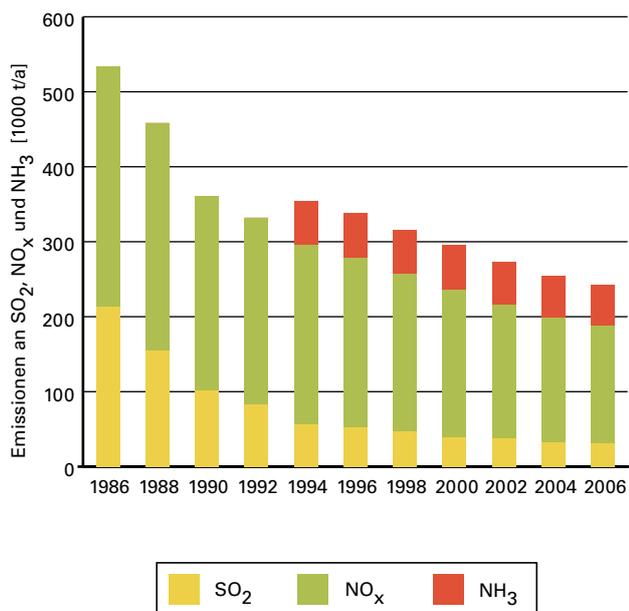


Abb. 4-1: Entwicklung der Emissionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  von 1986 bis 2006 (Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg bis 1992, ab 1994 Emissionskataster LUBW)

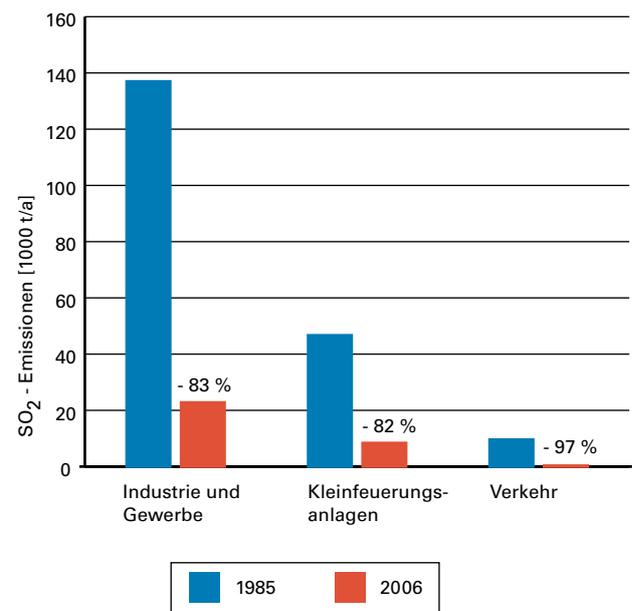


Abb. 4-2:  $\text{SO}_2$ -Emissionen in Baden-Württemberg in den Jahren 1985 und 2006 (Quelle: LUBW)

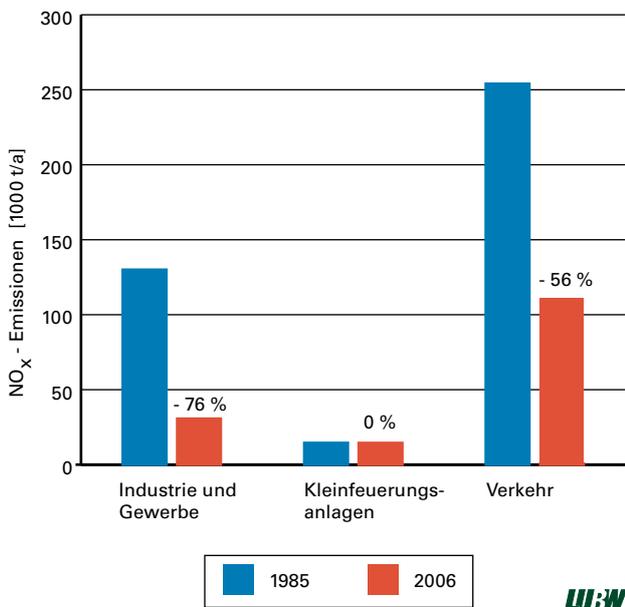


Abb. 4-3: NO<sub>x</sub>-Emissionen in Baden-Württemberg in den Jahren 1985 und 2006 (Quelle: LUBW)

die Versauerung überwiegend durch Stickstoffkomponenten verursacht.

Der jährliche Säureeintrag wird von den Emissionsmengen und dem Niederschlag bestimmt. Dabei ist nicht nur die Niederschlagssumme, sondern auch die Verteilung des Niederschlags über das Jahr entscheidend (vgl. Kap. 4.1).

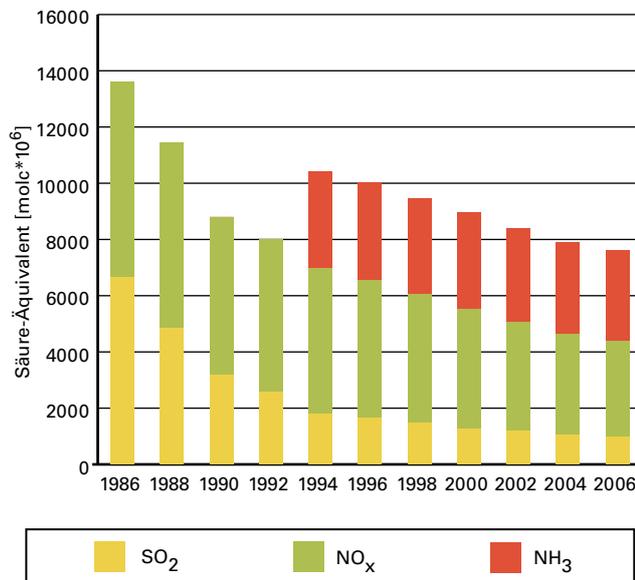


Abb. 4-4: Emissionsentwicklung der Säure-Äquivalente bedingt durch SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> von 1986 bis 2006 in Baden-Württemberg (aus Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg und der LUBW; Stöchiometrisch errechnet bezogen auf das wirksame Säure-Ion H<sup>+</sup> (die Berechnung erfolgt aus den Emissionsangaben von SO<sub>2</sub> (1/32), NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub> (1/46) und NH<sub>3</sub> (1/17) nach [www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de](http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de))

In Abbildung 4.1-1 wurde für den Schwarzwald aus den Niederschlagsstationen des DWD Freudenstadt, Baiersbronn, Breitenau und dem Feldberg eine mittlere jährliche Niederschlagssumme sowie ein 30-jähriges Mittel der Niederschlagssummen für die Jahre 1961-1990 gebildet. Hier fallen als „trockene“ Jahre die Jahre 1991, 1992, 1996 und 1997, 2003, 2004 und 2005 auf, während die Jahre 1994 und 1995, 1999, 2001 und 2002 und das Jahr 2007 in diesem Vergleich als „nass“ hervortreten.

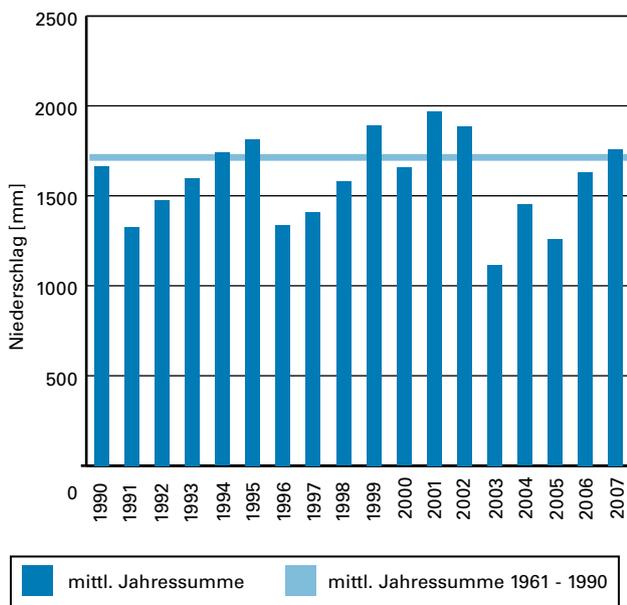
#### 4.1 Die Situation in der Atmosphäre

Die Säureeinträge durch Sulfat sind zwischen 1992 und 2007 in allen Regionen Baden-Württembergs deutlich reduziert worden (Abb. 4.1-3); am deutlichsten ist die Reduktion in den Ballungsgebieten von Karlsruhe und Mannheim, am geringsten im Schwarzwald.

Im gleichen Zeitraum haben die Säureeinträge durch Nitrat kaum abgenommen (Abb. 4.1-4). In den Abbildungen sind die Säureeinträge an den Depositionsmessstellen der LUBW nach Naturräumen zusammengefasst dargestellt. Beim zeitlichen Verlauf der Säureeinträge durch Nitrat fallen die Jahre 1992, 1996/97 und 2003-05 mit geringeren Säureeinträgen auf. Diese Jahre korrespondieren mit Jahren, die deutlich unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen zeigen (vgl. Abbildungen 4.1-1 und 4.1-4).

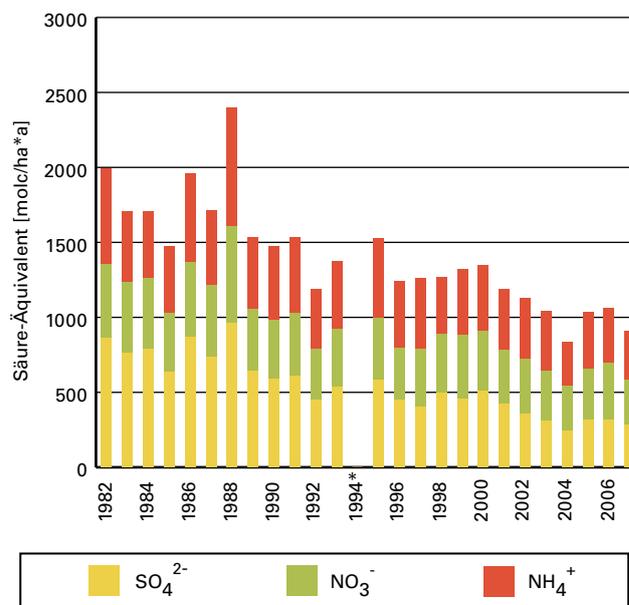
An der Messstation Schauinsland des Umweltbundesamtes existiert eine langjährige Messreihe, bei der die Säureeinträge durch Sulfat, Nitrat und Ammonium in der nassen Deposition (wet-only) erfasst werden (Abb. 4.1-2). Die Daten zeigen, dass dort seit 1982 der Säureeintrag insgesamt um ca. 50 % von 2,0 auf 1,0 kmol<sub>c</sub>/ha a zurückgegangen ist und der Säureeintrag durch Ammonium im Jahr 2006 in der gleichen Größenordnung wie der Säureeintrag von Sulfat bzw. Nitrat liegt.

Im gleichen Zeitraum sind die pH-Werte an der UBA-Station Schauinsland von ca. 4,2 im Jahr 1982 auf 5,0 im Jahr 2006 angestiegen (Abb. 4.1-5).



LUBW

Abb. 4.1-1: Mittlere Niederschlagssummen für den Schwarzwald im Zeitraum 1990 - 2007 (DWD-Stationen: Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau, Feldberg; Quelle DWD)



LUBW

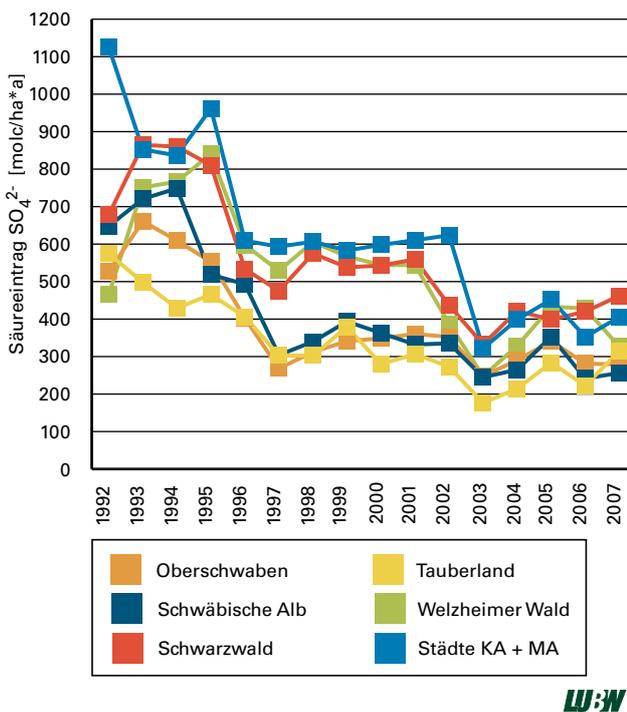
Abb. 4.1-2: Säureeinträge - hier nur Nasse Deposition - von Sulfat, Nitrat und Ammonium an der UBA-Station Schauinsland im Zeitraum 1982 - 2007 [Quelle: UBA 2008; 1994 Datenausfälle]

## 4.2 Die Situation in der Pedosphäre

Die Bodenversauerung ist ein sehr langfristiger Prozess, der seit ca. 10.000 Jahren die Bodenbildung unserer Böden mitbestimmt. Trends können anhand von pH-Messungen innerhalb weniger Dekaden nur in Ausnahmefällen festgestellt werden. Messwerte sensitiverer Bewertungsgrößen wie die Zusammensetzung der Austauscherbelegung an

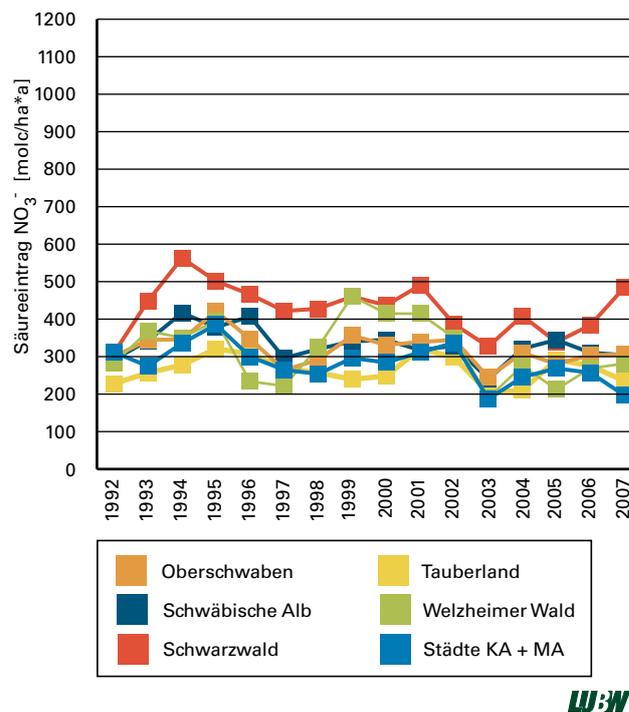
Tonmineralen stehen flächendeckend in Baden-Württemberg nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung.

Entwicklungen lassen sich anhand von Säurebilanzen aufzeigen, in denen Säurebelastungen durch atmosphärische Einträge und durch bodeninterne Säureproduk-



LUBW

Abb. 4.1-3: Säureeintrag durch Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) im Zeitraum 1992 - 2007



LUBW

Abb. 4.1-4: Säureeintrag durch Nitrat ( $NO_3^-$ ) im Zeitraum 1992 - 2007

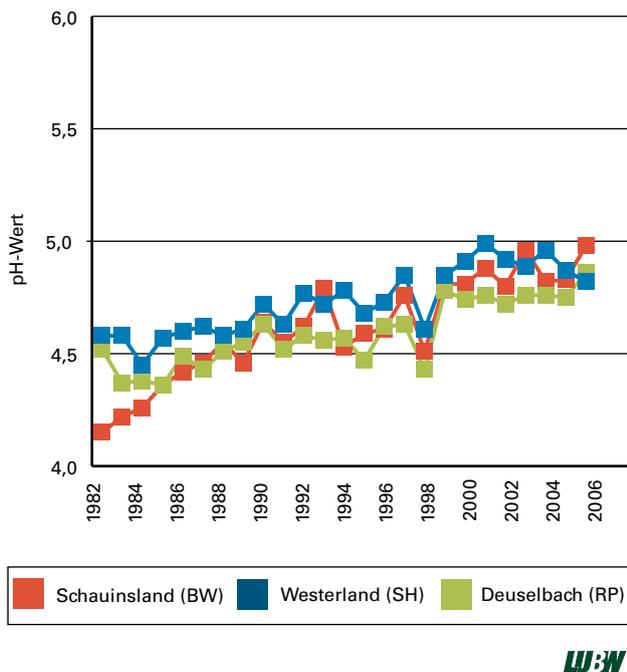


Abb. 4.1-5: pH-Werte im Niederschlag; 1982-1993 bulk-Messungen täglich, 1994-2006 wet-only-Messungen wöchentlich [Quelle: UBA 2008]

tion (Säureabgabe durch Pflanzenwurzeln, Säurebildung durch mikrobiellen Abbau organischer Substanz) den zur Verfügung stehenden Pufferkapazitäten gegenübergestellt werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Säurebilanzen erlauben zudem Quantifizierungen und Prognosen. Sie zeigen eine anhaltende anthropogene Verstärkung der natürlichen Versauerungsprozesse an, im Wesentlichen über atmosphärische Säureinträge, sowie durch Nutzungseinflüsse. Beispielsweise wurde für einen besonders pufferarmen, tonarmen Flugsandboden der Oberreinebene eine Gesamtsäureneutralisationskapazität von rund 18.000 kmol<sub>e</sub>/ha bis 110 cm Bodentiefe berechnet. Selbst die Pufferkapazität, berechnet aus der potentiellen Kationenaustauschkapazität (KAK<sub>eff</sub>), beläuft sich hier auf 300 - 400 kmol<sub>e</sub>/ha. Diese Pufferfähigkeit ist gut vergleichbar mit denen der pufferarmen Böden in den hier diskutierten versauerungssensitiven Gebieten. Dem stehen knapp 2 kmol<sub>e</sub>/ha a Beanspruchung durch atmosphärische Säureinträge gegenüber (Freilandeintrag plus Auskämmeffekt durch Baumkronen). Diese sind praktisch vollständig anthropogen durch SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen verursacht, da die Kohlensäure an sauren Standorten keine wesentliche Rolle mehr spielt. Hinzu kommt die Säurebelastung durch die Nutzung, die sich allein gemessen am Ernteentzug von Nährkationen auf ca. 0,5 bis 1 kmol<sub>e</sub>/ha a

unter forstlicher Nutzung grob eingrenzen lässt. Sie kann unter landwirtschaftlicher Nutzung sehr viel höhere Werte annehmen, wird dort aber meist durch Kalkung kompensiert. Die Säurebelastung durch Nutzung ist aufgrund komplexer biologisch gesteuerter Prozesse und der Abhängigkeit vom Verbleib von Ernteresten nur sehr schwer quantifizierbar [UMEG 2004a].

Ebenfalls auf einem Bilanzansatz beruht das critical loads Konzept der UNECE EU, aus dem die Forderung zu weiteren Emissionsreduktionen EU-weit abgeleitet wird. Für empfindliche Böden werden als critical loads für Säure als bundesweites Minimum rund 0,5 - 1,0 kmol<sub>e</sub>/ha a (Eintrag + Nutzung) berechnet. Das Konzept der UNECE geht davon aus, dass oberhalb dieser Beanspruchungsschwelle die Waldernährungsfunktion auf lange Sicht gefährdet ist [für weitere Informationen siehe UNECE 2009].

Ein landesweiter Trend der Bodenversauerung kann anders als bei den anderen Medien nur sehr langfristig gemessen werden, weil die Gesamtpufferkapazität im Verhältnis zu den jährlichen Einträgen und Entzügen sehr groß ist. Inzwischen werden in Baden-Württemberg ca. 14.000 ha Wald pro Jahr gekalkt und die Wälder werden zunehmend zu standorttypischeren Mischwäldern umgebaut. Hierdurch sowie in Folge der abnehmenden Säureinträge ist für die Zukunft von einer Verlangsamung des Versauerungstrends in den Böden auszugehen.

Die regionalen Unterschiede sind gesteins- und nutzungsbedingt und werden im Kapitel 5 weiter dargestellt.

## 4.3 Die Situation in der Hydrosphäre

### 4.3.1 Versauerung in Fließgewässern

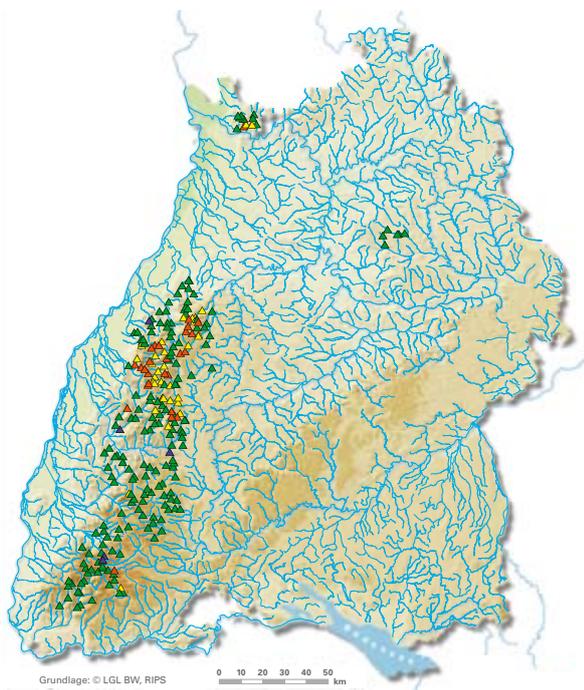
Im Rahmen des landesweiten Fließgewässermonitorings nach WRRL wurden 2007 Makrozoobenthos-Probenahmen in den versauerungssensitiven Gebieten durchgeführt. Dabei wurden 109 Probestellen an „grobmaterialreichen silikatischen Mittelgebirgsbächen“ (Typ 5) und 51 Probestellen an „feinmaterialreichen, silikatischen Mittelgebirgsbächen (Typ 5.1) beprobt und auf der Grundlage eines Rechenmoduls der Versauerungszustand ermittelt.

Etwa 63 % der Probestellen von 2007 weisen aufgrund der Makrozoobenthosbesiedlung einen nicht sauren Zustand (Säureklasse 1) auf, während 37 % der Probestellen einen überwiegend neutralen bis episodisch schwach sauren Säurezustand (Säureklasse 2) indizieren. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen ist eine gravierende Versauerung anhand der neuen Bewertungsmethode nach der WRRL nicht mehr festzustellen. Von den 253 Mitte der 1990er Jahre untersuchten Probestellen (Abb. 4.3.1-1) konnten knapp 20 % der Probestellen (49 Stellen) dem neuen Monitoringmessnetz zugeordnet werden (orts-gleiche Probestellen). Die 49 Probestellen wurden zusätzlich nach dem alten Verfahren berechnet, sodass ein direkter Vergleich der beiden Probennahmeperioden möglich ist. Dabei ergab sich durchweg eine Verbesserung um meist eine Säureklasse oder ein gleichbleibendes Ergebnis auf geringem Versauerungsniveau. Insgesamt lassen sich mit der Methode nach WRRL vergleichbare Ergebnisse erzielen, die auf eine deutliche Verbesserung der Versauerungssituation hinweisen (Abb. 4.3.1-1).

Auch in den kleineren Fließgewässern, des bereits seit Mitte der 1980er Jahre durchgeführten Sonderunter-suchungsprogramm ausgewählter Oberläufe, zeichnet sich eine Stabilisierung bzw. teilweise auch eine Verbes-erung der Versauerungssituation ab. Allerdings wird der für den pH-Wert festgelegte Orientierungswert der Län-derarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) von pH 6,5 auch heute noch, insbesondere nach Schneeschmelzen, zeitwei-se deutlich unterschritten. Dies ist in Abbildung 4.3.1-2 exemplarisch anhand der für die beiden Oberlauf-Mess-stellen Goldersbach im Südschwarzwald und Dürreych-bach im Nordschwarzwald vorgefundenen Minimalwerte dargestellt.

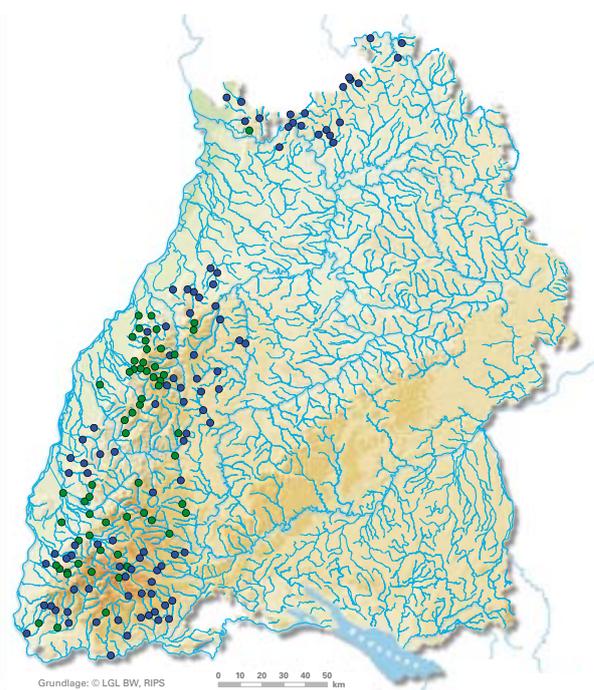
### 4.3.2 Versauerung im Quell- und Grundwasser

Bei der landesweiten Erhebung im Herbst 2007 wurde im Gesamtmessnetz der untere Grenzwert der TrinkwV von pH 6,5 an 7,8 % der 2.332 untersuchten Landes-Messstel-



Versauerungssituation Stand 1995

Säureklasse 1 (blau): permanent nicht saure Gewässer (2 %)  
 Säureklasse 2 (grün): episodisch schwach saure Gewässer (72 %)  
 Säureklasse 3 (gelb): periodisch saure Gewässer (15 %)  
 Säureklasse 4 (rot): permanent saure Gewässer (11 %)



Versauerungssituation Stand 2007

Säureklasse 1 (blau): permanent neutral (63 %)  
 Säureklasse 2 (grün): überwiegend neutral (37 %)  
 Säureklasse 3 (gelb): periodisch kritisch sauer (0 %)  
 Säureklasse 4 (orange): periodisch stark sauer (0 %)  
 Säureklasse 5 (rot): permanent extrem sauer (0 %)



Abb. 4.3.1-1: Anhand der Makrozoobenthosbesiedlung ermittelte Versauerungssituation ausgewählter Fließgewässer in Baden-Württemberg Stand 1995 und 2007

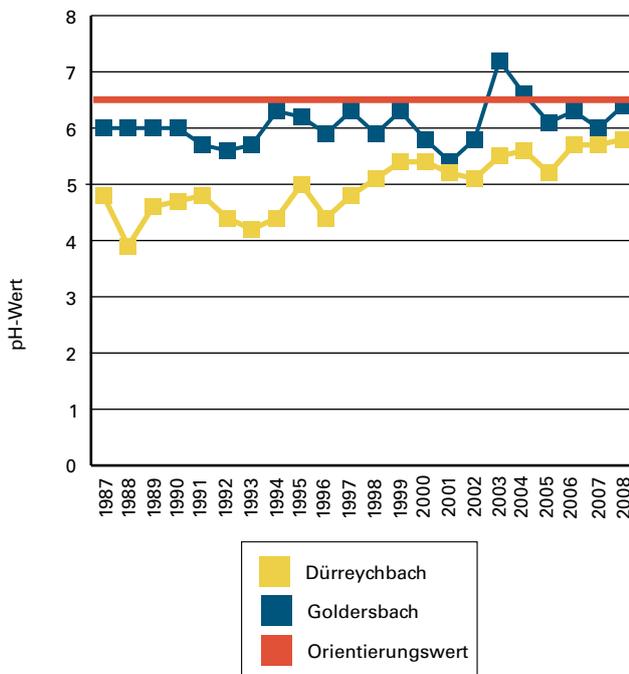


Abb. 4.3.1-2: Entwicklung der pH-Werte in Goldersbach und Dürreychbach im Zeitraum 1987 - 2008 (jährliche Minima)



len unterschritten. Die landesweiten Minima mit pH-Werten unter 5 wurden an vier Quellen im Nordschwarzwald und im Odenwald gemessen. Der niedrigste pH-Wert war 4,5. Diese Messstellen - meist Quellen - liegen nahezu alle im westlichen Landesteil (Abb. 4.3.2-2), in den bewaldeten Festgesteinen von Schwarzwald und Odenwald (Buntsandstein, Kristallin, Rotliegendes). Damit ist die Versauerung des Grund- und Quellwassers kein landesweites Problem, sondern beschränkt sich auf etwa 20 % der Landesfläche.

Grund dafür ist die dort geringe Pufferkapazität der Böden und Gesteine (Abb. 2.2-2), weshalb Schwarzwald und Odenwald als besonders versauerungsgefährdete Gebiete bezeichnet werden. Saures Quellwasser mit pH-Werten unter 6,5 kommt in diesen Regionen teilweise natürlich vor, ist aber in der Vergangenheit durch anthropogene Säureeinträge über Luft und Regen um etwa eine pH-Einheit erniedrigt worden. Unbelastetes Regenwasser hat einen pH-Wert von 5,6.

Versauerungsbedingte Belastungen durch Metalle wie z.B. Aluminium wurden in den Jahren 1992 bis 2007 nur an wenigen Messstellen beobachtet. Von 66 Messstellen, deren Wasser im Herbst 2007 einen pH-Wert von unter

6,0 hatte, wurde der Aluminiumgrenzwert von 200 µg/l in diesem Zeitraum an acht Messstellen überschritten.

Außerhalb der versauerungsgefährdeten Gebiete des Schwarzwaldes und des Odenwaldes findet man saures Grundwasser mit pH-Werten von 6,0 bis 6,5 nur vereinzelt. Dabei handelt es sich um einzelne Grundwässer und Quellen z.B. in der Oberrheinebene und im Keuperbergland (vgl. Abbildung 4.3.2-2).

Veränderungen im pH-Wert unterhalb des natürlichen Niederschlag-pHs zeigten sich fast nur in oberflächennahen Quellwässern. Die pH-Werte variieren in den Jahren 1992 bis 2007 um etwa 0,5 pH-Einheiten (Abb. 4.3.2-1).

Die Ursachen für die Zu- und Abnahmen des pH-Wertes im Quellwasser liegen offenbar im Wechsel von niederschlagsarmen zu sehr niederschlagsreichen Jahren und mit dem damit teilweise verbundenen Wechsel der Menge der eingetragenen Säuren, wie es in manchen Jahren zu beobachten ist (Abb. 4.3.2-1). In nassen Jahren kann ein höherer Säureeintrag ins Grundwasser über die Niederschläge und aus den Böden erfolgen als in trockenen Jahren. Gerade in den Jahren 1992 bis 1998 macht sich im Vergleich der langjährigen pH-Messungen in den Quellwässern mit den Niederschlags- und Depositionsmengen ein Zusammenhang bemerkbar (Abb. 4.3.2-1). Dieser Zusammenhang ist im Kap. 5 bei den hochauflösenden Messungen an einzelnen Quellen oftmals besser zu beobachten (siehe zum Beispiel Abbildung 5.1.4-5).

Zum Verständnis der Grundwasserversauerung spielt auch die Tatsache eine wichtige Rolle, dass während der Trockenjahre die abgelagerten Säurebildner vermehrt ungelöst, z.B. als Salze, im Boden zwischengespeichert werden und erst in den folgenden niederschlagsreicheren Jahren mit dem vermehrt zur Verfügung stehenden Niederschlags- und Bodenwasser gelöst werden können. Erst dann gelangen die Säurebildner mit dem Sickerwasser ins Grundwasser und führen dort zur Versauerung. 1992 war das letzte Jahr einer ab 1989 andauernden Trockenperiode. Im Schwarzwald sind die Säureeinträge durch Schwefel- und Stickstoffverbindungen in den trockenen Jahren 1992, 1996, 1997 und 2003 auffällig geringer gewesen als in den nasseren Jahren 1994 und 1995 (Abb. 4.3.2-1, Abb. 4.1-3,

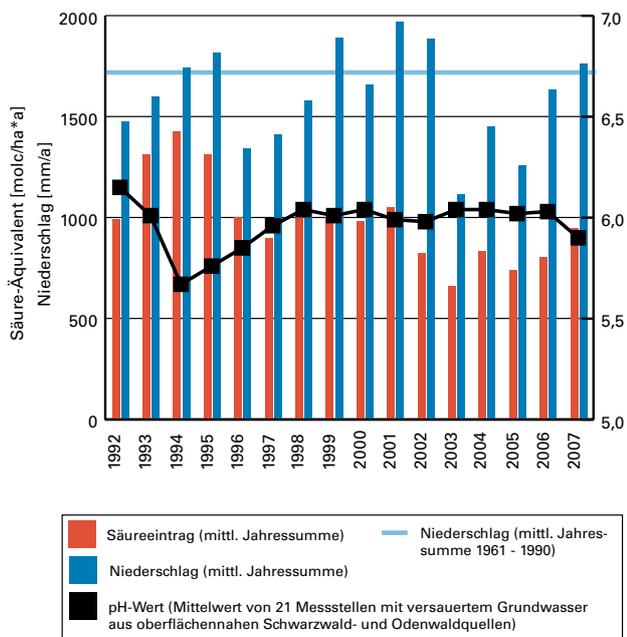
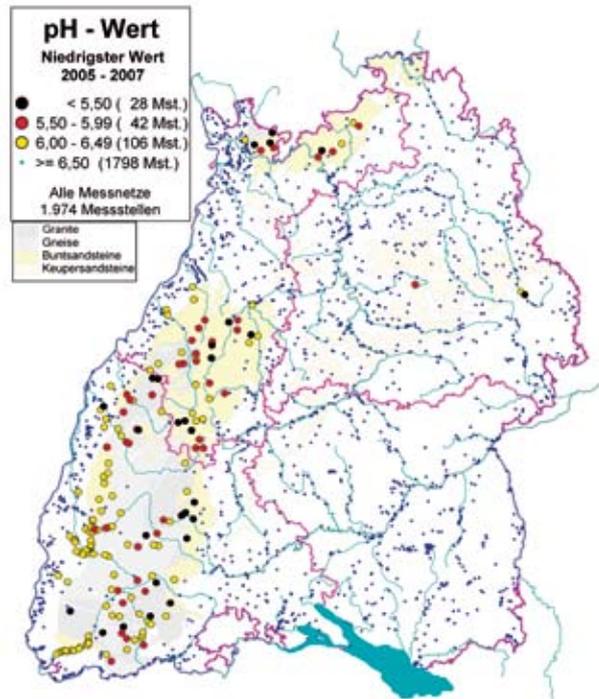
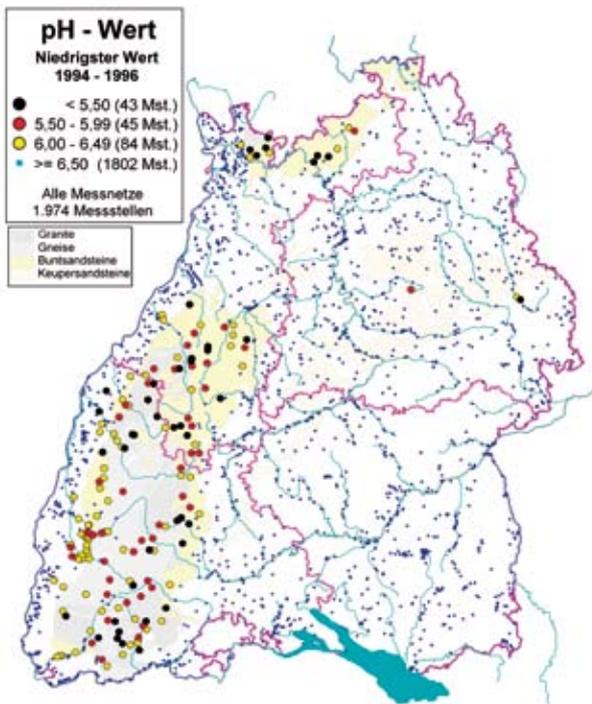


Abb. 4.3.2-1: Entwicklung der jährlichen pH-Wert-Mittelwerte<sup>1</sup>, Niederschlagsmengen<sup>2</sup> und Säureeinträge<sup>3</sup> von 1992 bis 2007

- 1 Es wurden nur Quellwasser-Messstellen in die Auswertung einbezogen, bei denen jedes Jahr mindestens eine pH-Wertmessung vorliegt. Liegen mehrere Werte pro Jahr pro Messstelle vor, wurde pro Jahr der Medianwert pro Messstelle ermittelt. Aus den Medianwerten aller Messstellen wird der Mittelwert pro Jahr errechnet.
- 2 Als mittlere Niederschlagssumme pro Jahr ist das Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitenau und Feldberg dargestellt. Für die Jahre 1961-1990 wurde ein 30-jähriges Mittel der Niederschlagssummen errechnet.
- 3 Berechnet auf Basis von Nitrat- und Sulfatdepositionen im Schwarzwald (ohne Ammonium). Der mittlere Säureeintrag pro Jahr ist das Mittel der LUBW-Depositionsmessstationen Hornsgrinde, Wildsee und Schauinsland.

Abb. 4.1-4). Daher liegen in den trockeneren Jahren die pH-Werte im Quellwasser höher. Andererseits gibt es in Trockenperioden auch in versauerungssensitiven Einzugsgebieten ältere und höher mineralisierte Grundwasserkomponenten, die als Trockenwetterabfluss zu einem höheren pH-Wert führen. Dies ist vermutlich die Ursache für das Maximum von pH 6,2 im Jahr 1992 (Abb. 4.3.2-1). Im nassen Jahr 1994 ist im Grundwasser ein Abfallen des mittleren pH-Wertes auf knapp 5,7 zu beobachten. Dieses Jahr hat im Zeitraum 1992 bis 2007 sowohl die höchsten Säureeinträge, als auch den niedrigsten pH-Wert im Quellwasser. Im Jahr 1994 lagen die Säureeinträge im Schwarzwald um 45 % höher als im trockeneren Jahr 1992 (Abb. 4.3.2-1), was mit der deutlichen pH-Wertabsenkung im Grundwasser einhergeht.

Nach einer Verbesserung der Situation im Grundwasser 1997/1998 mit einem pH-Wertanstieg auf etwa pH 6,0 und einer Stabilisierung auf diesem Niveau bis 2006, fällt in 2007 der mittlere pH-Wert überraschend wieder auf pH 5,9, also auf das Niveau von 1996/1997. Dies beruht offenbar auf den in 2007 wieder höheren - seit 2002 erstmals erneut überdurchschnittlichen - Niederschlägen und höheren Säureeinträgen. Im Schwarzwald waren die Säureeinträge durch Nitrat im Jahr 2007 so hoch wie seit 1994/1995 und 2001 nicht mehr (Abb. 4.1-4). Die Säureeinträge durch Sulfat erreichten 2007 ein Niveau wie zuletzt 2001/2002 (Abb. 4.1-3). Im Vergleich des nasseren Jahres 2007 zum extremen Trockenjahr 2003 sind die Schwefel- und Stickstoffsäureeinträge jeweils um etwa 50 % höher (Abb. 4.1-3 und 4.1-4). Die neuesten Quell- und Grundwasserdaten aus dem Jahr 2008 zeigen eine Fortsetzung der Stabilisierungsphase. Die pH-Werte sind 2008 wieder angestiegen (pH 6,1).

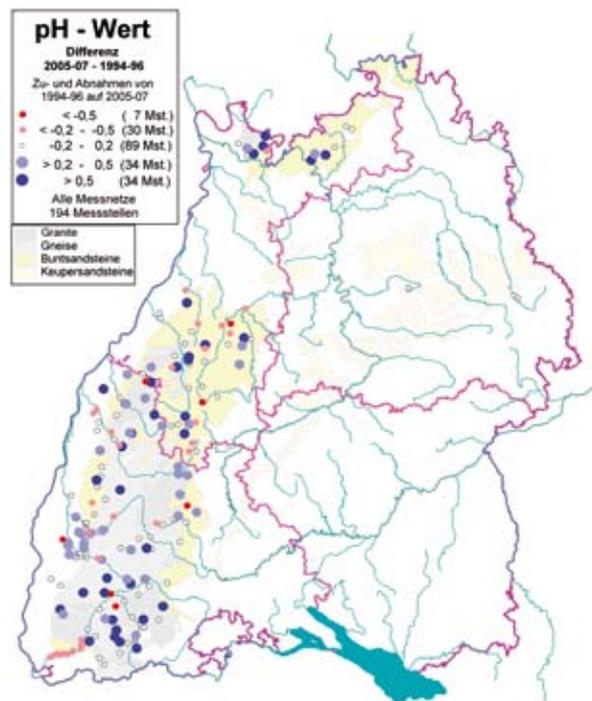


LUBW

Abb. 4.3.2-2: Darstellung der in den Zeiträumen 1994 - 1996 und 2005 - 2007 gemessenen niedrigsten pH-Werte von 1.974 Messstellen (puferschwache Gesteinsregionen farblich hervorgehoben).

Im Folgenden wird die Entwicklung der Versauerung auch anhand eines Vergleichs der Zeiträume 1994 - 1996 und 2005 - 2007 beschrieben (Abb. 4.3.2-2). Diese Zeiträume sind von den Niederschlagsmengen her gut vergleichbar. Im Vergleich der beiden Zeiträume lassen sich messbare Verbesserungen erkennen. Bei zahlreichen Messstellen im Odenwald und im gesamten Schwarzwald erhöht sich der pH-Wert des Grund- und Quellwassers. Lagen im Zeitraum 1994 - 1996 noch 88 Grund- und Quellwässer unter pH 6,0, so waren es im Zeitraum 2005 - 2007 nur noch 70, also 20 % weniger.

Abbildung 4.3.2-3 zeigt die Differenz der niedrigsten pH-Werte der Zeiträume 2005 - 2007 und 1994 - 1996 in den besonders versauerungsgefährdeten Gebieten. Demnach bleibt der pH-Wert bei 89 Messstellen (46 %) unverändert. Bei den anderen Messstellen geht die Tendenz in den letzten 10 bis 15 Jahren eher zu Verbesserungen (35 %) als zu Verschlechterungen (19 %). Versauerungsschwerpunkte sind nach wie vor die Buntsandsteingebiete im Odenwald und Schwarzwald wie auch die Granit- und Gneisgebiete.



LUBW

Abb. 4.3.2-3: Differenzen der niedrigsten pH-Werte in den Zeiträumen 2005 - 2007 und 1994 - 1996, 194 Messstellen mit mindestens einem pH-Wert unter 6,50 in mindestens einem der beiden Zeiträume.

## 4.4 Die Situation in der Biosphäre

### Bioindikator Flechten

Im Rahmen der biologischen Dauerbeobachtung wurden seit 1985 an 60 Wald-Dauerbeobachtungsflächen (DBF) verschiedene Bioindikatoren untersucht.

Seit Beginn der Messungen nehmen die Flechtenarten in allen Landesteilen von Baden-Württemberg und an 80 % der DBF Standorten zu (Abb. 4.4-1). Im Zeitraum 1985 bis 2002 nahm der Anteil der DBF mit weniger als 13 Flechtenarten von 57 % auf 17 % ab und der Anteil der DBF mit mehr als 30 säureempfindlichen Arten von unter 2 % auf 25 % zu; die Zahl der Flächen, an denen keine wesentliche Veränderungen festzustellen war beträgt 19,2 %. Regional gab es große Unterschiede: während im gesamten südlichen Landesteil und insbesondere im Schwarzwald überdurchschnittlich viele Verbesserungen ermittelt wurden, ist die Flechtenflora im nördlichen Oberrhein und angrenzender Gebiete im Kraichgau und des Odenwaldes nach wie vor artenarm. Eine Abnahme der Artenzahl konnte nirgends festgestellt werden.

Die Entwicklung zeigt somit eine landesweite Verbesserung der Lebensbedingungen für Flechten allgemein.

Eine Flechtenart, die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides*, ist besonders toxisch und signalisiert bei alleinigem Vorkommen eine extrem hohe Belastung mit sauren Schadgasen insbesondere  $\text{SO}_2$  [KIRSCHBAUM, pers. Mitteilung; WIRTH 1993]. Diese Flechtenart hat seit Beginn der ersten Kartierung landesweit abgenommen. Die Abbildung 4.4-2 verdeutlicht im Vergleich der beiden Jahre 1985 und 2002 eine ganz erhebliche Zunahme von Standorten mit einem rückläufigen Deckungsgrad von *Lecanora conizaeoides*. Der nördliche Teil von Baden-Württemberg ist aber nach wie vor stärker von sauren Immissionen geprägt als der südliche Landesteil.

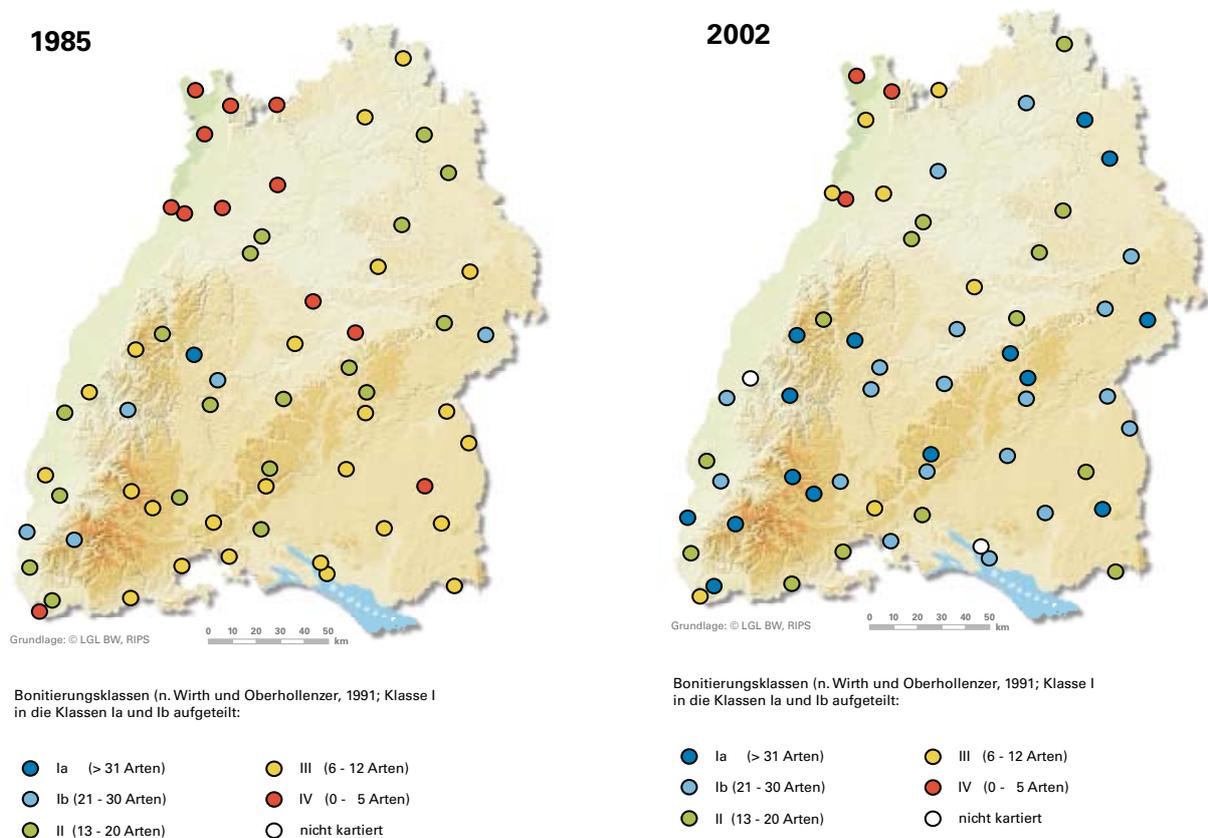


Abb. 4.4-1: Veränderung der Anzahl der Flechtenarten an den Wald-Dauerbeobachtungsflächen zwischen 1985 (links) und 2002 (rechts)

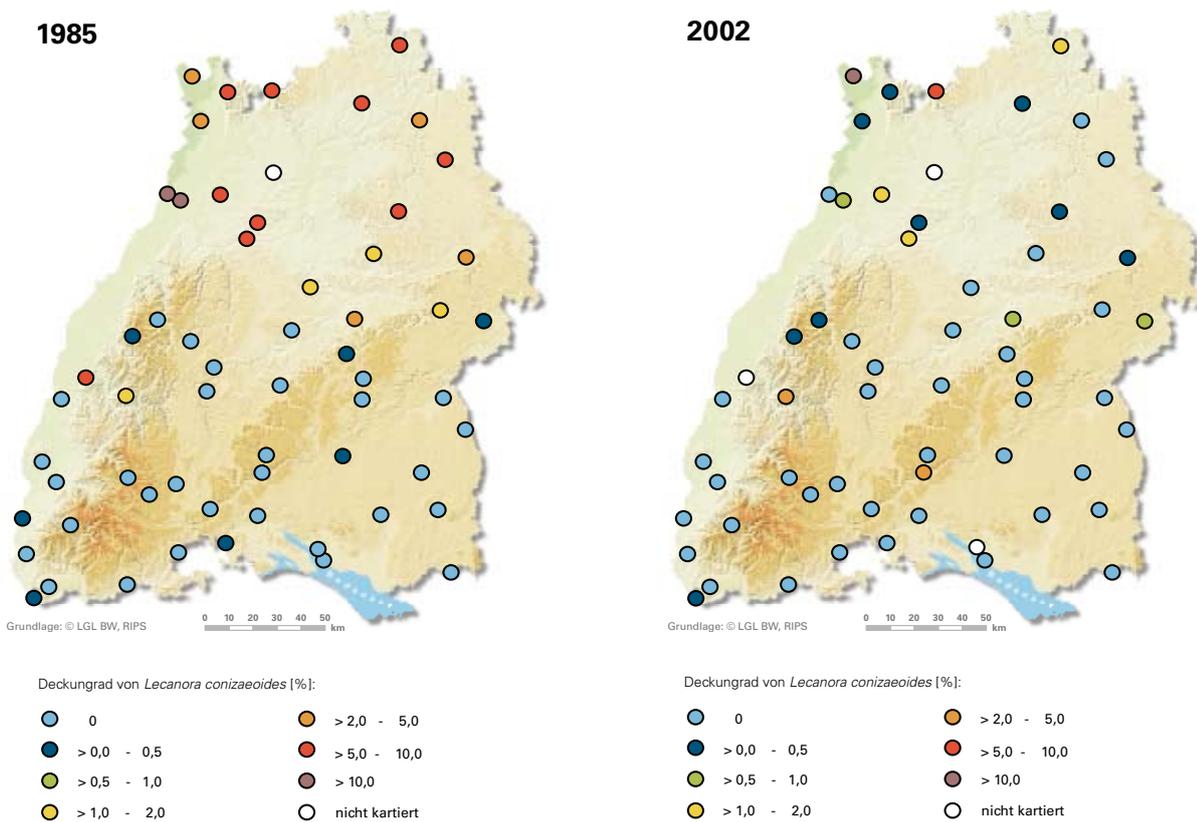


Abb. 4.4-2: Veränderung des Deckungsgrades der säuretoleranten Flechtenart *Lecanora conizaeoides* an den Wald-Dauerbeobachtungsflächen der MUB zwischen 1985 (links) und 2002

### Bioindikator Bachforelle

Seit 1984 werden Bachforellen als Bioindikator im Rahmen der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung an 38 Bächen verteilt über ganz Baden-Württemberg auf Versauerungsschäden untersucht. Es werden Individuendichte, Altersstruktur, Gesundheitszustand und Metallbelastung der Leber ermittelt. Schon nach wenigen Untersuchungsjahren zeigte sich, dass die Versauerungsproblematik lediglich in Bächen des Odenwaldes und des Schwarzwaldes und kleinflächigen Teilen des Keuperberglandes relevant ist. Aus diesem Grund wurde das Untersuchungsprogramm stark reduziert. Für die derzeit noch untersuchten 11 Fließgewässer zeigt sich ein uneinheitlicher Trend.

An drei Bächen konnten 2006 keine Bachforellen mehr nachgewiesen werden. Die Gründe liegen zum einen darin, dass Bachläufe aufgrund der veränderten Niederschlagsverteilung in (extrem) trockenen Jahren austrocknen und die darin befindlichen Bachforellen zum Überleben bachabwärts wandern, aber aufgrund von

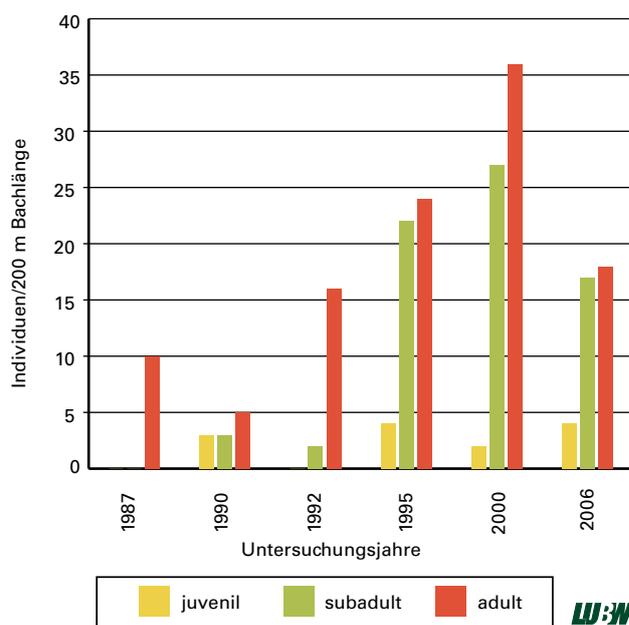


Abb. 4.4-3: Beispielhafte Entwicklung der Bachforellenpopulation am Wälzbach; [Quelle: IUS 2006]

technischen Wanderungshindernissen, wie Wehren nicht wieder in die Bachoberläufe aufsteigen können. Zum Teil kann aber auch die Versauerungssituation zu extremem Nahrungsmangel und direkten Säureschäden (wie vermutlich am Kaltenbach) und letztendlich zum Erlöschen der Bachforellenpopulation führen. Neben diesen 3 Bächen mit Totalausfall hat sich die Situation der übrigen 8 Bäche ganz überwiegend verbessert, so dass 7 der 8 Bäche heute eine bessere Altersstruktur und/oder bessere Bachforellenindividuen-dichte aufweisen als im jeweils ersten Untersuchungsjahr (vgl. Abbildung 4.4-3, 5.1.4-4, 5.4.4-1 und 5.7.4-1). Ein Überleben der Art scheint an diesen Bächen gesichert zu sein.

### Bioindikator Regenwurm

Zwischen 1985 und 2005 haben die Blei-, Cadmium- und Zink-Gehalte von Regenwürmern (*Lumbricus rubellus*) meist abgenommen [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006]. Beispielhaft wird dies in Abbildung 4.4-4 an der Bleibelastung von Regenwürmern dargestellt [LUBW 2006]. Die Karte zeigt, dass die Bleigehalte in den Regenwürmern vieler Standorte der Gäulandschaften, der Hügel- und Bergländer des Keupers, der Schwäbischen Alb und des Alpenvorlandes, des Rheintales, aber auch der Standorte in der Nähe von Ballungsgebieten auf niedrigem Niveau schwanken. Auffällig sind die erhöhten bis stark erhöhten Bleigehalte in Regenwürmern aus der Anfangszeit dieser Untersuchungen in den Regionen Schwarzwald und Odenwald. Hier fanden deutliche Veränderungen bis zum Jahre 2000 statt. An allen Flächen des Schwarzwaldes und des Odenwaldes sind die Bleigehalte im Jahre 2000 deutlich niedriger als noch 1985/86. Die Abnahmen betragen allein zwischen 1987/88 und 2000 bei Blei im Durchschnitt aller 60 Wald-Dauerbeobachtungsflächen etwas mehr als ein Viertel. An den in den 1980er Jahren besonders hoch belasteten Standorten mit ursprünglich mehr als 50 mg Pb/kg Regenwurm betragen die Abnahmen sogar zwischen 50 und 95 Prozent. Für Cadmium sind durchschnittliche Abnahmen von über 30 Prozent ermittelt worden. In den von Bodenversauerung besonders betroffenen Gebieten des Odenwaldes und des Schwarzwaldes wurden durchweg Abnahmen im Cadmiumgehalt von 30 bis fast 70 Prozent gemessen [LUBW 2006].



LUBW

Abb. 4.4-4: Trendbeobachtung der Bleigehalte in Regenwürmern (*Lumbricus rubellus*) an den Standorten der MUB auf der Kartengrundlage von Bodenregionen [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006]

Aus dem abnehmenden Trend lässt sich eine Entlastung der Tiergemeinschaften durch Schwermetalle in Böden ableiten. Dies liegt vermutlich an der versauerungsbedingten Auswaschung von Schwermetallen in tiefere Bodenschichten und an der verbesserten Immissions-situation.



# 5 Ergebnisse aus den versauerungssensitiven Gebieten von Baden-Württemberg

Im Folgenden werden die Ergebnisse und Auswirkungen in den versauerungssensitiven Gebieten gegliedert nach Flusseinzugsgebieten vorgestellt (Abb. 5-1). Abschließend

sind in den Unterkapiteln „Gesamtbewertung“ die Daten und der Trend zusammenfassend dargestellt.

Einzugsgebiete von

- 1 Alb, Murg und Schönmünzach im nördlichen Schwarzwald
- 2 Eyach, Enz, kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald
- 3 Oosbach, Sandbach, Acher und Rensch im nordwestlichen Schwarzwald
- 4 Kinzig, Wolfach, Schiltach, Gutach und Erlenbach im Mittleren Schwarzwald
- 5 Elz, Wilde Gutach, Dreisam, Brugga im Hochschwarzwald
- 6 Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald
- 7 Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese im südlichen Schwarzwald
- 8 Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald
- 9 Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland

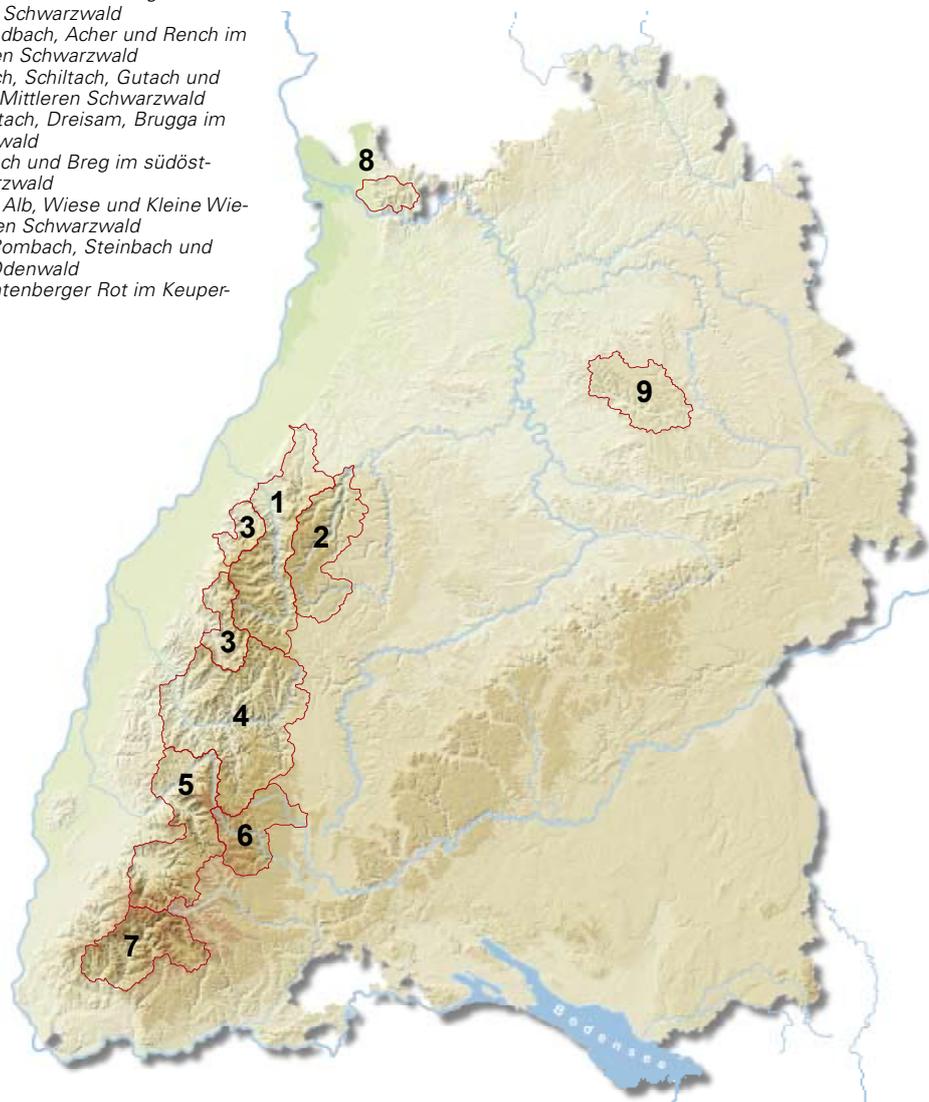


Abb. 5-1: Lage der versauerungssensitiven Gebiete in Baden-Württemberg

## 5.1 Das Einzugsgebiet von Alb, Murg und Schönmünzach im nördlichen Schwarzwald

### 5.1.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Alb, Murg und Schönmünzach liegt im nördlichen Schwarzwald (Abb. 5.1.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 615 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt

auf 1157 m ü. NN, der niedrigste auf 124 m ü. NN. Das betrachtete versauerungssensitive Gebiet ist geprägt durch ca. 2°C niedrigere Jahresmittel-Temperaturen und 240 mm höhere Niederschlagssummen als der Landesdurchschnitt.

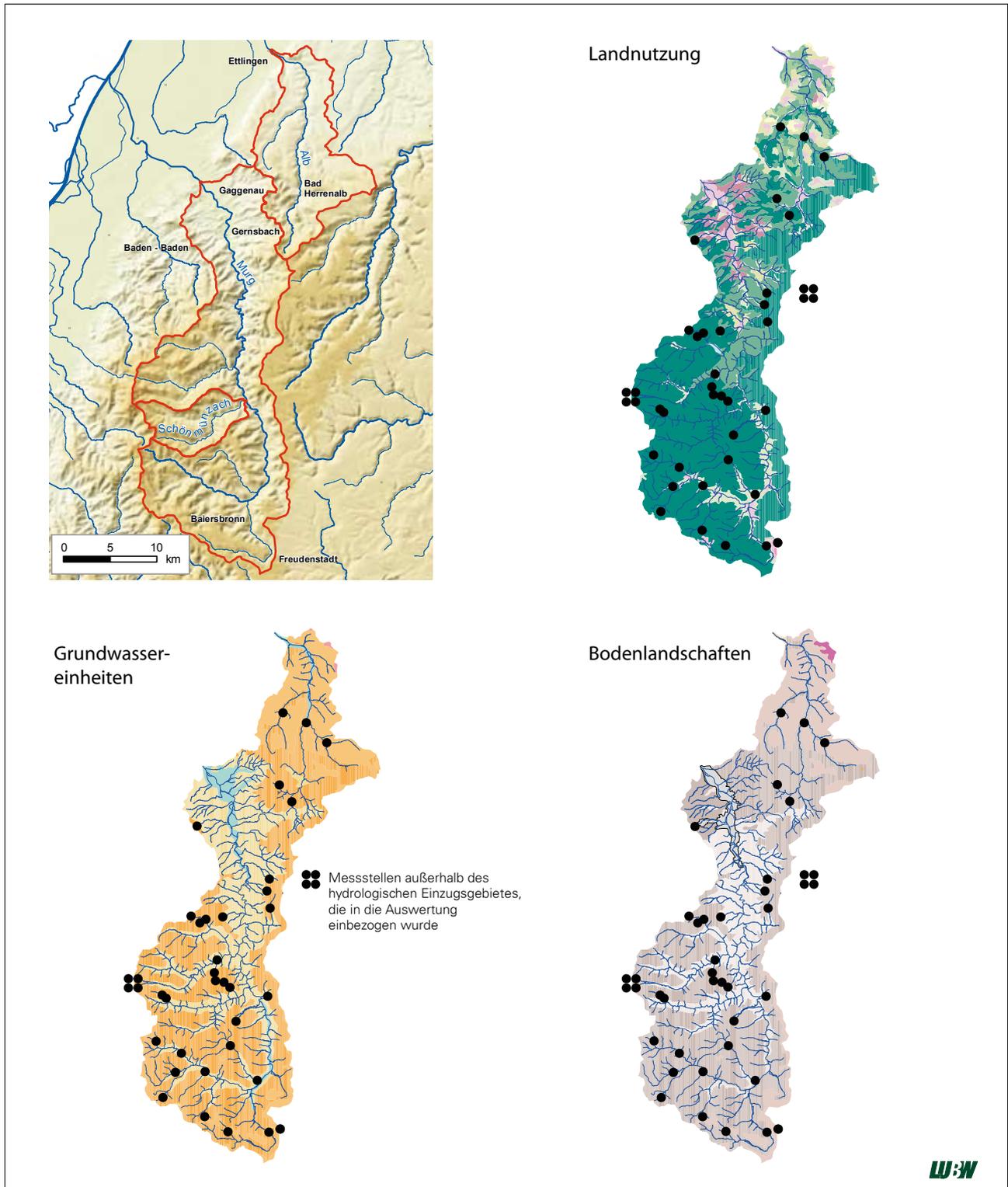


Abb. 5.1.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Alb, Murg und Schönmünz im nördlichen Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

Mehr als 23 % des Gebietes ist Teil der Vorbergzone.

Landnutzung: In diesem Gebiet nehmen Wälder über 80 % der Fläche ein, davon sind rund 25 % Laub- und Mischwälder, 75 % reine Nadelwälder. Die übrigen 20 % Grünland- sowie Siedlungsflächen finden sich überwiegend in den Tälern. Die größten Ansiedlungen sind die Ortschaften Gaggenau und Gernsbach am Ende des Murgtals.

Bodenlandschaften: Der versauerungssensitive Mittlere und Untere Buntsandstein ist das mit über 50 % am weitesten verbreitete Ausgangsgestein im Untersuchungsraum. Im Albtal ist auch der Obere Buntsandstein mit über 10 % vertreten, während im Murgtal der Buntsandstein bereits soweit abgetragen ist, dass dort das kristalline Grundgebirge bzw. das Rotliegende ansteht. Der obere

Buntsandstein sowie die paläozoischen und kristallinen Gesteine besitzen im Allgemeinen eine höhere Pufferfähigkeit als der Mittlere und Untere Buntsandstein. Es finden sich überwiegend skeletthaltige Böden mit Sanden und Lehmsanden, die ohne menschlichen Einfluss von Tannenwäldern bewachsen wären.

## 5.1.2 Atmosphäre

Im Einzugsgebiet der Murg liegen die zwei Messeinrichtungen Wildsee und Hornisgrinde.

Die Mittelwerte beider Messstationen zeigen seit 1992 deutlich rückläufige Säureinträge durch Sulfat um ca. 50 % (siehe Abbildung 5.1.2-1). Dagegen ist beim Nitratbedingten Säureeintrag kein Trend erkennbar. Der Nitrat- und Sulfateintrag ist u.a. von der Niederschlagssumme

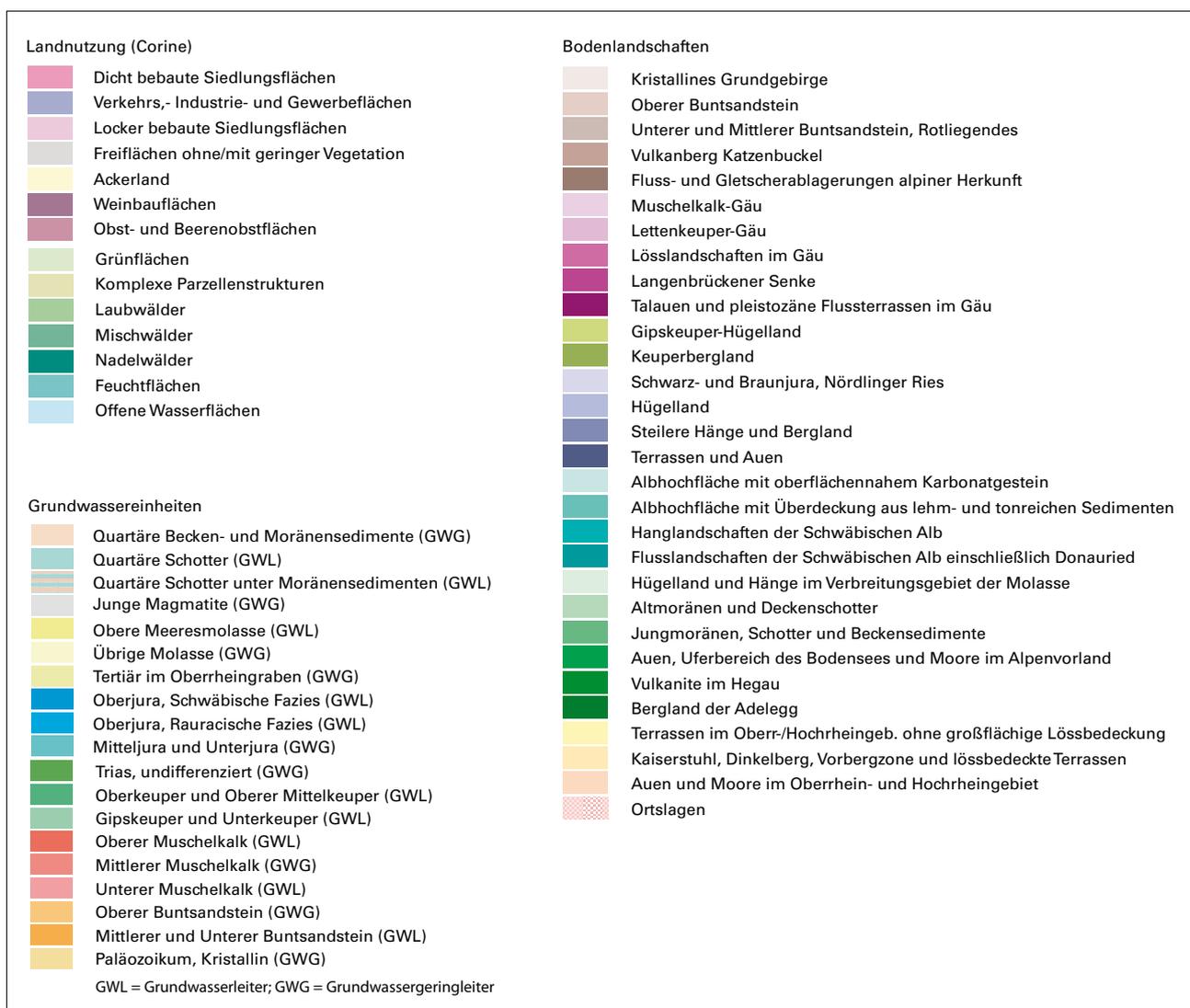


Abb. 5.1.1-2: Legende Landnutzung, Grundwassereinheiten und Bodenlandschaften für die Abbildungen 5.1.1-1 bis 5.9.1-1

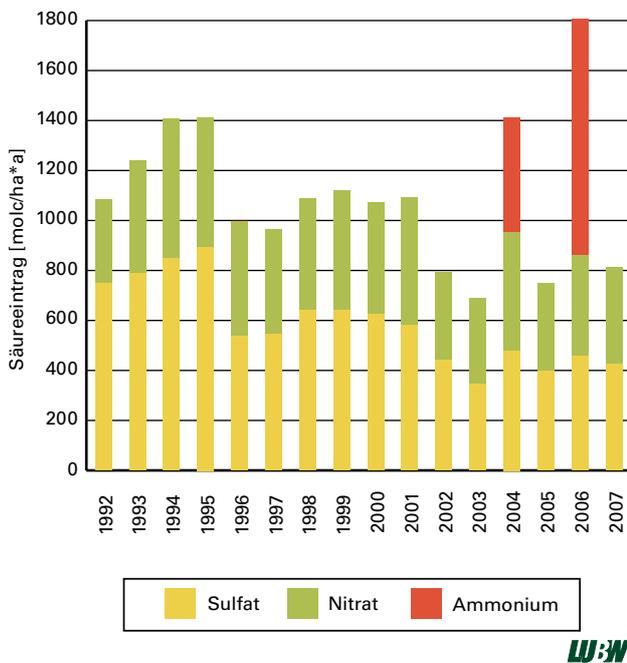


Abb. 5.1.2-1: Säureeintrag durch Deposition von Sulfat und Nitrat von 1992 bis 2007 als Mittelwert der beiden Stationen Wildsee und Hornisgrinde, sowie Ammonium für die Jahre 2004 und 2006

abhängig. So zeigt das niederschlagsreiche Jahr 1994 mit einem Nitratreintrag von 561 mol/ha a ein Maximum, während im trockenen Jahr 2003 nur 260 mol/ha a festgestellt wurden. Der Eintrag an Ammonium wurde bislang nur in den Jahren 2004 und 2006 in der Gesamtdosition erfasst und hat demnach einen bedeutenden Anteil am Säureeintrag (39 bzw. 49 %).

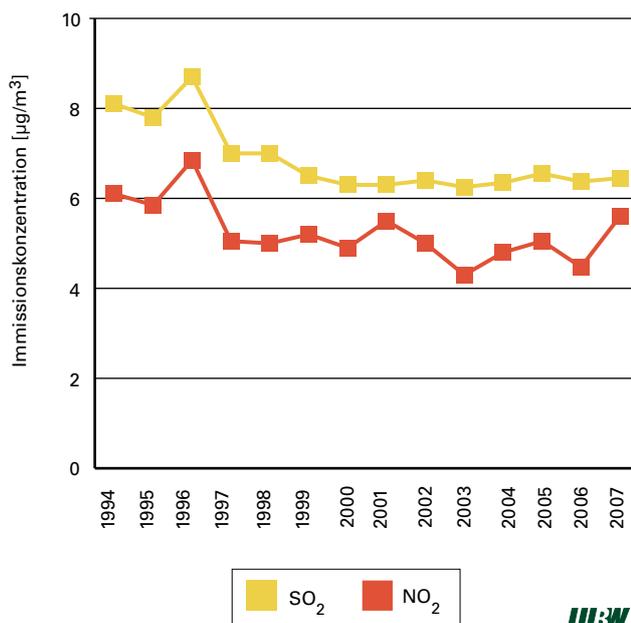


Abb. 5.1.2-2: Schwefeldioxid- und Stickstoffdioxid-Immissionskonzentrationen an den Standorten Hornisgrinde und Wildsee von 1994-2007

Die Immissionskonzentrationen an den Depositionsmessstellen werden mit Passivsammlern ermittelt, die in dem niedrigen Konzentrationsbereich nur für Trendausagen herangezogen werden können (Abb. 5.1.2-2). Die mittlere Immissionskonzentration von Schwefeldioxid an den Standorten Hornisgrinde und Wildsee verringerte sich von 1994 bis 2007 um rund 25 %. Der Mittelwert für Stickstoffdioxid schwankte zwischen 1994 bis 2007 auf weitgehend gleichem Niveau.

### Bioindikatoren Atmosphäre

Die säuretolerante Flechtenart *Lecanora conizaeoides* zeigt auf der Walddauerbeobachtungsfläche Murgschifferschaft im Einzugsgebiet der Schönmünzach oberhalb des Schurm-sees im Zeitraum 1991 bis 2002 eine geringfügige Zunahme (von 0,0 auf 0,2 % Deckungsgrad). Dies kann aber nicht als Zunahme der Säurebelastung gedeutet werden.

### 5.1.3 Pedosphäre

Die nahe der Badener Höhe in einem Nadelwald gelegene Boden-Dauerbeobachtungsfläche 114 (Baden-Baden 4) ist Teil des Grundmessnetzes mit bisher einmaliger Untersuchung. Die Dauerbeobachtungsfläche liegt im Mittleren Buntsandstein auf einer Höhe von 873 m. Der stark podsolierte Pseudogley wies 1986 im Oberboden (Ahe-Horizont, 0-6 cm) einen pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>) zwischen 2,7 und 3,0 auf und liegt damit im extrem sauren Eisenpufferbereich. Im Untergrund unterhalb 66 cm Tiefe lag der pH-Wert bei 4,0 und damit im stark sauren Aluminium-Pufferbereich.

Der Boden der Dauerbeobachtungsfläche 1370 (Murgschifferschaft) der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung ist ein Podsol-Ranker aus würmeiszeitlichem Hangschutt des Mittleren Buntsandsteins. Der pH-Wert des obersten Mineralbodenhorizontes (Ahe-Horizont, 0-10 cm) lag 1994 und bei der Wiederholungsmessung 2003 bei 3,1 und damit im extrem sauren Eisenpufferbereich.

## Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Murgschifferschaft wurden zwischen 1985 und 2005 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand in den Jahren 1985 bis 1990 und sind seitdem rückläufig. Seit 2000 liegen sie gleichbleibend bei 40 bis 75 Prozent unterhalb der Höchstwerte, aber immer noch deutlich über dem Landesdurchschnitt (Standort Murgschifferschaft, Messjahr 2005: 270 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 7,2 mg Cd/kg TS gegenüber 3,55 mg Cd/kg TS; 323 mg Zn/kg TS gegenüber 240 mg Zn/kg TS) [LUBW 2006].

### 5.1.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Im Einzugsgebiet der Murg wurden in 5 Karseen die pH-Werte im Uferbereich (Tab. 5.1.4-1), die Artenzusammensetzung und die Vitalität des Laiches von Amphibien (Frösche, Kröten, Molche) untersucht. Alle Seen befinden sich im Verbreitungsgebiet des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. Die Messungen zeigen, dass mindestens zwei Karseen zeitweilig immer noch sehr niedrige pH-Werte < 5,3 aufweisen. Nach BÖHMER [2002] ist bei pH < 5,3 mit Laichschäden zu rechnen.

Der Ellbachsee wurde durch Untersuchungen zur Schädigung des Laiches von Amphibien in den Jahren 1987 bis

1990 als neutral bis kritisch sauer (Stufe I) eingestuft und behält diesen Status auch bis zum vorläufig letzten Untersuchungsjahr in 2002 [BÖHMER 2002]. Bei Beobachtungen im Frühjahr 2008 wurde eine große Zahl geschlüpfter Erdkrötenlarven beobachtet (Rahtkens, mündliche Mitteilung). Diese Amphibienart ist von den im Schwarzwald vorkommenden Amphibienarten die säureempfindlichste [GEBHARDT et al. 1990]. Der Säurezustand des Sees wird deshalb als neutral bis allenfalls kritisch sauer beurteilt.

Im Huzenbacher See sind die mittleren pH-Werte seit Mitte der 1980er Jahre kontinuierlich angestiegen. Er wurde deshalb im Jahr 2002 als neutral bis kritisch sauer eingestuft, nachdem er bis 1990 noch als sehr stark sauer klassifiziert wurde. Die Beobachtung geschlüpfter Larven der weniger säureempfindlichen Amphibienart Grasfrosch in 2008 zeigt, dass eine Reproduktion möglich ist, damit wird der See weiterhin als neutral bis kritisch sauer eingestuft.

Auch an den übrigen Karseen Schurmsee, Buhlbachsee und Herrenwieser See konnte eine Verbesserung der Versauerungssituation festgestellt werden. Zwei der drei Seen (Schurmsee, Herrenwieser See) sind aber bis heute noch sehr stark bis übermäßig sauer. Am Schurmsee wurden 2008 ufernah Laichballen des Grasfrosches beobachtet mit 100 % Verpilzung (Abb. 5.1.4-1 bis -3), weiter seewärts aber auch zahlreiche geschlüpfte und gesunde Kaulquappen gesichtet. Der Buhlbachsee wurde 2002 als kritisch bis sehr stark sauer eingestuft. Alle Seen müssen weiterhin in Bezug auf ihre Versauerungsgefährdung beobachtet werden.

Positiv sind die Abnahme der Absterberate von Frosch- und Krötenlaich sowie die Zunahme von Jungtieren [BÖHMER 2002]. Anzumerken ist dagegen, dass noch nicht überall alle Amphibienarten, die im Schwarzwald natürlicherweise vorkommen, wieder anzutreffen sind [GEBHARDT 2007].

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Zwischen den Jahren 1985 und 2006 wurden die Oberläufe der Bäche Wälzbach, Vorderer Seebach und Stüblesgrund (nur bis 2000 untersucht) anhand des Bioindikators

Tab. 5.1.4-1: Mittlere pH-Werte von Karseen des Schwarzwaldes von 1987 bis 2008.

Seen Schwarzwald	Untersuchungsjahr			
	1987-1990	1996	2002	2008
Ellbachsee	5,5-5,9	6,1	5,9	6,1
Huzenbachersee	4,5-5,0	5	5,3	5,6
Schurmsee	4,2-4,4	4,4	4,7	4,2
Buhlbachsee	4,5		5,1	
Herrenwiesersee	4,3-4,4	4,6	4,6	4,1
Anzahl Messungen	75	6	26	1



Abb. 5.1.4-1: Uferbereich des Schurmsees mit Probenahmestelle, 20. Mai 2008 (Foto Rahtkens)



Abb. 5.1.4-2: Probenahmestelle im Uferbereich des Schurmsees mit Amphibienlaich, 20. Mai 2008 (Foto Rahtkens)



Abb. 5.1.4-3: Nahaufnahme Probenahmestelle Amphibienlaich mit Laichschaden in Form von Verpilzung, 20. Mai 2008 (Foto Rahtkens)

Bachforelle bewertet [IUS 2006]. Die Einzugsgebiete aller drei Messstellen sind bewaldet und befinden sich entweder im Verbreitungsgebiet des Kristallin (Wälzbach und Vorderer Seebach) oder des Unteren und Mittleren Buntsandstein (Stüblesgrund).

In den 1980er und Anfang bis Mitte der 1990er Jahre zeigten die Fischbestände oft einen gestörten Populationsaufbau (vgl. Abbildung 4.4-3 und 5.1.4-4). In manchen Untersuchungsjahren wurden überhaupt keine Jungfische gefangen. Dies legt den Schluss nahe, dass ganze Jahrgänge in Folge der sauren Niederschläge gestorben sind. Aus den adulten Tieren haben sich über die Jahre kleinere Bestände an Bachforellen gehalten.

Während im Vorderen Seebach ab dem Jahr 2000 wieder eine starke Population von Jungfischen und eine gesunde Altersstruktur nachgewiesen werden konnte (Abb. 5.1.4-4), bleibt die Situation am Wälzbach weiterhin kritisch (Abb. 4.4-3). Zwar hat sich der Fischbestand seit Beginn der Untersuchungen 1987 bis zum Jahr 2000 kontinuierlich erhöht, ist aber nach wie vor geprägt durch eine überalterte Population, zudem ist seit 2000 der Fischbestand wieder rückläufig (Abb. 5.1.4-5). Im Stüblesgrund zeigte der Indikator Bachforelle schon im Jahre 1995 den Säurezustand „nicht sauer“ an, während die beiden anderen Messstellen zu diesem Zeitpunkt noch als kritisch sauer eingestuft wurden. Der Fischbestand ist zwischen 1995 und 2000 bei einem zunehmenden Anteil an ein- und zweisömmrigen Fischen (Jungfische) nahezu gleich geblieben. Seit 2000 wurde dieser Bach nicht mehr untersucht.

An insgesamt 57 Gewässerabschnitten von 30 Fließgewässern im Untersuchungsraum wurde im Zeitraum 1993 bis 1995 das Makrozoobenthos untersucht. Keiner der Gewässerabschnitte konnte als permanent nicht sauer klassifiziert werden. Die Gewässerabschnitte der Alb waren im Wesentlichen episodisch schwach sauer, lediglich der Gewässerabschnitt AL028.00 ca. 500 m unterhalb der Albquelle ist als periodisch sauer eingestuft worden. Dabei sind die meisten Untersuchungsstellen im Einzugsgebiet der Alb von – aus Sicht der Gewässerversauerung gesehenen – günstigeren Nutzungsformen, wie Grünlandbewirtschaftung oder Mischwäldern geprägt. Auch die meisten innerhalb des Kristallins gelegenen Gewässer im Ein-

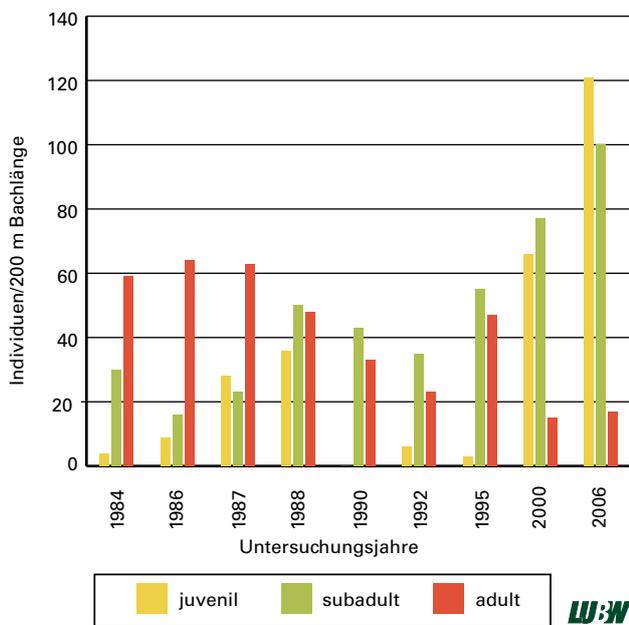


Abb. 5.1.4-4: Entwicklung der Bachforellenpopulation am Vorderen Seebach; [Quelle: IUS 2006]

zugsgebiet der Murg wurden im Rahmen der Erhebungen als episodisch schwach sauer eingestuft. Als permanent stark sauer klassifiziert wurden die Fließgewässer, die innerhalb des Verbreitungsgebietes des Unteren und Mittleren Buntsandsteins liegen. Dies betraf in erster Linie die Oberläufe der Murgzuflüsse. Je größer die zurückgelegte Fließstrecke der Gewässer ist, desto öfter wurde nur noch die Einstufung periodisch sauer ermittelt.

Im Jahr 2007 wurden 13 der 57 Gewässerabschnitte nochmals beprobt und lieferten ein durchweg positives Ergebnis: 3 Probestellen wiesen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 10 Probestellen die Säureklasse 2 (episo-

disch schwach sauer) auf. Alle 13 Probestellen haben sich entweder um ein bis zwei Klassen verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten.

### Grundwasser

Es werden neun geeignete von insgesamt hier existierenden vierzehn Grundwassermessstellen aus den drei Flussteileinzugsgebieten für die Beurteilung der Versauerungsentwicklung herangezogen. Z.T. liegen für die 1950er und 1960er Jahre einzelne pH-Werte vor, seit 1994 teilweise mehrere pro Jahr. Sechs Quellen liegen im Unteren und Mittleren Buntsandstein, drei im Kristallin. Die Einzugsgebiete der Messstellen sind fast durchweg bewaldet. Allerdings haben die Stürme der Jahre 1990/1991 und 1999 im Wald zum Teil starke Windwurfschäden verursacht. Windwurfschäden können durch den Abbau der freigelegten Nadel- und Blattstreu und der Humusschichten höhere Nitratgehalte und damit höhere Säuregehalte im Quellwasser verursachen. Umgekehrt können die bei Wiederaufforstungen meist praktizierten Kalkdüngungen und der Umbau zu Mischwäldern die pH-Werte ansteigen lassen bzw. den Absenkungen entgegenwirken.

Die Grundwasser-Messstellen zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte. Alle pH-Werte der Messstellen liegen auch in den Jahren 2005 bis 2007 im Bereich oder unterhalb des unteren Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Die mittleren pH-Werte an den einzelnen Quellen erreichen in den Jahren 2005 bis 2007 pH 4,8 bis 6,7. Dabei werden an drei Quellen gegenüber 1994 bis 1996 signifikante Anstiege

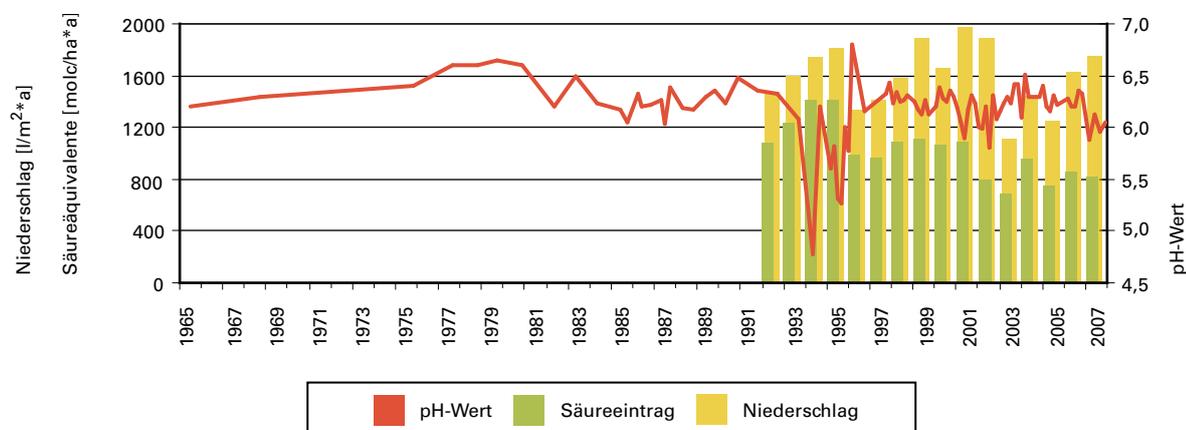


Abb. 5.1.4-5: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0004/213-2 Quelle Hoefelsbrunnen - Forbach im nördlichen Schwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag (Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau, Feldberg) und des atmosphärischen Säureintrags (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, Mittelwert der zwei LUBW-Depositionsmessstellen Hornisgrinde/Wildsee)

von 0,4 bis 0,6 festgestellt. Weiterhin werden an sechs der neun Quellen von 1996 bis 2007 positive Tendenzen festgestellt, da hier in den letzten Jahren nicht mehr so starke niederschlagsbedingte pH-Absenkungen wie in den 1980er und 1990er Jahren existieren. Jedoch zeigen die einzelnen älteren Daten aus den 1960er bis 1980er Jahren, daß damals die pH-Werte zum Teil höher lagen. An drei

weiteren Quellen ist die Entwicklung gleichgeblieben. Hier wird im niederschlagsreichen Jahr 2007 zum Teil wieder das niedrige pH-Niveau der auch niederschlagsreichen Jahre 1994 und 1995 erreicht.

In den Zeitreihen der pH-Werte einzelner Quellwässer ist in manchen Jahren der Zusammenhang zu den

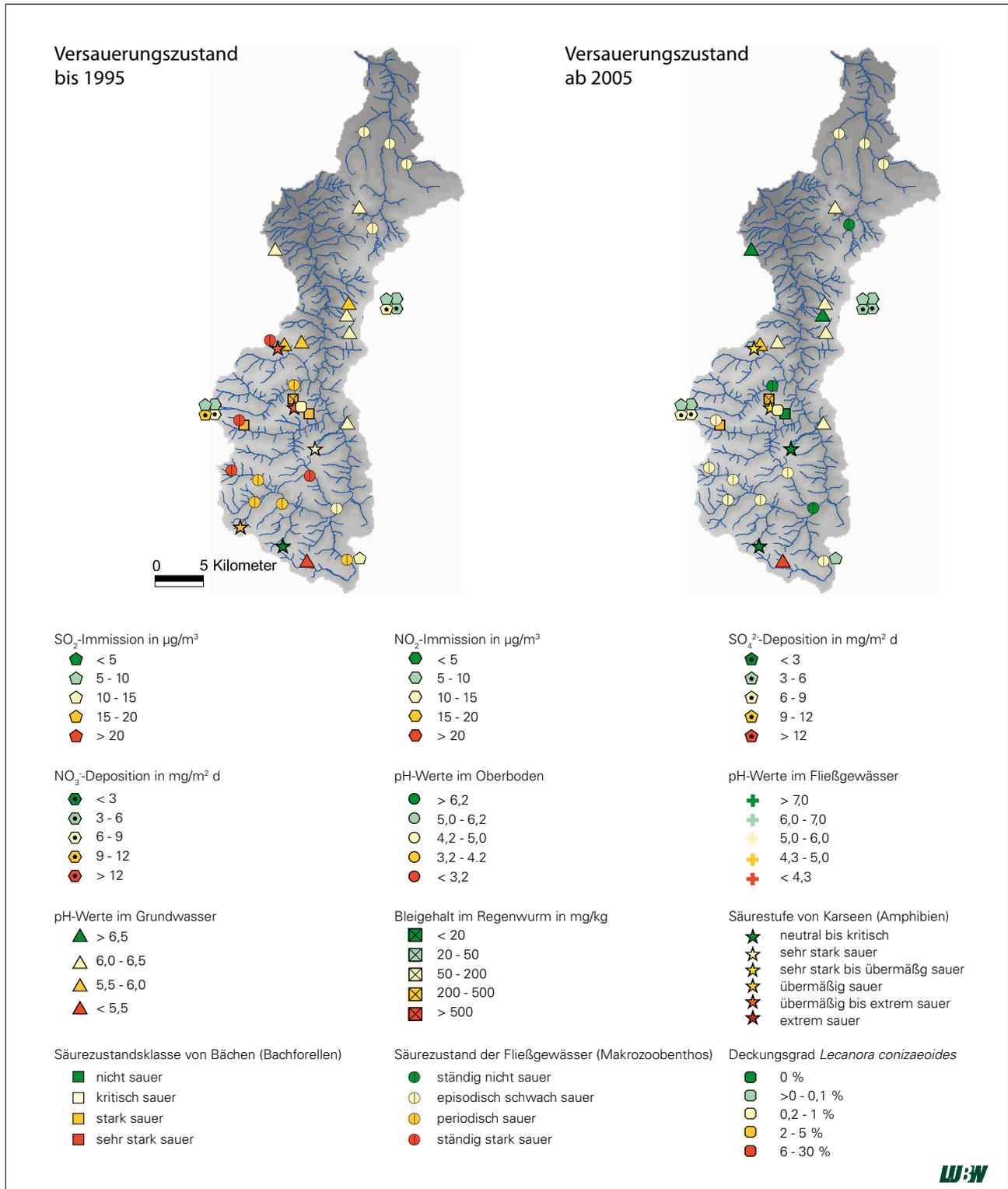
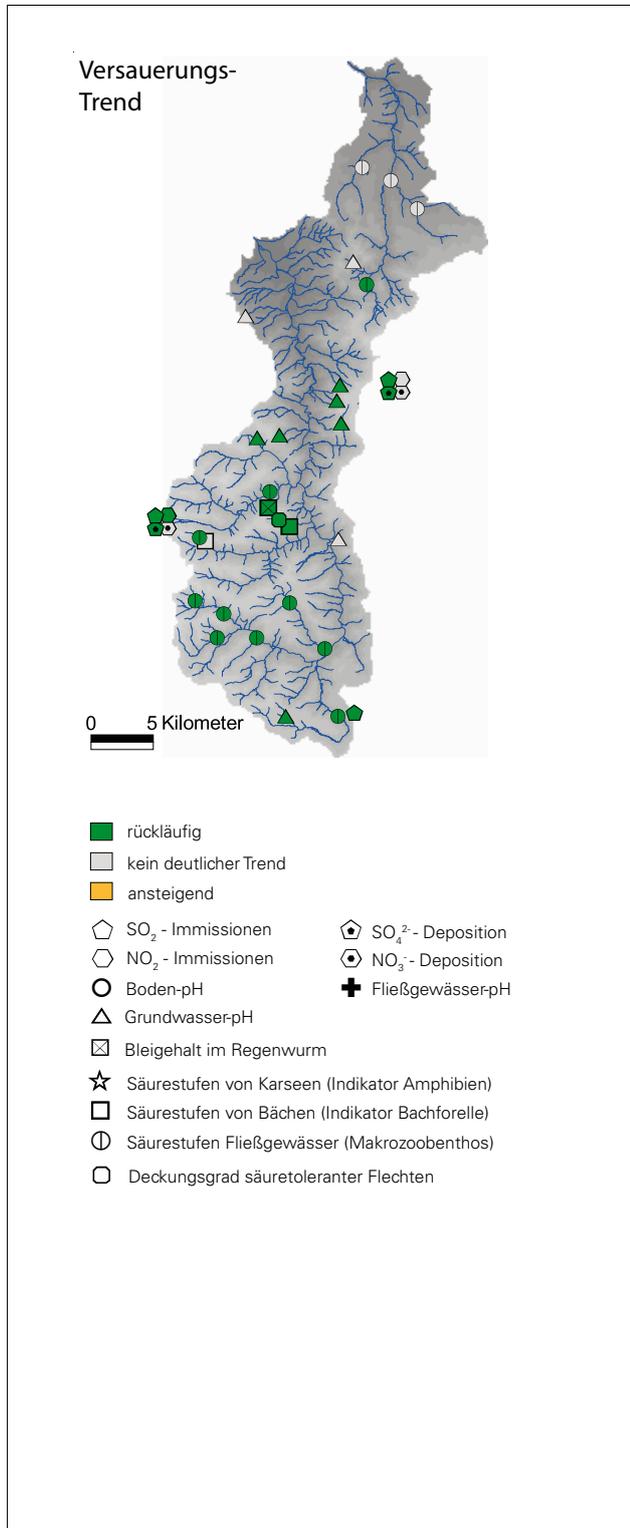


Abb. 5.1.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor 1995 und nach 2005 in den Einzugsgebieten von Alb, Murg und Schönmünz im nördlichen Schwarzwald

gemessenen hohen Säureeinträgen aus der Atmosphäre in Verbindung mit niederschlagsreichen Jahren auffällig. Die überdurchschnittlich hohen atmosphärischen Säureeinträge in den Jahren 1994 und 1995 (Abb. 5.1.2-1 und 5.1.4-5) führten in diesen Jahren und dem Folgejahr 1996 zu sehr niedrigen pH-Werten in den Quellwässern. Im Untersuchungsjahr 2007 fallen die pH-Werte an zwei

Messstellen wieder deutlich. Grund für die Abnahme sind offenbar die nach den Trockenjahren 2003 bis 2005 die in 2006 und 2007 wieder höheren Niederschläge, welche gerade im Frühjahr 2007 den pH-Wert sinken lassen (Abb. 5.1.4-5).

Beispielhaft wird die Versauerungsentwicklung anhand



#### Positiver Trend

Abgenommen haben die durch SO<sub>2</sub> verursachten atmosphärischen Säureeinträge. In der Folge haben sich die Amphibienpopulationen an den fünf Karseen und die Forellenpopulationen am Vorderen Seebach verbessert. Auch die Makrozoobenthospopulation hat sich überwiegend um ein bis zwei Säureklassen verbessert. Seit Beginn der zeitlich höher auflösenden pH-Wertmessungen im Quellwasser in den 1990er Jahren nimmt die Häufigkeit der sehr tiefen pH-Werte ab und zwar an sechs von neun Quellen. Dies kann auf die nachlassenden atmosphärischen Einträge zurückgeführt werden. An drei Quellen zeigen sich keine Veränderungen.

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. Der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt seit den 1960er und 1970er Jahren bei allen neun Messstellen keine deutliche Tendenz. Die Fischpopulationen am Wälzbach sind nach wie vor auf einem kritischen Niveau und auch die Altersstruktur ist noch nicht normal. Nicht an allen Karseen sind alle Amphibienarten, die im Schwarzwald natürlicherweise vorkommen wieder anzutreffen und die Absterberaten in manchen Seen immer noch zu hoch.

#### Negativer Trend

Nein



Abb. 5.1.5-2: Versauerungstrend für das Einzugsgebiet Alb, Murg und Schönmünz

der pH-Wert-Zeitreihe der Schichtquelle Höfelsbrunnen (715 m ü. NN) dargestellt (Abb. 5.1.4-5). Die Quelle Hoefelsbrunnen (0004/213-2) liegt bei der Ortschaft Forbach im mittleren bis unteren Buntsandstein in einem Mischwald oberhalb des Schwarzenbach-Stausees. Klüfte und Hangschutt führen der Quelle schnell versickerndes Wasser zu. Die größte pH-Wert-Anhebung tritt Mitte der 1990er Jahre auf. Lagen die Werte 1994 - 1996 oft unter pH 6,0 und erreichten sogar pH 4,7 als Minimum, so liegen die zwischenzeitlichen pH-Absenkungen ab 1997 nicht so tief wie vorher.

### **5.1.5 Gesamtbewertung**

Im Einzugsgebiet von Alb, Murg und Schön Münz liegt der pH-Wert der Oberböden häufig im extrem sauren Eisenpufferbereich. Ursächlich sind die natürlich sauren Ausgangsgesteine (> 60 % der Fläche), die hohen Niederschläge (240 mm über dem Landesdurchschnitt), der hohe Nadelwaldanteil (> 75 % der Waldflächen) und die historisch hohen atmosphärischen Säureeinträge.

In Abbildung 5.1.5-1 sind die Messdaten aus dem Einzugsgebiet zusammenfassend dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, indem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.1.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

## 5.2 Das Einzugsgebiet von Eyach, Enz, kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald

### 5.2.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Eyach, Enz, kleine Enz und Nagold liegt im nordöstlichen Schwarzwald (Abb. 5.2.1-1). Seine

Ausdehnung beträgt 418 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf 987 m ü. NN, der niedrigste auf 324 m ü. NN. Das betrachtete versauerungssensitive Gebiet ist geprägt durch

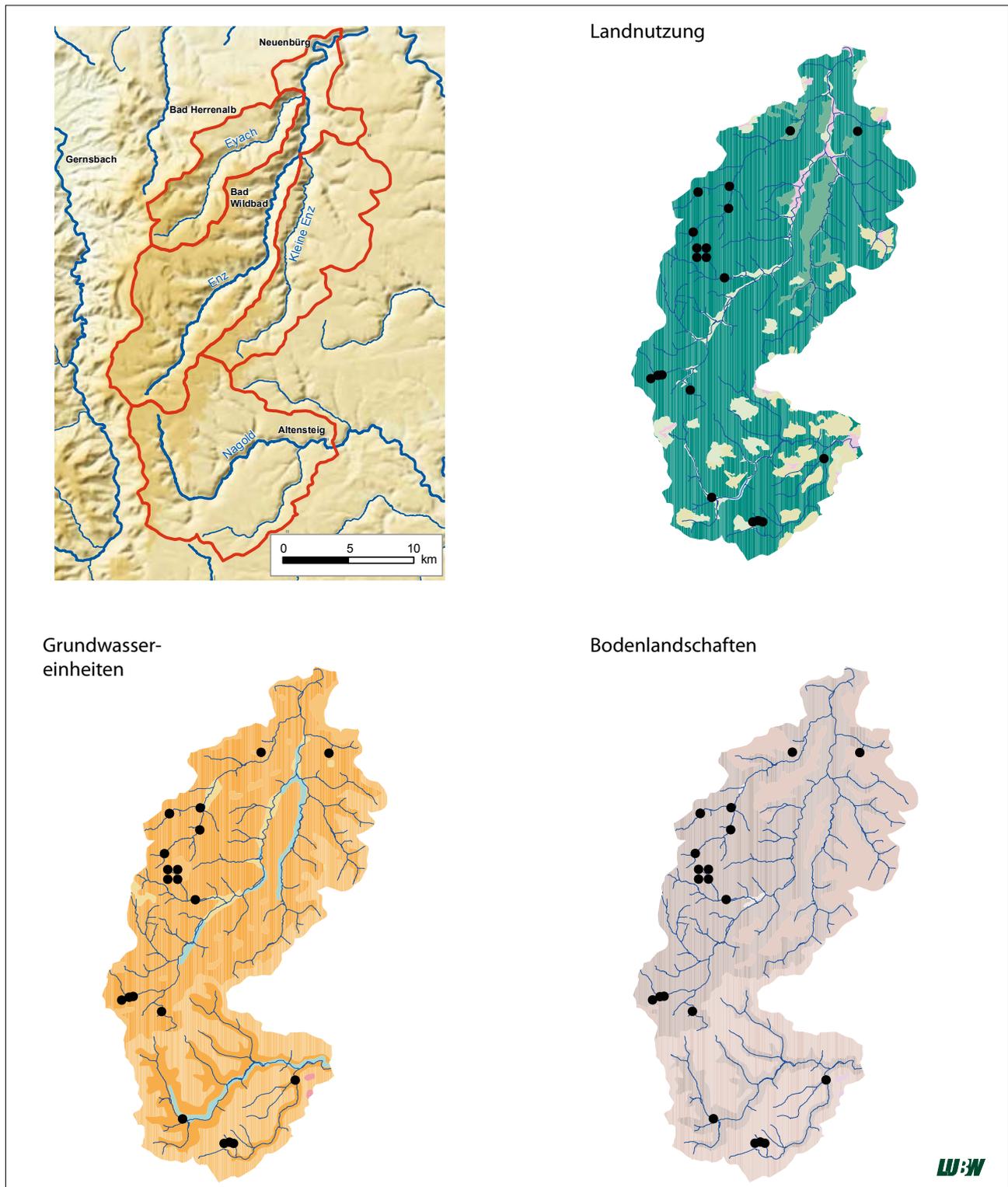


Abb. 5.2.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Eyach, Enz, Kleiner Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

ca. 2°C niedrigere Jahresmittel-Temperaturen und 240 mm höhere Niederschlagssummen als der Landesdurchschnitt.

**Landnutzung:** Über 80 % der gesamten Fläche ist von Nadelwald bedeckt. Landwirtschaft in Form von Grünland wird v.a. im Bereich des Einzugsgebietes der Nagold betrieben. Einige größere Siedlungen finden sich entlang der Enz (Bad Wildbad, Calmbach, Hofen) und an der Nagold (Altensteig).

**Bodenlandschaften und Hydrogeologie:** Die Flächenangaben der Bodenlandschaften und der Grundwassereinheiten variieren in diesem Untersuchungsgebiet deutlich. Dies hängt mit der Mächtigkeit des Oberen Buntsandsteins in diesem Raum zusammen. Der Obere Buntsandstein ist hier teilweise so geringmächtig, dass er als hauptsächlicher Grundwasserleiter nicht mehr relevant ist, hingegen aus der Sicht der Bodenbildung von entscheidender Bedeutung. Während der Obere Buntsandstein als Bodenlandschaft mit knapp 40 % angegeben wird, hat er als Grundwassereinheit 10 % weniger Flächenanteil. Eben diese 10 % sind hier dem Unteren und Mittleren Buntsandstein zugeschlagen, so dass diese mit einem Flächenanteil von mehr als 65 % die dominierende Grundwassereinheit dieses Gebietes ist. Entsprechend geringer fällt der Anteil des Unteren und Mittleren Buntsandsteins als Bodenlandschaft aus: etwa 60 % Flächenanteil. Es fin-

den sich überwiegend skeletthaltige Böden mit Sanden und Lehmsanden.

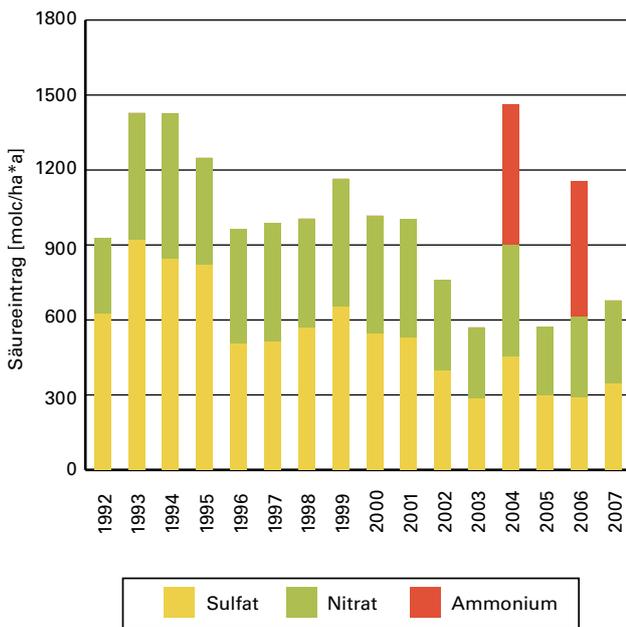
## 5.2.2 Atmosphäre

Betrachtet wird der Depositionsstandort Wildsee (920 m ü. NN). Die Messstelle zeigt rückläufige Sulfatbedingte Säureeinträge um ca. 50 % (Abb. 5.2.2-3). Der Nitratbedingte Säureeintrag zeigt deutliche Schwankungen und es zeichnet sich noch kein Trend ab. Im niederschlagsreichen Jahr 1994 wurde ein Nitrateintrag von 584 mol<sub>e</sub>/ha a beobachtet, während im trockenen Jahr 2003 nur ein Nitrateintrag von 286 mol<sub>e</sub>/ha a festgestellt wurde. Der Eintrag an Ammonium wurde nur in den Jahren 2004 und 2006 in der Gesamtd deposition erfasst und trägt in diesen Jahren zwischen 38 % und 2006 mit 47 % zum Säureeintrag bei.

Die Immissionskonzentration von Schwefeldioxid am Standort Wildsee verringerte sich von 1994 bis 2007 um rund 25 %. Der Mittelwert für Stickstoffdioxid schwankte zwischen 1994 bis 2007 auf weitgehend gleichem Niveau.

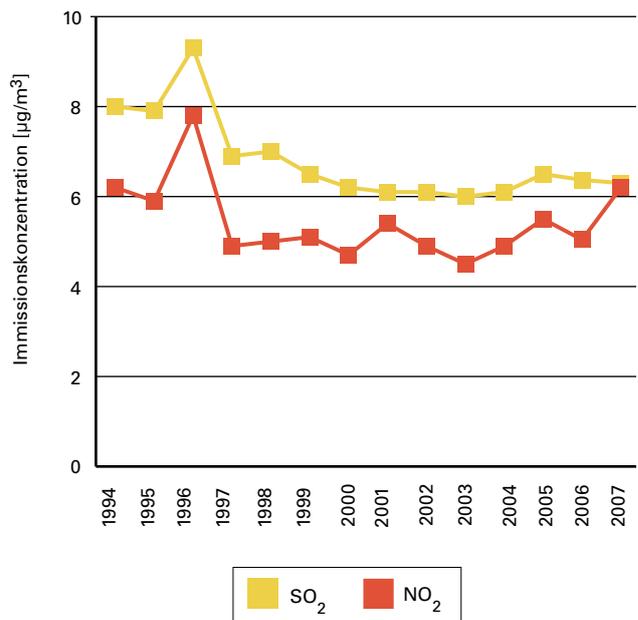
### Bioindikatoren Atmosphäre

Der Flechtenbewuchs der Wald-Dauerbeobachtungsfläche Pfalzgrafenweiler der Medienübergreifenden Umweltbe-



LUBW

Abb. 5.2.2-3: Säureeintrag an der Messstelle Wildsee von Sulfat und Nitrat von 1992 bis 2007, sowie Ammonium für 2004 und 2006



LUBW

Abb. 5.2.2-2: Schwefeldioxid- und Stickstoffdioxidimmissionen an der Messstelle Wildsee von 1994-2007

obachtung deutet auf dieser Fläche darauf hin, dass die Luftbelastung durch versauernde Substanzen nicht hoch sein kann. Denn sowohl im Jahr 1991 als auch elf Jahre später konnte die Flechte *Lecanora conizaeoides* (Säurezeiger) nicht nachgewiesen werden.

### 5.2.3 Pedosphäre

Die Boden-Dauerbeobachtungsfläche 106 (Pfalzgrafeweiler – Nadelwald) liegt in einer Höhe von ca. 680 m ü. NN im Bereich des Oberen Buntsandsteins. Der pH-Wert des Oberbodens dieser mittelgründigen Braunerde lag 1986 im Aluminium-Pufferbereich. Gleiches gilt für den Boden auf der Dauerbeobachtungsfläche 112 (Bad Herrenalb – Wald; 630 m ü. NN). Der Oberboden dieser podsolierten Braunerde ist mit pH 3,4 ebenfalls stark versauert. Der pH-Wert steigt nach unten im Profil etwas an und erreicht den Austauscher-Pufferbereich. Die zweite Beprobung im Jahr 2001 ergab hier keine signifikanten pH-Wert-Änderungen.

#### Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Pfalzgrafeweiler wurden zwischen 1985 und 2000 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand in den Jahren 1986 bis 1988 und sind seitdem rückläufig. 2000 lagen sie bei Blei immer noch deutlich über dem Landesdurchschnitt. Bei Cadmium etwa im Landesdurchschnitt und bei Zink über dem Landesdurchschnitt (Standort Pfalzgrafeweiler, Messjahr 2000: 35 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 3,2 mg Cd/kg TS gegenüber 3,5 mg Cd/kg TS; 300 mg Zn/kg TS gegenüber 238 mg Zn/kg TS) [LUBW 2006].

### 5.2.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen der Amphibienpopulationen fanden in diesem Einzugsgebiet an zweier Stauseen (Kaltenbachsee und Poppelsee) statt [Böhmer 2002]. Beide liegen am Oberlauf der Enz etwa 780 Meter über NN im Verbreitungsgebiet des Unteren und Mittleren Buntsandsteins.

Tab. 5.2.4-1: Mittlere pH-Werte von Karseen des Schwarzwaldes von 1987 bis 2008 [BÖHMER 2002, ergänzt LUBW]

Seen Schwarzwald	Untersuchungsjahr			
	1987-1990	1996	2002	2008
Kaltenbachsee	4,7	-	5,7	5,4
Poppelsee	5,5	-	6,0	5,5
Anzahl Messungen	75	6	26	1 (!)

**LUBW**

In Tabelle 5.2.4-1 sind die gemessenen pH-Werte in den Seen dargestellt. Danach scheint der pH-Wert im Wasser beider Seen seit 2002 stabil über dem toxikologisch bedenklichen Wert von 5,3 zu liegen; zu beachten ist jedoch, dass bei der pH-Wert Bestimmung 2008 nur eine Messung allerdings nach der Schneeschmelze durchgeführt wurde.

Die mittlere Laichschädigung von Grasfröschen am Kaltenbachsee wies 2002 (dem derzeit letzten Untersuchungsjahr) mit 70-90 Prozent immer noch einen sehr hohen Anteil auf, so dass dieses Gewässer nach wie vor als „sehr sauer“ bis „übermäßig sauer“ eingestuft werden muss. Allerdings hat die Zahl der Laichballen von Grasfröschen von 1987 bis 2002 um etwa 250 Prozent zugenommen. Böhmer [2002] kommt aufgrund biologischer Befunde für den Poppelsee zu einer leichten Verbesserung des Säurezustandes („sehr sauer bis übermäßig sauer“ auf „sehr sauer“), vermutet aber für diesen wie für alle pufferschwachen Seen das kurzfristige Auftreten von starken Säureschüben. Der geringe Anteil von Laichschäden beim Grasfrosch und das Vorhandensein der säureempfindlichen Erdkröte begründen diese Einschätzung.

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Im Einzugsgebiet wurde nur der Kaltenbach kontinuierlich auf seine Bachforellen-Population untersucht. Wie schon in den Jahren 1986 und 1996 konnten keinerlei Fische gefangen [IUS 2006] und auch nur sehr wenige Lebewesen des Gewässerbodens (Makrozoobenthos) gefunden werden. Es ist davon auszugehen, dass das Erlöschen des Fischbestandes im Kaltenbach versauerungsbedingt war.

Ein Drittel der 24 Gewässerabschnitte wurde in den Jahren 1993 bis 1995 anhand der Zusammensetzung des Makrozoobenthos als permanent stark sauer eingestuft. Bei sieben Gewässerabschnitten wurde die Einstufung periodisch sauer ermittelt. Die Gewässer liegen ausschließlich in den Einzugsgebieten von Enz und Eyach im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes im Bereich

des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. Die Gewässer, deren Zuflüsse teilweise den Bereich des Oberen Buntsandsteins durchfließen bzw. dort ihr Quellgebiet haben, konnten deutlich besser eingestuft werden. Zwei Gewässerabschnitte im Bereich des Einzugsgebietes der Nagold, sowie drei im Gebiet der Kleinen Enz werden dementsprechend als episodisch schwach sauer klassifiziert.

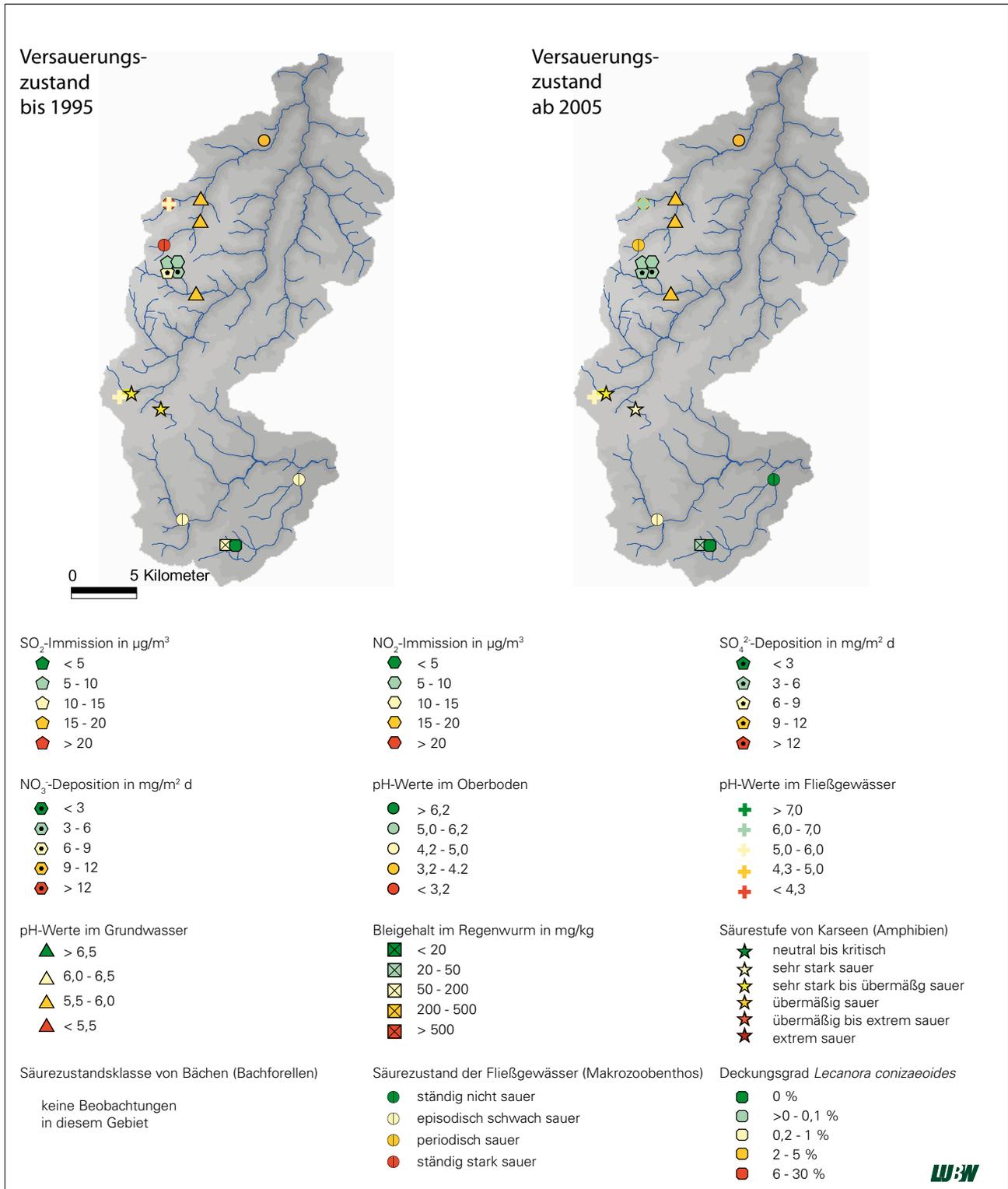


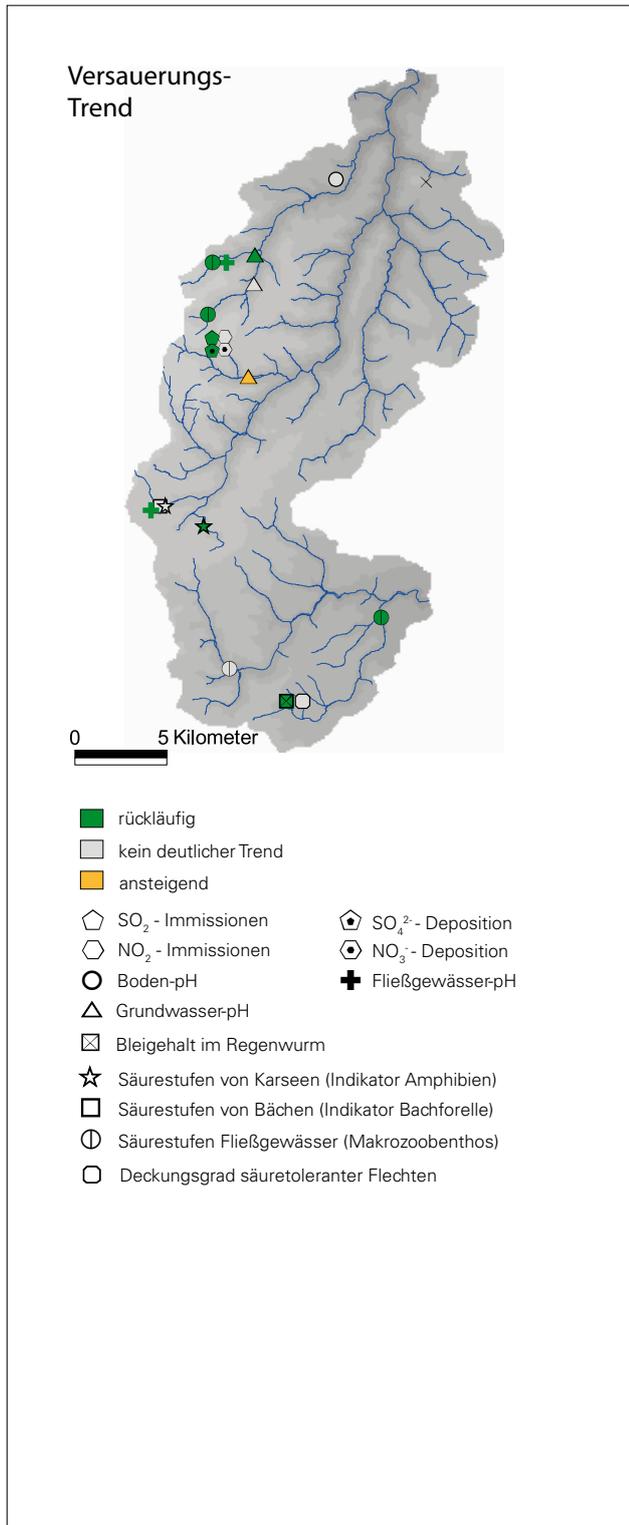
Abb. 5.2.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor 1995 und nach 2005 in den Einzugsgebieten von Eyach, Enz, Kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald

Vier der 24 Gewässerabschnitte wurden 2007 nochmals beprobt. Dabei wies 1 Probestelle die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 1 Probestelle die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Die Eyach und der Dürreychbach zeigten aber mit Säureklasse 3 weiterhin eine periodische Versauerung an. Insgesamt haben sich aber drei der vier Probestellen um eine Säureklasse ver-

bessert und eine Probestelle weist gleichbleibend die Säureklasse 2 auf.

### Grundwasser

Für die Beurteilung der Versauerungsentwicklung werden drei geeignete von insgesamt elf hier existierenden



### Positiver Trend

Abgenommen haben die durch SO<sub>2</sub> verursachten atmosphärischen Säureeinträge. In der Folge hat der pH-Werte im Dürreychbach (Dauermessstelle) zugenommen. Und am Kaltenbachsee (einziger See mit Wiederholbeobachtungen) wurden im Vergleich der Jahre 1987 und 2002 um 250 % mehr Grasfrosch-Laichballen beobachtet.

### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. Die Makrozoobenthosuntersuchungen an Eyach und Dürreychbach weisen im Ergebnis mit der ermittelten Säureklasse 3 auf eine weitere periodische Versauerung hin (Bezug 2007). Bis heute haben sich im Kaltenbach keine Fische angesiedelt (das Aussterben wurde auf die anthropogene Versauerung zurück geführt).

Der langfristige pH-Trend im Quellwasser seit den 1970er und 1980er Jahren wie auch der Situationsvergleich mit Mitte der 1990er Jahre zeigt keine deutliche Tendenz. Je eine von drei Quellen zeigt eine positive, eine gleichbleibende und eine negative Entwicklung.

### Negativer Trend

Nein



Abb. 5.2.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Eyach, Enz, Kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald

Grundwassermessstellen herangezogen. z. T. liegen für die 1970er und 1980er Jahre einzelne pH-Werte vor, seit 1994 teilweise mehrere pro Jahr. Für Nagold und Kleine Enz gibt es keine geeigneten Messstellen. Die durchweg bewaldeten Einzugsgebiete liegen im Unteren und Mittleren Buntsandstein und sind zum Teil von Straßen durchzogen. Die Quellwässer haben zum Teil Kontakt zum Zechstein. Eine Quelle entwässert ein Moor. Die Einzugsgebiete sind von den Sturmschäden der Jahre 1990/1991 und 1999 verschont geblieben.

Die Messstellen zeigen im Rohwasser im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte. Alle pH-Werte der Messstellen liegen von 2005 bis 2007 weit unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Die mittleren pH-Werte an den einzelnen Quellen erreichen in den Jahren 2005 - 2007 nur pH 5,5 bis 5,8 und zeigen gegenüber 1994 bis 1996 keine signifikante Änderung.

Beispielhaft soll die Versauerungsentwicklung der Großen Wiesenquelle (0016/262-9 QF 2) beschrieben werden. Die Quelle liegt zwischen den Orten Gernsbach und Bad Wildbad auf etwa 570 m Höhe, das mit Nadelwald bestandene Einzugsgebiet umfasst den Unteren und Mittleren Buntsandstein bis auf 930 m hinauf. Die Messstelle zeigt in 2005 bis 2007 gegenüber den 1990er Jahren höhere pH-Werte. Die pH-Werte liegen von 1998 bis 2006 mit pH 5,6 bis 6,1 immer über pH 5,5 und zeigen nicht mehr die in 1994, 1995 und 1997 beobachteten kurzfristig sehr großen pH-Absenkungen bis auf zum Teil pH 4,7

(Abb. 5.2.4-1). In der Zeitreihe der pH-Werte im Quellwasser ist in manchen Jahren ein Zusammenhang zu Niederschlägen und zu den gemessenen Säureeinträgen aus der Atmosphäre auffällig (Abb. 5.2.2-3, 5.2.4-1). Die insbesondere in den Jahren 1993, 1994 und 1995 hohen Niederschläge und die überdurchschnittlich hohen Säureeinträge führten in diesen Jahren zu sehr niedrigen pH-Werten im Quellwasser. Auch in 2007 ist ein Abfallen zu beobachten. Dies korreliert mit den in 2007 wieder hohen Stickstoffemissionen an der Luftmessstelle Wildsee. Sie sind wieder so hoch wie es zuletzt in 1994 und 1995 der Fall war (Abb. 5.2.2-2). Es ergibt sich keine Korrelation mit der Höhe der Säureeintragsmengen in 2007. Diese sind weit niedriger als in den 1990er Jahren, jedoch existiert gegenüber den Vorjahren 2005 und 2006 ein relativer Anstieg des Säureeintrags, der gemeinsam mit den höheren Niederschlägen die relative pH-Absenkung im Quellwasser in 2007 erklären kann. Jedoch fallen in 2007 im Quellwasser die Werte mit pH 5,6 bis 5,8 nicht so tief ab wie in Mitte der 1990er Jahre mit Werten von weit unter pH 5,0. Dies ist eine positive Entwicklung. Allerdings ergibt sich hier an dieser Messstelle für den Zeitraum 1996 bis 2007 keine positive Änderung gegenüber den vereinzelt aus den 1970er und 1980er Jahren vorliegenden Daten.

Bei einer weiteren Quelle ist die Entwicklung als gleichbleibend einzustufen, bei der anderen Quelle als negativ, da ab 1999 nur noch Werte kleiner als 6,0 existieren. Vorher lag etwa die Hälfte aller Werte über 6,0 pH.

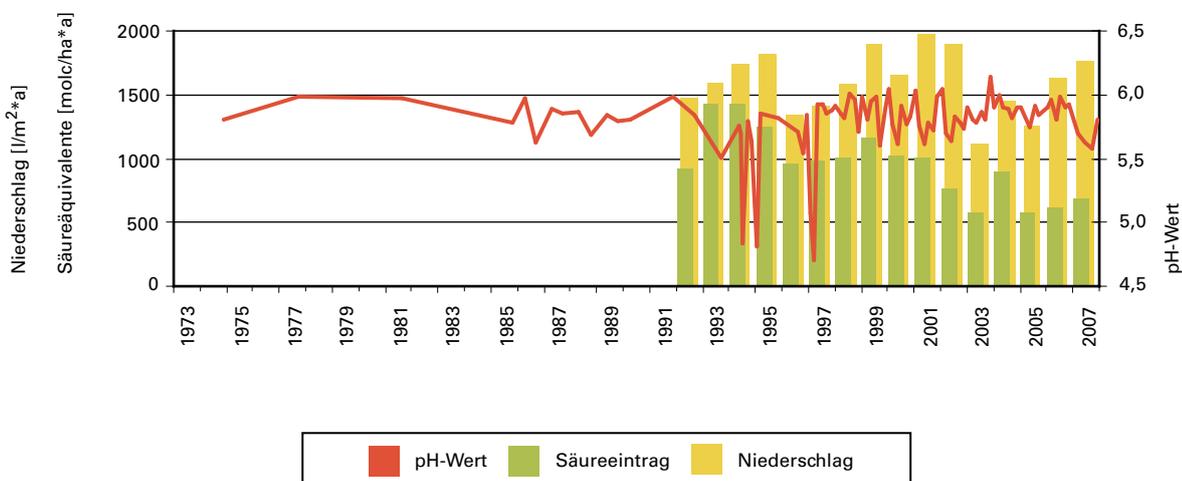


Abb. 5.2.4-1: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0016/262-9 QF 2 Große Wiesenquelle - Gernsbach im nordöstlichen Schwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag (Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitenau, Feldberg) und des atmosphärischen Säureeintrags (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, LUBW-Depositionsmessstelle Wildsee).

### 5.2.5 Gesamtbewertung

Im nordöstlichen Schwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich. Ursächlich sind die natürlich sauren Ausgangsgesteine (ca. 100 % der Fläche), die hohen Niederschläge (240 mm über dem Landesdurchschnitt), der hohe Nadelwaldanteil (> 80 % der Waldflächen) und die historisch hohen atmosphärischen Säureinträge.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.2.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Eyach, Enz, Kleine Enz und Nagold im nordöstlichen Schwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

## 5.3 Das Einzugsgebiet von Oosbach, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald

### 5.3.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Oos, Sandbach, Acher und Rench liegt im nordwestlichen Schwarzwald (Abb. 5.3.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 263 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf

1157 m ü. NN, der niedrigste auf 145 m ü. NN. Das betrachtete versauerungssensitive Gebiet ist geprägt durch ca. 2 °C niedrigere Jahresmittel-Temperaturen und bis zu

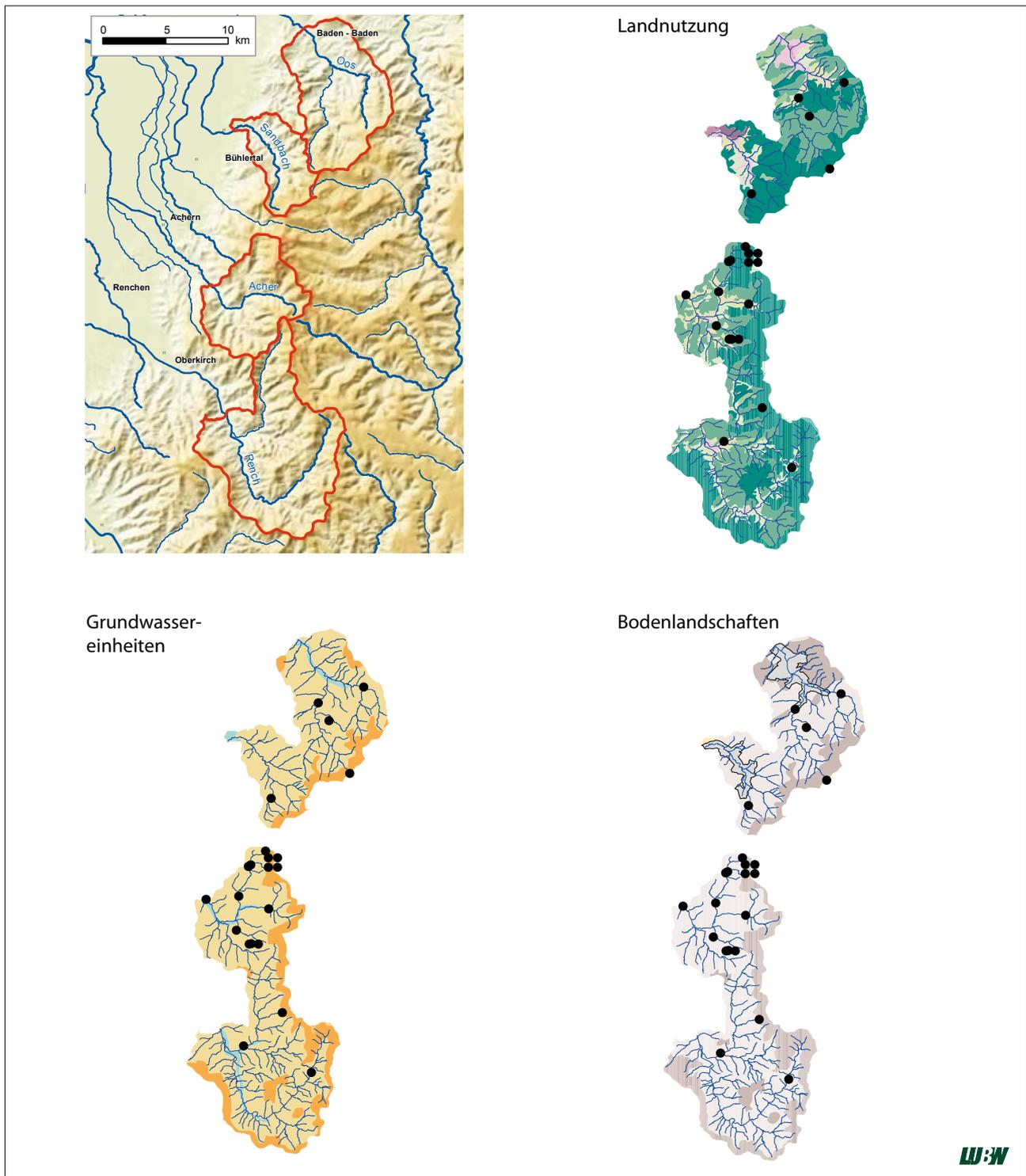


Abb. 5.3.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Oosbach, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

monatlich 70mm höhere Niederschlagssummen im Herbst und Winter als im Landesdurchschnitt.

**Landnutzung:** Der Mischwaldanteil ist mit über 30 % gegenüber den beiden bisher erläuterten Einzugsgebieten deutlich erhöht. Insbesondere auf den süd- bis südwest-exponierten Hängen entlang der Rench treten sie häufig auf. Nadelwälder (46,8 %) sind dagegen vielfach in den höheren Regionen vertreten.

**Bodenlandschaften:** Paläozoische Sedimente des Rotliegenden und kristalline Gesteine des Grundgebirges dominieren mit einem Flächenanteil von fast 80 %. Der schwach puffernde Mittlere und Untere Buntsandstein hat einen Flächenanteil von über 17 % und ist in den Höhenlagen über 700 m zu finden. In den Flusstälern kommen quartäre Schotter vor (3,2 %).

### 5.3.2 Atmosphäre

Für die Betrachtung der Deposition wie auch der Immission wird der Standort Hornisgrinde (1163 m ü. NN) betrachtet.

Der Säureeintrag durch Sulfat an der Messstelle Hornisgrinde verringerte sich im Zeitraum 1992 bis 2007 um rund 40 % (siehe Abbildung 5.3.2-1). Der Nitrat-bedingte

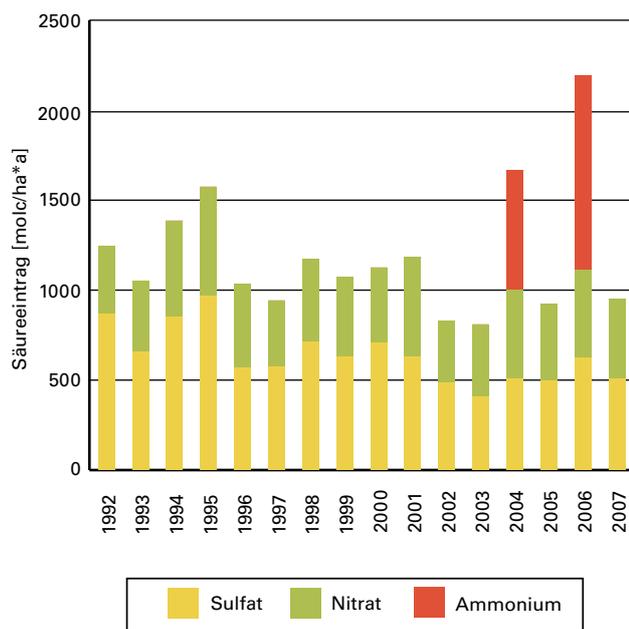


Abb. 5.3.2-1: Säureeintrag an der Messstelle Hornisgrinde von Sulfat und Nitrat von 1992 bis 2007, sowie Ammonium für 2004 und 2006

Säureeintrag zeigt dagegen keinen Trend. Das Maximum wurde im niederschlagsreichen Jahr 1995 mit einem Nitratreintrag von 608 mol<sub>c</sub>/ha a erreicht, die niedrigsten Einträge wurden in den Jahren 1992 und 1993 festgestellt. Der Säureeintrag an Ammonium wurde nur in den Jahren 2004 und 2006 in der Gesamtdosition erfasst, mit Beiträgen von 40 % im Jahr 2004 und 49 % im Jahr 2006.

Die Immissionskonzentration von Schwefeldioxid am Standort Hornisgrinde verringerte sich von 1994 bis 2007 um rund 25 %. Die Immissionskonzentration an Stickstoffdioxid zeigt im gleichen Zeitraum mit Schwankungen leicht rückläufige Konzentrationen (Abb. 5.3.2-3).

### Bioindikatoren Atmosphäre

Flechtenuntersuchungen wurden auf der Wald-Dauerbeobachtungsfläche Ottenhöfen durchgeführt. Diese ist nach Sturmwurf im Jahre 2002 um einige Kilometer in südöstlicher Richtung verlegt worden. Daher lassen sich die Ergebnisse der Flechtenerhebung aus den Jahren 1991 und 2003 nur eingeschränkt miteinander vergleichen. Der Deckungsgrad der Flechte *Lecanora conizaeoides* war im Jahr 1991 geringfügig niedriger als im Jahr 2003.

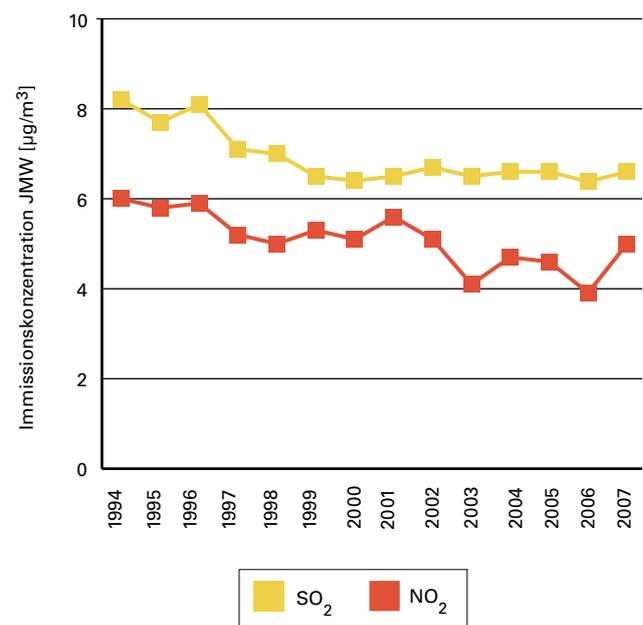


Abb. 5.3.2-2: Schwefeldioxid- und Stickstoffdioxidimmissionen an der Messstelle Hornisgrinde von 1994-2007

### 5.3.3 Pedosphäre

Im Einzugsgebiet befinden sich drei Boden-Dauerbeobachtungsflächen mit je einmaliger Untersuchung im Jahr 1986. Die schon genannte Dauerbeobachtungsfläche 114 (Baden-Baden 4) liegt auf der Wasserscheide von Murg und Oosbach und kann darum zur Charakterisierung dieses Einzugsgebietes ebenfalls herangezogen werden (Beschreibung s.o.). Die Standorte Baden-Baden 1 (115) und Ottenhöfen (116) liegen beide im Kristallin auf einer Höhe von 500 bis 600 m ü. NN unter Nadelwald. Sie sind oberflächlich (Ahe- bzw. Ah-Horizont) mit pH um 3,2 weniger stark sauer wie der Boden des Standortes Baden-Baden 4. Die pH-Werte nehmen im Profil nach unten zu und erreichen im Unterboden den Austauscher-Pufferbereich.

#### Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Ottenhöfen wurden zwischen 1986 und 2000 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand in den Jahren 1986 bis 1988 und sind seitdem rückläufig. 2000 lagen sie bei allen drei Schwermetallen immer noch deutlich über dem Landesdurchschnitt (Standort Ottenhöfen, Messjahr 2000: 67 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 5,2 mg Cd/kg TS gegenüber 3,5 mg Cd/kg TS; 320 mg Zn/kg TS gegenüber 238 mg Zn/kg TS) [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

### 5.3.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Am Brandbach als Zufluss des Sandbaches und an der Bühlott im Einzugsgebiet der Acher wurden 1995 und im Jahr 2000 die Bachforellen-Populationen untersucht. Die Bäche liegen nur wenige Kilometer voneinander entfernt und haben hinsichtlich ihrer Nutzung und ihrer geologischen Verhältnisse ähnliche Bedingungen. Die Einzugs-

gebiete der Oberläufe von Brandbach und Bühlott sind überwiegend bewaldet und befinden sich im Bereich des Kristallins. Beide Bäche wurden im Jahr 1995 als stark sauer eingestuft. Bis zum Jahr 2000 hat sich an der Bühlott die Versauerungssituation so stark verbessert, dass der Bach als nicht sauer klassifiziert werden konnte. Der Brandbach erreichte im gleichen Zeitraum immerhin den Status „kritisch sauer“. Nach wie vor konnten nur sehr wenige Jungfische in diesem Bach gefangen werden. Seit 2006 zeichnet sich aber auch hier eine Trendwende zum Besseren ab [IUS 2006].

Die Bestimmung des Säurezustandes von Gewässern anhand des Vorkommens des Makrozoobenthos im Zeitraum 1993 bis 1995 erbrachte folgende Erkenntnisse: Als permanent stark saure Gewässerabschnitte wurden drei Gewässerabschnitte im Einzugsgebiet der Acher eingestuft. Weitere drei Messstellen sind mit dem Status periodisch sauer versehen worden. Drei Viertel der Messstellen wurden als nur episodisch schwach sauer bzw. permanent nicht sauer angesprochen. Alle untersuchten Gewässer befinden sich im Bereich des kristallinen Grundgebirges. Die Nutzung scheint im Falle der 24 Makrozoobenthos-Messstellen im Betrachtungsgebiet keine große Bedeutung auf den Säurezustand zu haben, denn nur eine der sechs Messstellen im Bereich verbreiteter Nadelgehölze wurde als permanent stark sauer eingestuft. Vier der übrigen fünf Messstellen sind als episodisch schwach sauer klassifiziert worden, ein Gewässerabschnitt wurde als periodisch sauer eingeordnet.

9 der 24 Gewässerabschnitte wurden 2007 nochmals beprobt und lieferten ein durchweg positives Ergebnis: 3 Probestellen wiesen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 6 Probestellen die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Alle 9 Probestellen haben sich entweder um ein bis zwei Klassen verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten.

#### Grundwasser

Von den in diesem Flussgebiet vorhandenen insgesamt sechs Grundwassermessstellen sind drei für eine Beurteilung der Versauerungsentwicklung geeignet. Es handelt sich dabei meist um Messstellen, die über mehrere Jahre

sogar mehrmals im Jahr beprobt worden sind. Eine Quelle liegt im kristallinen Grundgebirge, die beiden anderen im Unteren und Mittleren Buntsandstein, zum Teil mit Grundwasserkontakt zu Vulkaniten. Alle Messstellen sind Hangschuttquellen mit sehr oberflächennahen Grundwassersystemen, welche aufgrund fehlender Deckschichten auf Niederschläge sehr schnell mit steigenden Schüttungsmengen reagieren. Die Messstellen liegen in den Flusseinzugsgebieten von Acher, Rench und Sandbach. Für das Einzugsgebiet des Oosbaches gibt es keine geeigneten Grundwassermessstellen. Die Einzugsgebiete der geeigneten Messstellen sind durchweg bewaldet. Zwei der drei Einzugsgebiete sind von Windwurfschäden der Stürme der Jahre 1990/1991 und 1999 betroffen gewesen. Flächenhafte Windwurfschäden auf großen Waldflächen verursachen durch den Abbau der freigelegten Nadel- und Blattstreu und der Humusschichten höhere Nitratgehalte und damit gleichzeitig auch höhere Säuregehalte im Quellwasser, d.h. die pH-Werte sinken. Jedoch können Wiederaufforstungen, Kalkungen und der Umbau zu Mischwäldern die pH-Werte ansteigen lassen bzw. den Absenkungen entgegenwirken.

Die Quellen zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte. Im Zeitraum 1975 bis 2007 liegen nur wenige Einzelwerte über dem unteren Grenzwert der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Die mittleren pH-Werte an den einzelnen Quellen erreichen in den Jahren 2005 bis 2007 pH 5,7 bis 6,2 und zeigen damit gegenüber 1994 bis 1996 nur in einem Fall eine

signifikante Verbesserung: an der Messstelle Kaltenbrunnen stieg der für 1994 bis 1996 mittlere pH-Wert von 5,2 auf pH 5,7 in 2005 bis 2007.

Mit einem mittleren pH-Wert von 5,0 wies die Quelle Kaltenbrunnen (0603/213-4) im Jahr 1995 den mit Abstand niedrigsten Wert auf. Hier und an den anderen Quellen sind oftmals tief reichende episodische pH-Absenkungen zu beobachten, wie z.B. am o.g. Kaltenbrunnen bis auf pH 4,3 (Abb. 5.3.4-1). Die Quelle Kaltenbrunnen liegt im Flussgebiet des Sandbaches, auf der Gemarkung der Gemeinde Sasbachwalden, auf 900 m Höhe am Westhang unterhalb der Hornsgrinde. Das Einzugsgebiet erstreckt sich bis zum Kamm der Hornsgrinde. Die Hänge der Hornsgrinde sind mit groben Blockschuttdecken aus Buntsandsteinmaterial bedeckt, in denen Regenwasser schnell versickert und der Quelle zugeführt wird.

Die Quellwasseraustrittsstelle liegt zwar im Bereich des Kristallins, dennoch wird das Wasser stark durch die auflagernden zum Teil auch sandigen Schuttsschichten des Unteren und Mittleren Buntsandsteins geprägt, welche ärmer an versauerungsabpuffernden Mineralien sind als das Kristallin. Das Grundwasser dieser Quelle wird beim Passieren dieser Deckschichten nicht oder nur kaum gepuffert und die Fließstrecke auf dem grundwasserstauendem kristallinen Gestein reicht nicht aus, um den pH-Wert deutlich anzuheben. In der Zeitreihe der pH-Werte im Quellwasser ist teilweise der Zusammenhang zu den gemessenen hohen Säureeinträgen aus der

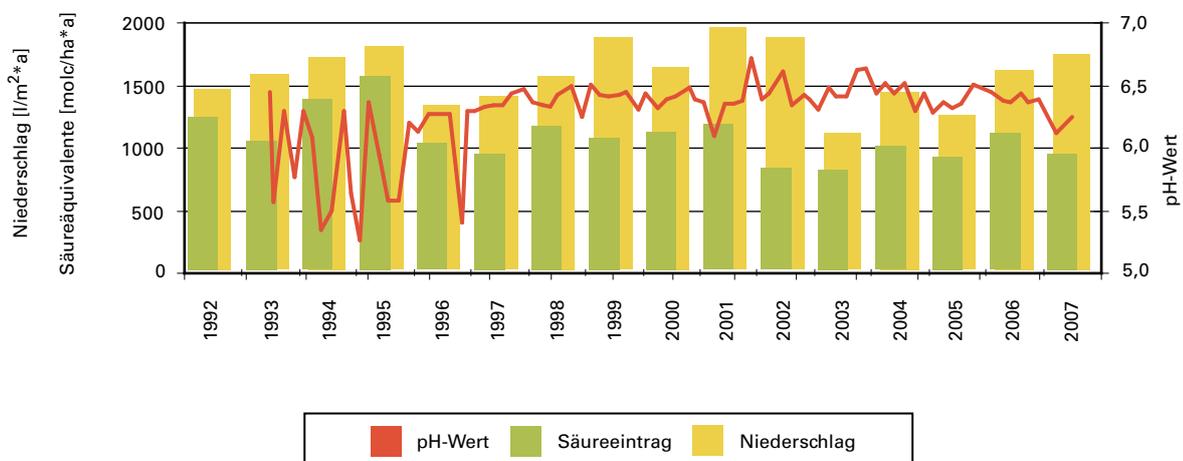


Abb. 5.3.4-1: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0603/214-4 QF 4 Kaltenbrunnen - Sasbachwalden im nordwestlichen Schwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag (Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau, Feldberg) und des atmosphärischem Säureeintrags (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, LUBW-Depositionsmessstelle Hornsgrinde).

Atmosphäre (Abb. 5.3.2-1, 5.3.4-1) bzw. den Immissionen (Abb. 5.3.2-2) auffällig. Die insbesondere in den Jahren 1994 und 1995 bzw. 1996 überdurchschnittlich hohen Säureeinträge bzw. Immissionen führten in diesen Jahren im Quellwasser oft zu sehr niedrigen pH-Werten bis weit unter pH 5,5. Im folgenden Zeitraum von 1997 bis 2007

gibt es solche Minima in dieser Ausprägung und Häufigkeit nicht mehr. Nur in 2001 und 2007 sinken zwei Einzelwerten unter pH 5,5. Jedoch fallen die pH-Werte nicht so tief bis auf pH 4,3 wie Mitte der 1990er Jahre, sondern liegen mit pH 5,4 nur knapp unter pH 5,5. Abgesehen von diesen beiden Einzelereignissen liegen die pH-Wer-

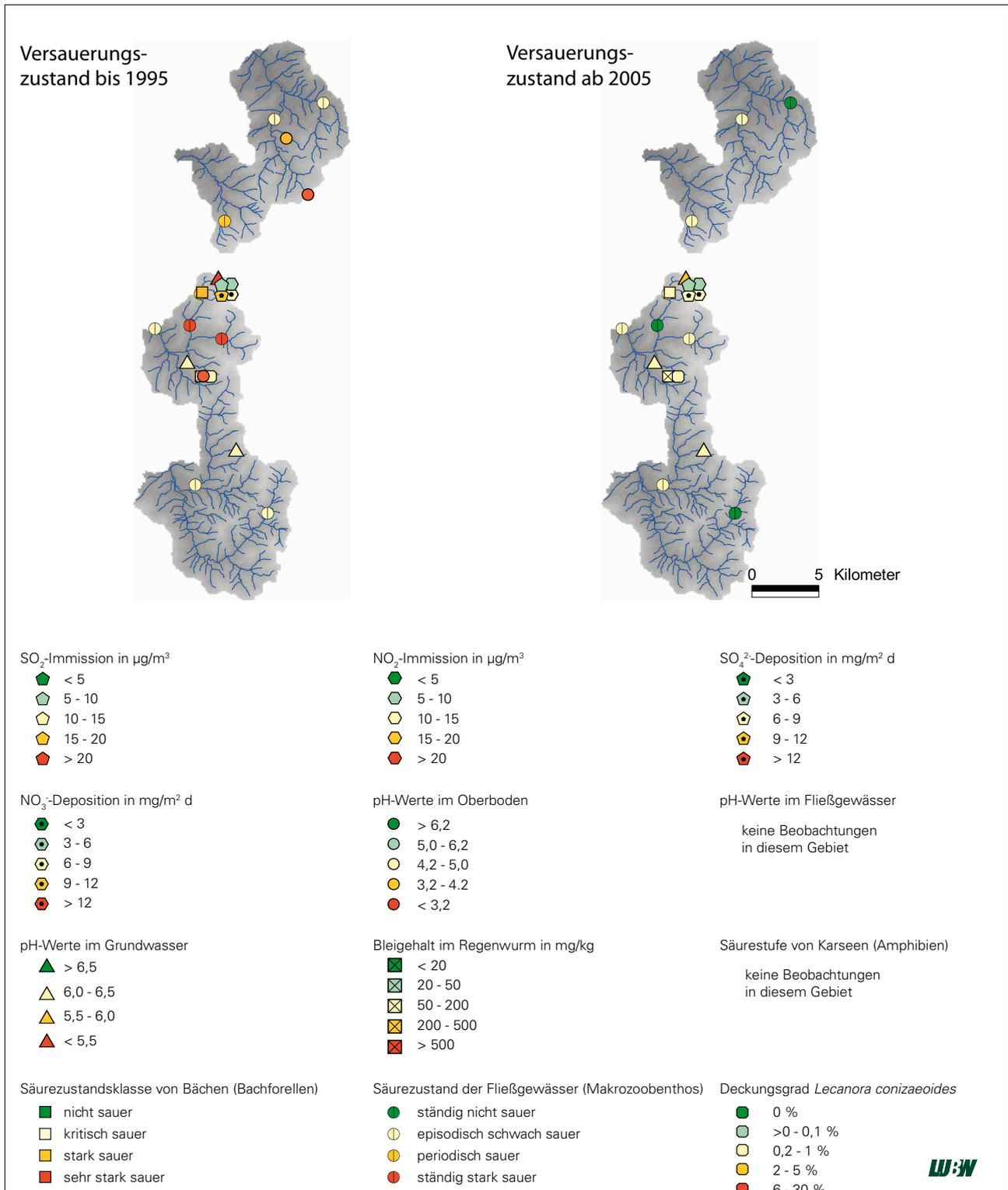
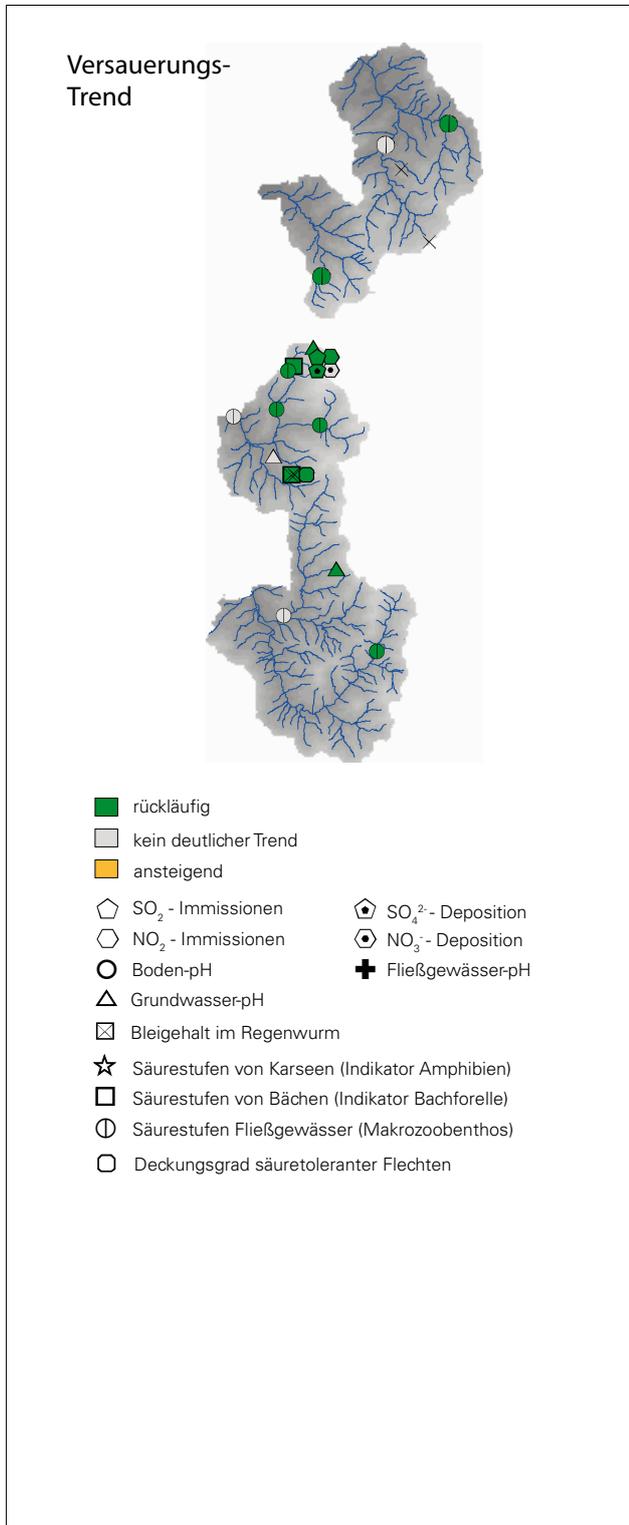


Abb. 5.3.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Oos, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald

te von 1997 bis 2007 immer über pH 5,5, erreichen mit pH 6,2 auch höhere Werte und zeigen nicht mehr die von 1993 bis 1996 beobachteten sehr großen pH-Absenkungen.

Analog gilt dies auch für die Rotenbachquelle im Einzugsgebiet der Rench mit einzelnen pH-Werten von 5,2

bis 6,8 und einem mittleren Jahreswert von 5,9 in 1995. Hier sind im Laufe der Jahre auch episodische pH-Wert-Absenkungen bis pH 5,2 zu beobachten, welche sich nach 1997 nicht mehr wiederholen. Dies ist als eine positive Entwicklung zu werten. Bei der dritten Quelle ist die Entwicklung als unverändert einzustufen.



#### Positiver Trend

Abgenommen haben die durch SO<sub>2</sub> verursachten atmosphärischen Säureeinträge. Die neun Makrozoobenthos-Probenahmestellen, die bislang wiederholt beprobt wurden, haben sich entweder um ein bis zwei Klassen verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten. An zwei von drei oberflächennahen Quellen, die sehr schnell auf Niederschläge reagieren, wurden zuletzt Mitte der 1990er Jahre episodisch starke pH-Wert Absenkungen gemessen. An einer Quelle ist die Entwicklung gleichbleibend.

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. Der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt im Vergleich zu Einzelmessungen der 1970er und 1980er Jahre bis heute keine deutliche Tendenz.

#### Negativer Trend

Nein

Abb. 5.3.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Oos, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald

### 5.3.5 Gesamtbewertung

Im nordwestlichen Schwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich. Ursächlich sind die natürlich sauren Ausgangsgesteine (80 % der Fläche ist Grundgebirge), die hohen Niederschläge (bis zu 70 mm pro Monat über dem Landesdurchschnitt), der Nadelwaldanteil (47 % der Waldflächen, insbesondere in höheren Regionen) und die historisch hohen atmosphärischen Säureeinträge.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.3.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Oosbach, Sandbach, Acher und Rench im nordwestlichen Schwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.3.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

## 5.4 Das Einzugsgebiet von Kinzig, Wolfach, Schiltach, Gutach und Erlenbach im Mittleren Schwarzwald

### 5.4.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Kinzig, Wolfach, Schiltach, Gutach und Erlenbach liegt im Mittleren Schwarzwald (Abb.

5.4.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 955 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf 1081 m ü. NN, der niedrigste auf 173 m ü. NN.

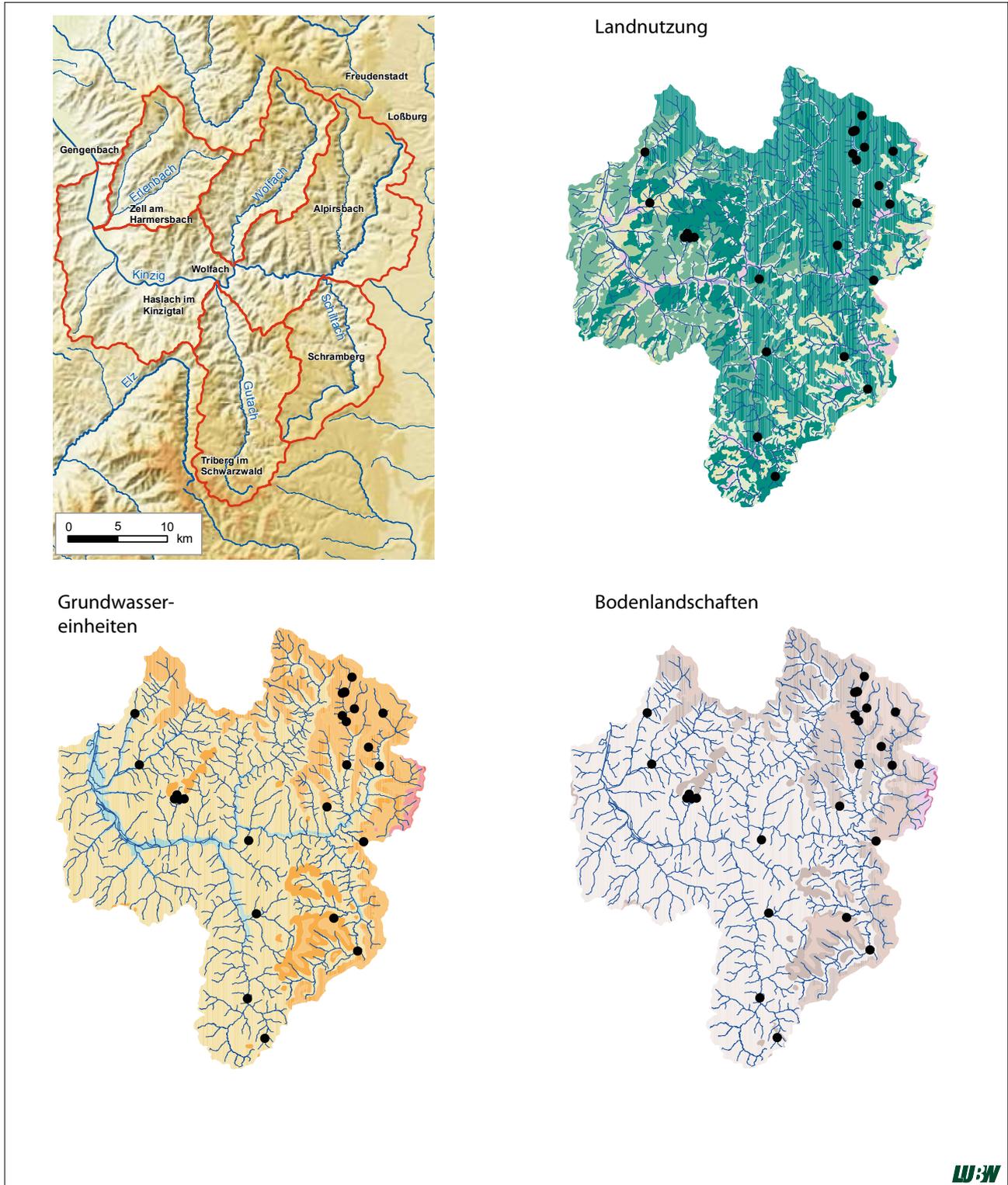


Abb. 5.4.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Kinzig, Gutach, Schiltach, Wolfach und Erlenbach im mittleren Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

Landnutzung: Der zum Nordschwarzwald gehörige Raum nördlich der Kinzig weist einen höheren Nadelwaldanteil auf, als das Gebiet südlich der Kinzig. In diesen Einzugsgebieten erreicht der Nadelwaldanteil aber immerhin noch einen Flächenanteil von über 50 %. Mischwälder treten relativ häufig (14 %) zu beiden Seiten der Kinzig in den flacheren Regionen von Hausach flussabwärts auf. Grünlandbewirtschaftung wird innerhalb des Betrachtungsraumes auf 18 % der Fläche bis in alle Höhenlage betrieben.

Bodenlandschaften und Hydrogeologie: Das Grundgebirge und das Paläozoikum sind die am weitesten verbreiteten Grundwassereinheiten innerhalb dieses Betrachtungsraumes. Sie nehmen rund 70 % der Fläche ein. Die Gesteine des besonders versauerungssensitiven Unteren und Mittleren Buntsandsteins treten in den Höhenlagen ab 600 m verbreitet auf und erreichen einen Flächenanteil von knapp 20 % und sind geprägt durch Lehme und Lehmsande. Der obere Buntsandstein sowie die gut puffernden Sedimente des Muschelkalks sind anteilmäßig von geringer Bedeutung (insgesamt nur knapp 7 %).

#### 5.4.2 Atmosphäre

Im Untersuchungsgebiet befindet sich keine Messstellen zur Immissions- und Depositions-Erfassung.

#### Bioindikatoren Atmosphäre

Die Wald-Dauerbeobachtungsfläche Hausach der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung liegt an der gleichen Lokalität wie die Boden-Dauerbeobachtungsfläche 117 (s. u.). Die Untersuchungen zur Luftbelastung belegen hier einen negativen Trend: der Deckungsanteil der als Säurezeiger geltenden Flechte *Lecanora conizaeoides* verdoppelte sich im Zeitraum 1991 bis 2002. Auch wenn der absolute Deckungsgrad dieser Flechte nur sehr gering ist, ist die Entwicklung gegenläufig zum Landestrend und sollte gezielt weiter beobachtet werden.

#### 5.4.3 Pedosphäre

Innerhalb des Gebietes liegen zwei Boden-Dauerbeobachtungsflächen. Es sind die Standorte 117 (Wolfach-

Hausach) mit Podsol unter Laubwald und 118 (Wolfach 1) mit Podsol unter Nadelwald. Beide Dauerbeobachtungsflächen befinden sich in einer Höhenlage um 600 m ü. NN im Bereich des Kristallins. An der Dauerbeobachtungsfläche 117 wurde im Jahr 1985 im Oberboden ein pH-Wert von 3,4 und im Unterboden von 4,2 gemessen. Eine weitere Messung im Jahre 2001 ergab keine Veränderung. An der etwa acht Kilometer östlich gelegenen Boden-Dauerbeobachtungsfläche 118 (Wolfach 1) lag der pH-Wert im Oberboden bei 3,8 und im Unterboden bei 4,2.

#### Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Hausach wurden zwischen 1985 und 2000 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand in den Jahren 1985 (Blei, Cadmium) bzw. 1987 (Zink) und sind seitdem sehr stark rückläufig. 1985 wurden an diesem Standort mit 958 mg Pb/kg TS die bislang höchsten Bleigehalte in Regenwürmern ermittelt. 2000 lagen sie bei allen drei Schwermetallen etwas über dem Landesdurchschnitt (Standort Hausach, Messjahr 2000: 13 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 4,3 mg Cd/kg TS gegenüber 3,5 mg Cd/kg TS; 300 mg Zn/kg TS gegenüber 238 mg Zn/kg TS) [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

#### 5.4.4 Hydrosphäre

##### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

##### Bioindikatoren Fließgewässer

Die Einschätzung des Säurezustandes in versauerungssensitiven Bachoberläufen mittels Bachforellen zeigt in den Jahren 1995 und 2000 für den Oberlauf der kleinen Kinzig weit günstigere Bedingungen an als für die weiter unten beschriebenen Bioindikatoren Makrozoobenthos und Kieselalgen. Nur der höchstgelegenen Messstelle ca. 1,5 Kilometer unterhalb der Quelle der Kleinen Kin-

zig wurde der Status „stark sauer“ zugeordnet. Die weiter flussabwärts gelegenen beiden Messstellen wurden hingegen nur als kritisch sauer eingestuft. Die Bachforellenpopulation an diesem Bachabschnitt nahm in den 1980er Jahren ab und erreichte ihren Tiefststand im Jahr 1990. In diesem Jahr wurden überhaupt keine Fische mehr gefangen. Der Fang von Bachforellen zwei Jahre später (Abb. 5.4.4-1) hängt damit zusammen, dass bei einem starken Hochwasser laichfähige Fische aus bachabwärts gelegenen Strecken der Aufstieg gelang. Diese gründeten die Population neu. In den Folgejahren nahm die Population wieder kräftig zu, zunächst die Jungfische, später die subadulten und folgerichtig im weiteren zeitlichen Verlauf auch die adulten Fische. Bis zum Jahr 2006 hat sich die Altersstruktur noch nicht ganz erholt, so dass immer noch von zeitweiligen Säureschüben auszugehen ist [IUS 2006].

Ähnlich wie an der Kleinen Kinzig verhält es sich auch im Rappengrund unterhalb des Brandenkopfes (945 m ü. NN). Hier waren die Fischbestände bis Anfang der 1990er Jahre abnehmend und haben sich seitdem erholt, sind aber weiterhin auf niedrigem Niveau. Die Altersstruktur hat sich leicht verbessert [IUS 2000]. Besser ist die Situation am Waldsteinbach. Die Bestände haben sich seit Mitte der 1990er Jahre erholt und auch die Altersstruktur ist inzwischen fischtypisch [IUS 2006].

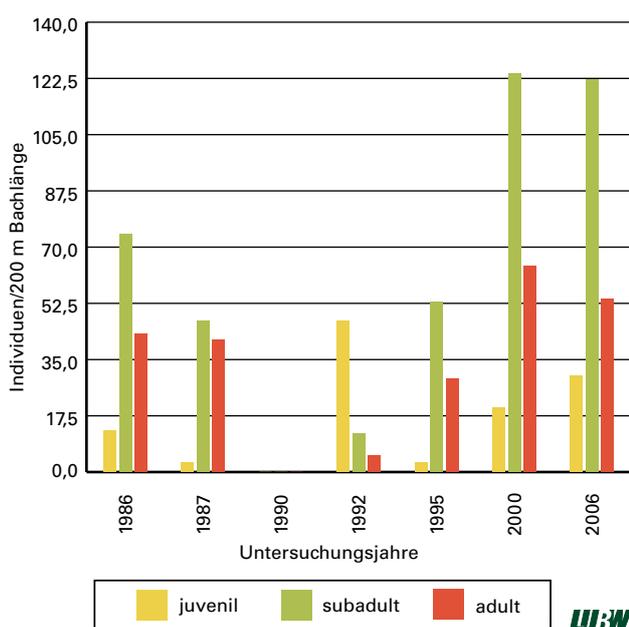


Abb. 5.4.4-1: Entwicklung der Bachforellenpopulation in der Kleinen Kinzig, unterer Abschnitt [Quelle: IUS 2006]

Im Jahr 1995 wurden von den 57 untersuchten Gewässerabschnitten im Untersuchungsgebiet anhand des Bioindikators Makrozoobenthos nur vier als permanent sauer qualifiziert. Alle vier Messstellen sind durch Nadelwaldnutzung gekennzeichnet und befinden sich im Verbreitungsgebiet des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. Zwei weiteren Gewässerabschnitten wurde der Säurezustand periodisch sauer zugeordnet. Auch sie liegen im Bereich des Unteren und Mittleren Buntsandsteins und haben bewaldete Einzugsgebiete. Der überwiegende Anteil der Messstellen in den Einzugsgebieten Schiltach, Gutach, Erlenbach und Wolfach sowie der Ober- und Mittellauf der Kinzig sind als periodisch sauer eingestuft worden. Diese Gewässerabschnitte liegen im Bereich des Kristallins.

7 der 57 Gewässerabschnitte wurden 2007 nochmals beprobt und lieferten ein positives Ergebnis: 3 Probestellen wiesen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 4 Probestellen die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Dabei haben sich 6 Probestellen entweder um eine Klasse verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten und eine Probestelle von Klasse 1 auf Klasse 2 verändert.

## Grundwasser

Für die Beurteilung der Versauerungsentwicklung werden sieben geeignete von insgesamt vierzehn hier existierenden Grundwassermessstellen herangezogen. Zum Teil liegen seit den 1950er und 1970er Jahren einzelne pH-Werte vor, seit 1994 teilweise mehrere pro Jahr. Für das Einzugsgebiet des Erlenbachs gibt es keine geeigneten Messstellen. Die Einzugsgebiete sind durchweg bewaldet mit Ausnahme von zwei Einzugsgebieten mit kleinen Rodungsinseln mit Einzelgehöften und Grünlandnutzung. Die Einzugsgebiete sind von den Windwurfschäden der Stürme der Jahre 1990/1991 und 1999 nicht betroffen. Eine Quelle liegt im kristallinen Grundgebirge, zum Teil mit Grundwasserkontakt zum Mittleren Buntsandstein, die sechs anderen liegen im Unteren und Mittleren Buntsandstein, zum Teil mit Grundwasserkontakt zu Vulkaniten des Rotliegenden. Die Quellen sind meist Kluft- und Schichtquellen, wobei an der Grundwasserneubildung auch mehrere Meter mächtige stark

durchlässige Hangschuttdecken beteiligt sind, wodurch die Quellen schnell auf Niederschläge reagieren. Die Messstellen zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte. Viele pH-Werte liegen auch in den Jahren 2005/2006/2007 weit unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5

oder schwanken um den Grenzwert. Jedoch liegen die mittleren pH-Werte für 2005 bis 2007 mit pH 5,6 bis 6,6 gegenüber den 1980er Jahren bzw. 1994 - 1996 um 0,1 bis 0,6 pH Einheiten höher.

Beispielhaft soll die Versauerungsentwicklung einer Quel-

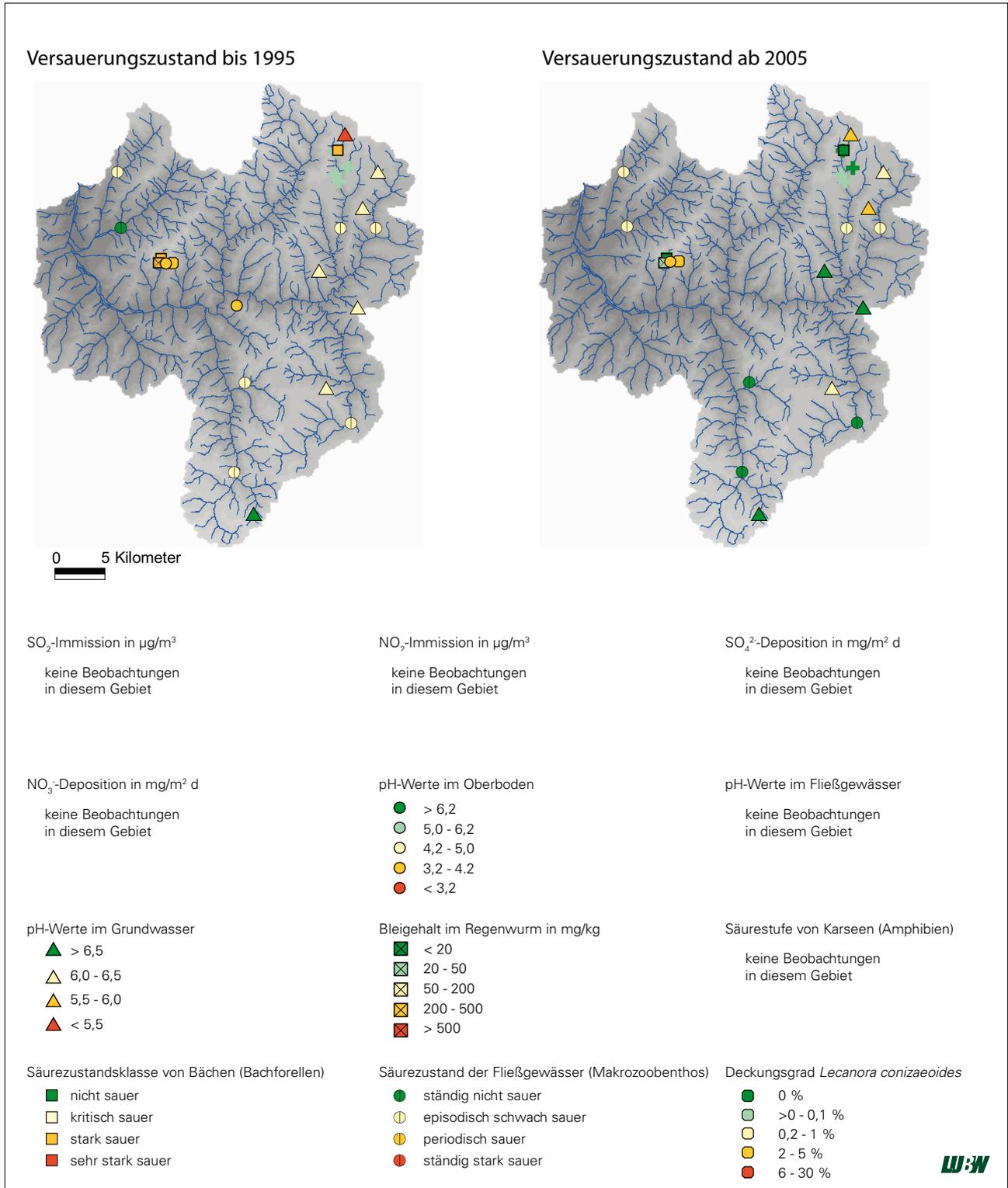
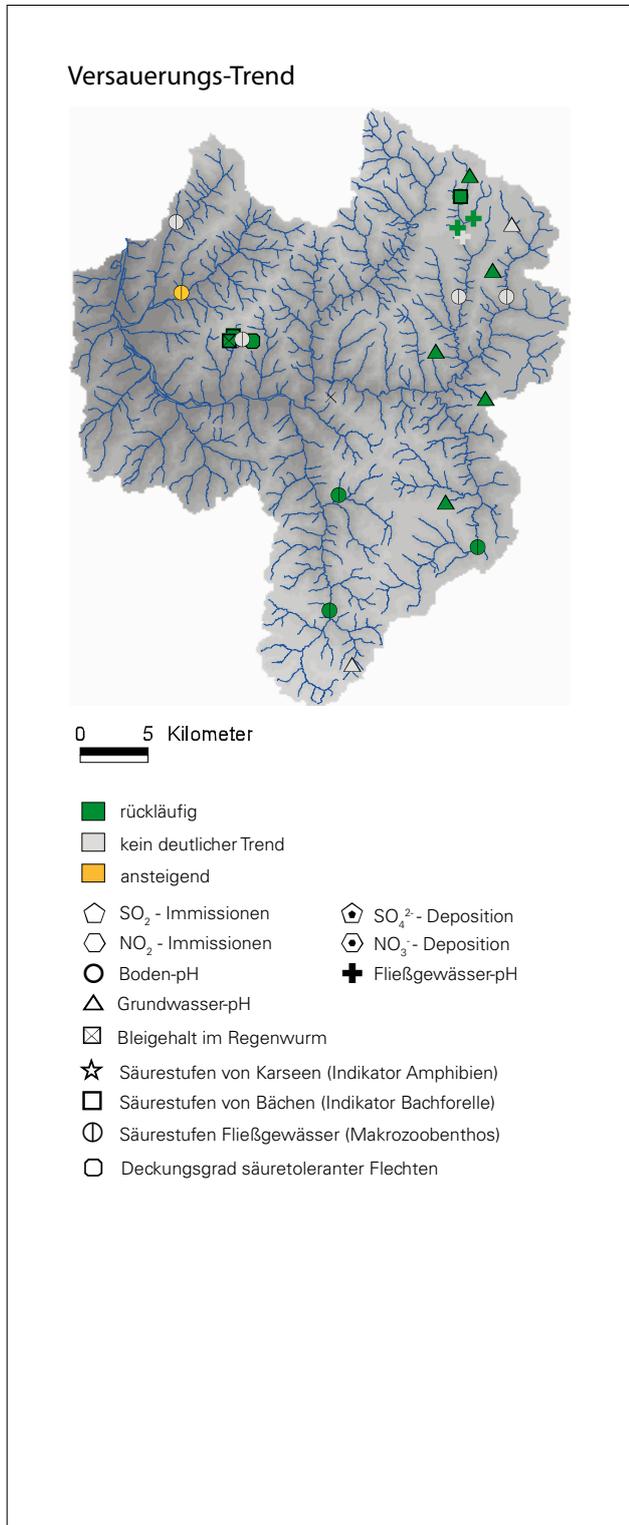


Abb. 5.4.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Kinzig, Gutach, Schiltach, Wolfach und Erlenbach im mittleren Schwarzwald

le beschrieben werden (Abb. 5.4.4-2). Die Trombachquelle (0021/267-9) liegt im Einzugsgebiet des Flusses Schiltach auf der Gemarkung der Gemeinde Schramberg zwischen den Orten Lauterbach und Tennenbronn auf 715 m Höhe, das Einzugsgebiet reicht bis auf 840 m und umfasst den Unteren und Mittleren Buntsandstein. Klüfte und Hang-

schutt führen der Quelle schnell versickerndes Wasser zu. Die Ganglinie zeigt in den letzten Jahren nicht mehr die in 1993 und 1996 beobachteten sehr großen pH-Absenkungen bis auf pH 5,6. An der mit 7 l/s sehr ergiebigen Kluftquelle liegen die pH-Werte von 1997 bis 2006 immer über pH 5,9 und erreichen auch pH 6,7.



#### Positiver Trend

Die pH-Werte in der Kleinen Kinzig haben schwach zugenommen. Die Fischpopulationen haben in allen untersuchten Bächen seit Mitte der 1990er Jahre zugenommen. Die Altersstruktur des Fischbestandes hat sich in einem der beiden durchgängig untersuchten Bäche zugunsten von Jungfischen verbessert (Waldsteinbach). An 6 von 7 wiederholt auf Makrozoobenthos untersuchten Gewässerabschnitten wurde entweder eine verbesserte oder gleichbleibende Säureklasse ermittelt. Lediglich an einer Probestelle wurde eine um eine Stufe schlechtere Säureklasse ermittelt. An fünf von sieben Quellen werden im Vergleich zu Mitte der 1990er Jahre seltenere und weniger tiefreichende pH-Wert Absenkungen gemessen. An den weiteren zwei Quellen ist die Situation einmal unverändert und einmal schlechter.

#### Kein deutlicher Trend

An der Kleinen Kinzig hat sich die leicht untypische Altersstruktur der Bachforellen seit 2000 wegen zeitweiliger Säureschübe kaum verändert. Der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt im Vergleich zu Einzelmessungen der 1980er Jahre und der davor liegenden Jahre bis heute keine deutliche Tendenz.

#### Negativer Trend

Nein

LUBW

Abb. 5.4.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Kinzig, Gutach, Schiltach, Wolfach und Erlenbach im mittleren Schwarzwald (bezüglich des Trends der Immissionen und Depositionen wird auf Kapitel 5 verwiesen, da in diesem Gebiet keine Luftmessstellen existieren)

Die Tendenz, dass die sehr großen pH-Wert-Absenkungen der 1990er und 1980er Jahre seit 1997 nicht mehr zu beobachten sind, besteht auch bei weiteren vier Quellen. Dies ist als eine positive Entwicklung zu werten. Bei den übrigen zwei Quellen ist die Versauerungssituation in 2007 gegenüber Mitte der 1990er Jahre unverändert bzw. schlechter.

tiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

### 5.4.5 Gesamtbewertung

Im mittleren Schwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich. Ursächlich sind die natürlich sauren Ausgangsgesteine (93 % der Fläche), die hohen Niederschläge (240 mm über dem Landesdurchschnitt), der Nadelwaldanteil (57 % der Waldflächen) und die historisch hohen atmosphärischen Säureeinträge.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.5.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Kinzig, Gutach, Schiltach, Wolfach und Erlenbach im mittleren Schwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.5.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als posi-

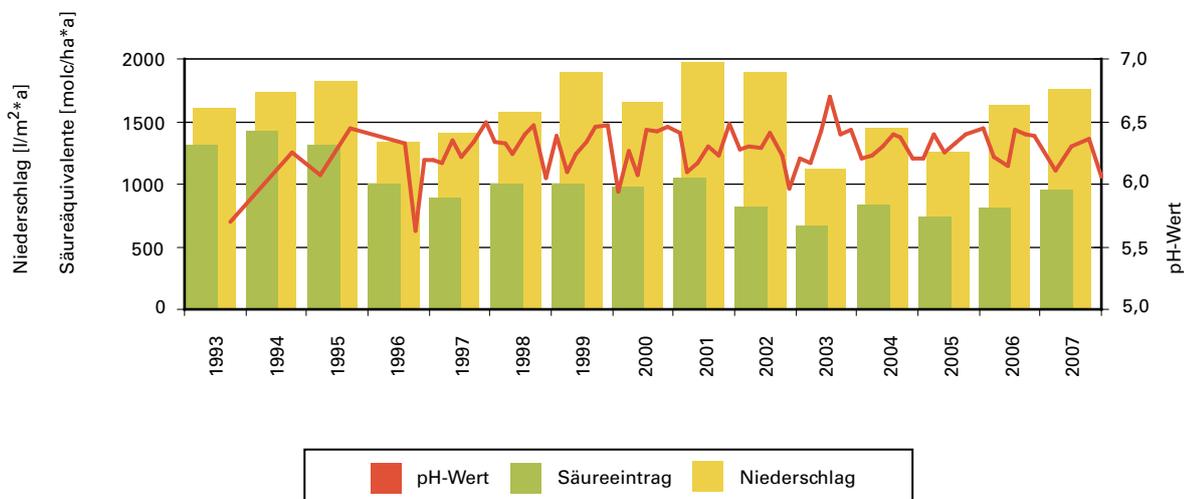


Abb. 5.4.4-2: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0021/267-9 QF Trombachquelle - Lauterbach im Mittleren Schwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag und Säureeintrag (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium im Schwarzwald (Als mittlere Niederschlagssumme pro Jahr ist das Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau und Feldberg dargestellt). Der mittlere Säureeintrag pro Jahr ist das Mittel der LUBW-Depositionsmessstationen Hornisgrinde, Wildsee und Schauinsland).

## 5.5 Das Einzugsgebiet von Elz, Wilde Gutach, Dreisam, Brugga im Hochschwarzwald

### 5.5.1 Gebietsbeschreibung

Ökologischen Raumgliederung und Hydrogeologie in den Einzugsgebieten von Elz, Wilde Gutach, Dreisam und Brugga im Hochschwarzwald (Abb. 5.5.1-1).

Das Einzugsgebiet von Elz, Wilde Gutach, Dreisam, Brugga liegt im Hochschwarzwald. Seine Ausdehnung beträgt 560 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf 1491 m ü. NN, der niedrigste auf 285 m ü. NN.

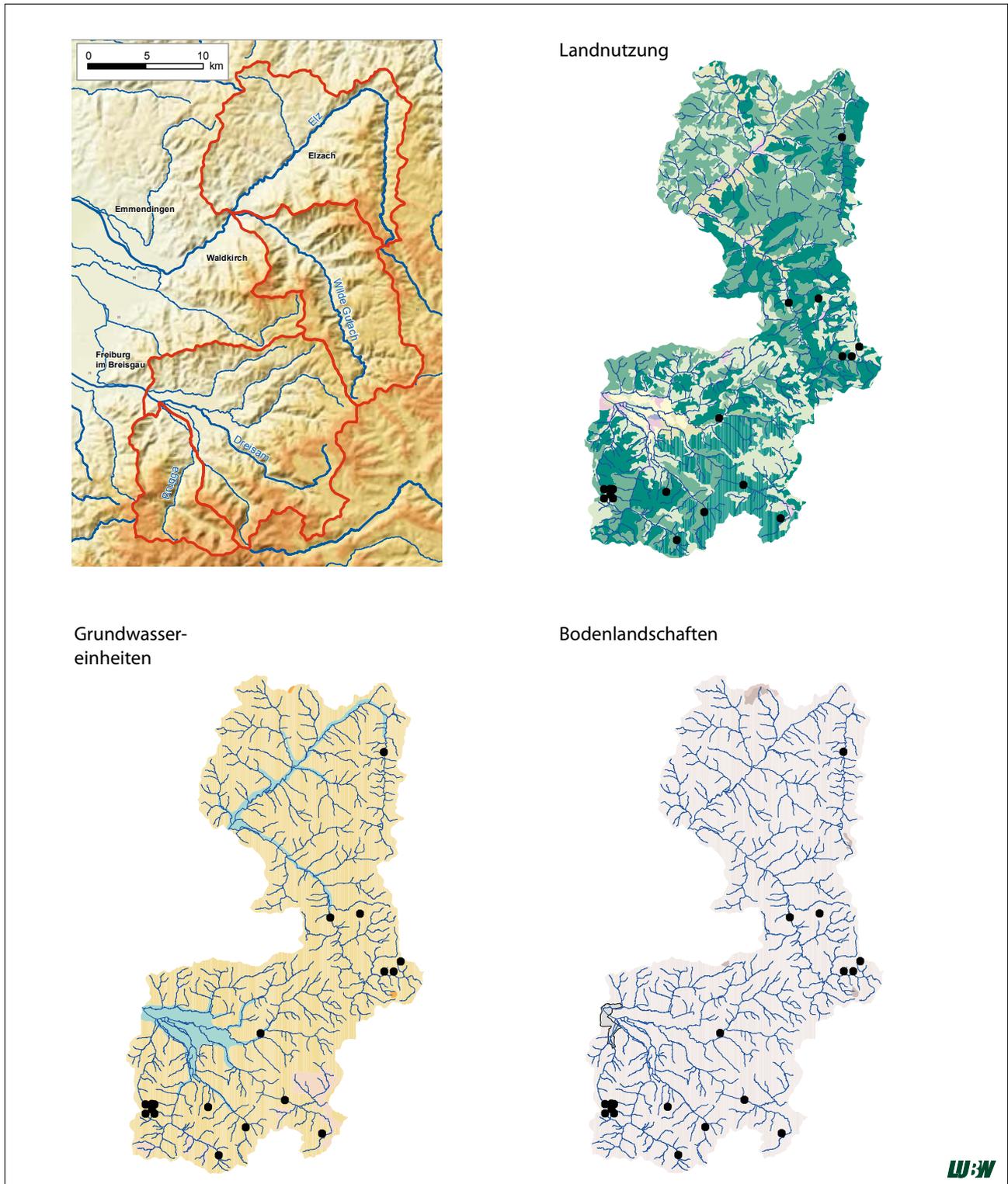
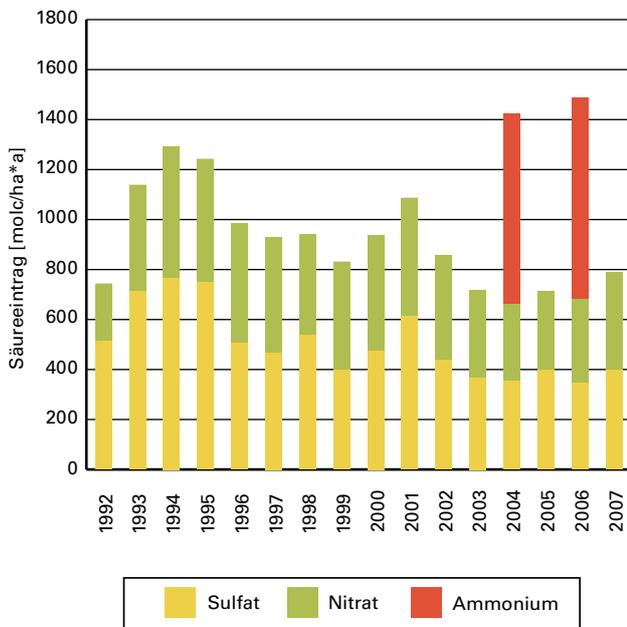


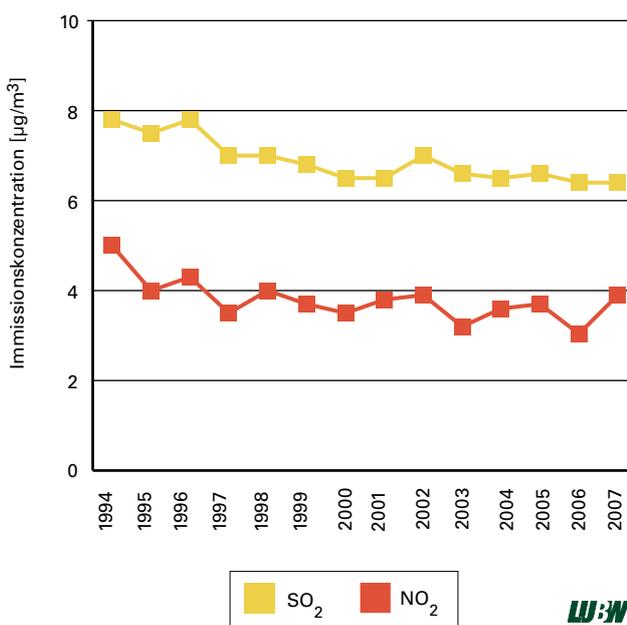
Abb. 5.5.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Elz, Wilde Gutach, Dreisam und Brugga im Hochschwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).



LUBW

Abb. 5.5.2-1: Der Säureeintrag von Sulfat und Nitrat von 1992-2007 und Ammonium für 2004 und 2006 an der Messstelle Schauinsland durch Gesamtdeposition (LUBW-Daten)

Landnutzung: Der Waldanteil in diesem Untersuchungsraum ist mit 66 % relativ gering. Auffällig ist dabei der recht hohe Laubwaldanteil (30 %) an der gesamten Waldfläche. Ein Viertel der Fläche ist unter Grünlandbewirtschaftung; dies ist der höchste Wert aller in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungsräume. Der Anteil an Ackerland erscheint mit 8,6 km<sup>2</sup> auf den ersten Blick als gering. Dennoch wird in diesem Gebiet im Vergleich



LUBW

Abb. 5.5.2-2: NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub>-Immissionen von 1994-2007 an der Messstelle Schauinsland

zu den übrigen Untersuchungsräumen des Schwarzwaldes prozentual gesehen die größte Fläche ackerbaulich genutzt (1,5 % Flächenanteil, v. a. in der Gegend von Kirchzarten).

Bodenlandschaften und Hydrogeologie: Das Ausgangssubstrat der Bodenbildung ist entsprechend der homogenen geologischen Bedingungen einheitlich (Lehmsande und Lehme). Lediglich Skelettreichtum und Gründigkeit des Solums nehmen mit zunehmender Höhe zu (Skeletthalt) bzw. ab (Gründigkeit). Die Strukturierung in Hinblick auf die Grundwassereinheiten muss als sehr homogen angesehen werden. In über 90 % der Fläche stehen kristalline und paläozoische Gesteine an. Die restliche Fläche im Untersuchungsraum machen quartäre Ablagerungen entlang der Flüsse Elz und Dreisam in den Höhenlagen unterhalb 400 m (Schotter) bzw. in den Hochtälern des Dreisam-Quellgebietes oberhalb 900 m (Becken- und Moränensedimente) aus.

## 5.5.2 Atmosphäre

Im Hochschwarzwald wird auf dem Schauinsland eine Depositionsmessstelle von der LUBW betrieben. Hier wird, im Gegensatz zu den wet-only Messungen des Umweltbundesamtes am Schauinsland, die nasse und trockene Deposition als Gesamtdeposition erhoben.

Die Säureinträge durch Sulfat an der Messstelle Schauinsland verringerten sich im Zeitraum 1992 bis 2007 um rund 32 % (siehe Abbildung 5.5.2-1). Der Nitrat-bedingte Säureeintrag zeigt dagegen keinen Trend. Das Maximum an Nitrat- und Sulfateinträgen wurde im niederschlagsreichen Jahr 1994 erreicht, die niedrigsten Einträge wurden in den Jahren 1992 und 2005 festgestellt. Der Eintrag an Ammonium wurde nur in den Jahren 2004 und 2006 in der Gesamtdeposition erfasst. Es zeigt sich, dass Ammonium einen Beitrag von rund 53 % zum Säureeintrag leistet.

Die Immissionskonzentration von Schwefeldioxid am Standort Schauinsland verringerte sich von 1994 bis 2007 um rund 25 %. Die Immissionskonzentration an Stickstoffdioxid zeigt im gleichen Zeitraum leicht rückläufige Konzentrationen (Abb. 5.5.2-2).

## Bioindikatoren Atmosphäre

Die Wald-Dauerbeobachtungsfläche Furtwangen (DBF 1402) zeigt keine Luftbelastung durch versauernde Substanzen an. Sowohl im Jahr 1991 als auch elf Jahre später konnte die als Säurezeiger eingestufte Flechte *Lecanora conizaeoides* nicht an den Trägerbäumen nachgewiesen werden.

### 5.5.3 Pedosphäre

Es befinden sich vier Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Untersuchungsgebiet. Das Ausgangsgestein der Bodenbildung ist durchgehend Gneis. Die Nutzungen sind Mischwald (126, Schauinsland 1) und Grünland (127, Schauinsland 2 sowie 128, Schauinsland 3 und 119 Domäne Bühlhof bei Gütenbach). Es sind Braunerden bis podsolierte Braunerden ausgebildet, mit gemessenen pH-Werten von rund 4,2 im Oberboden bis 4,8 im Unterboden im Jahre 1986. An der Messstelle 119 ist der Oberboden-pH gegenüber den darunterliegenden Horizonten auf Werte von 4,6 bis 5,7 erhöht, ein klarer Hinweis auf eine Kalkung.

An der Messstelle 126 wurden bei einer erneuten Untersuchung im Jahre 1997 über das gesamte Profil hinweg deutlich geringere pH-Werte von 3,3 bis 3,7 gemessen (nicht dargestellt). Allerdings war der Ort der jeweiligen Probenahme nicht absolut identisch, so dass die räumliche bodenbürtige Variation der pH-Werte bzw. die kleinflächige Variation des Bewuchses innerhalb der Mischwaldnutzung als Erklärung in Frage kommen.

An der Messstelle 127 wurden im Jahre 2000 pH-Werte zwischen 4,2 und 5,0 gemessen, die damit mit den Ausgangswerten im Bereich der Messgenauigkeit übereinstimmen.

## Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Furtwangen wurden zwischen 1986 und 2000 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand in den Jahren 1986 (Blei) bzw. 1988 (Cadmium, Zink) und sind seitdem sehr stark rückläufig. 2000 lagen sie bei allen drei Schwermetallen immer noch über dem

Landesdurchschnitt (Standort Furtwangen, Messjahr 2000: 69 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 4,8 mg Cd/kg TS gegenüber 3,5 mg Cd/kg TS; 280 mg Zn/kg TS gegenüber 238 mg Zn/kg TS) [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

### 5.5.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Bachforellenuntersuchungen aus diesem Einzugsgebiet liegen nicht vor.

Einschätzungen zur Versauerung von Gewässern durch Bioindikatoren liegen für den betrachteten Raum nur aus den Bereichen der Makrozoobenthos-Erhebungen in den Jahren 1993 bis 1995 vor. Es ist festzustellen, dass die Makrozoobenthos-Untersuchungen kaum kritische Belastungen durch Säure in Gewässern nachweisen konnten. Jeweils ein Gewässerabschnitt von Zuflüssen (Hirzbach und Kaltwasserdobel) der Elz an ihrem Oberlauf wurden als stark sauer bzw. periodisch sauer klassifiziert. Die Messstellen liegen ca. 4 Kilometer voneinander entfernt. Der überwiegende Teil der Messstellen wurde – unabhängig von der Nutzungsform – als nur periodisch sauer eingeschätzt.

4 der 27 Gewässerabschnitte die 1993 bis 1995 beprobt wurden, wurden auch 2007 nochmals beprobt und lieferten ein durchweg positives Ergebnis: 2 Probestellen wiesen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 2 Probestellen die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Alle 4 Probestellen haben sich entweder um eine Klasse verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten.

#### Grundwasser

Von den in diesem Gebiet vorhandenen insgesamt 10 Grundwassermessstellen sind drei für eine Beurteilung

der Versauerungsentwicklung geeignet. Sie decken die drei Flusseinzugsgebiete von Brugga, Dreisam und Wilde Gutach ab. Für das Einzugsgebiet der Elz gibt es keine Messstelle. Es handelt sich meist um Messstellen, die über mehrere Jahre sogar mehrmals im Jahr beprobt worden sind. Für zwei Quellen liegen sogar relativ viele Daten aus den 1970er und 1980er Jahren vor. Alle drei Quellen liegen

im Kristallin des Grundgebirges. Die Einzugsgebiete sind sehr klein und bis auf eine Ausnahme durchweg bewaldet, letztere hat einen sehr kleinen Anteil Grünland im Einzugsgebiet. Von Windwurfschäden sind die Einzugsgebiete nicht betroffen. Die drei Quellen zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte. Die mittleren pH-Werte der Messstellen liegen auch in

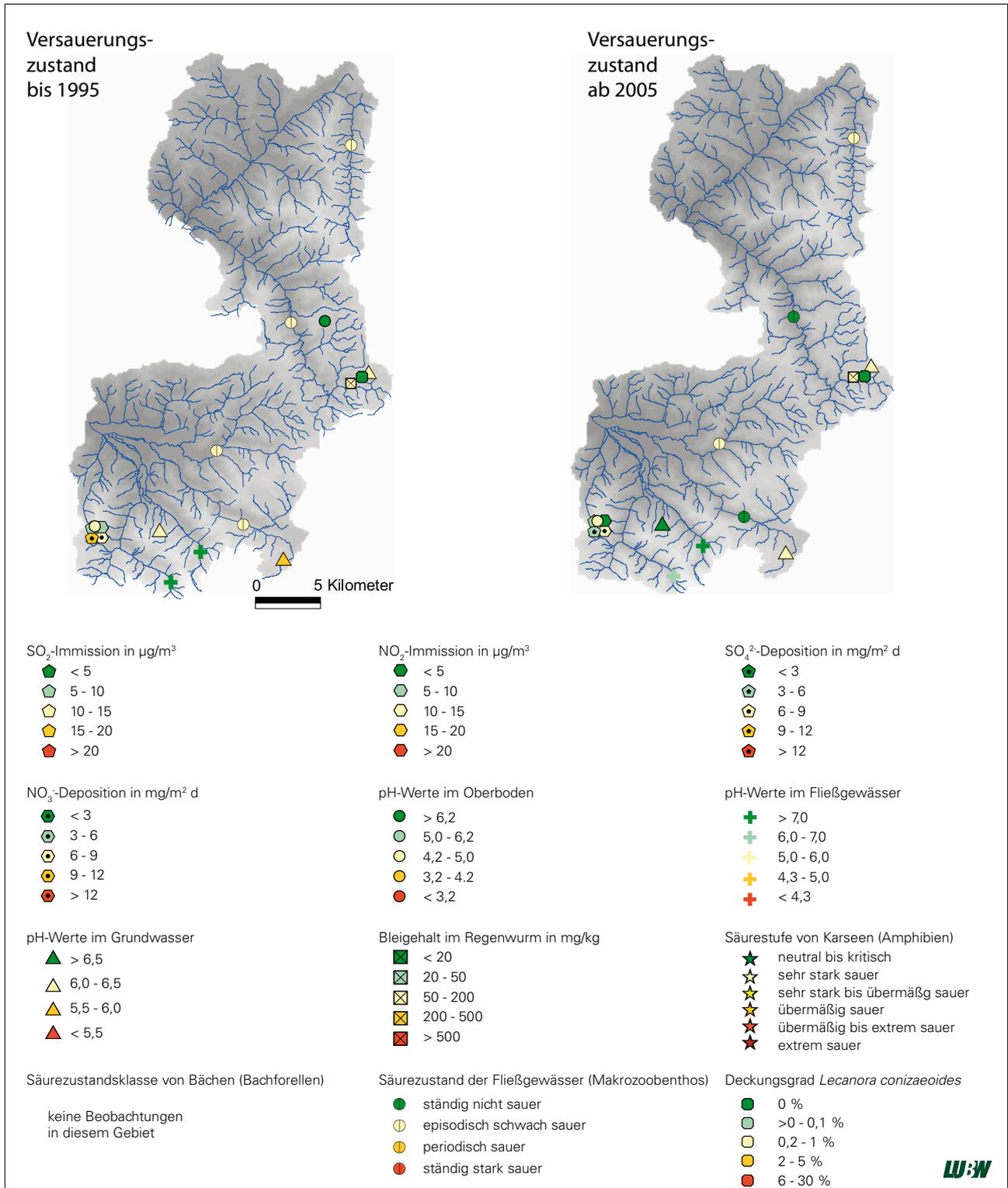
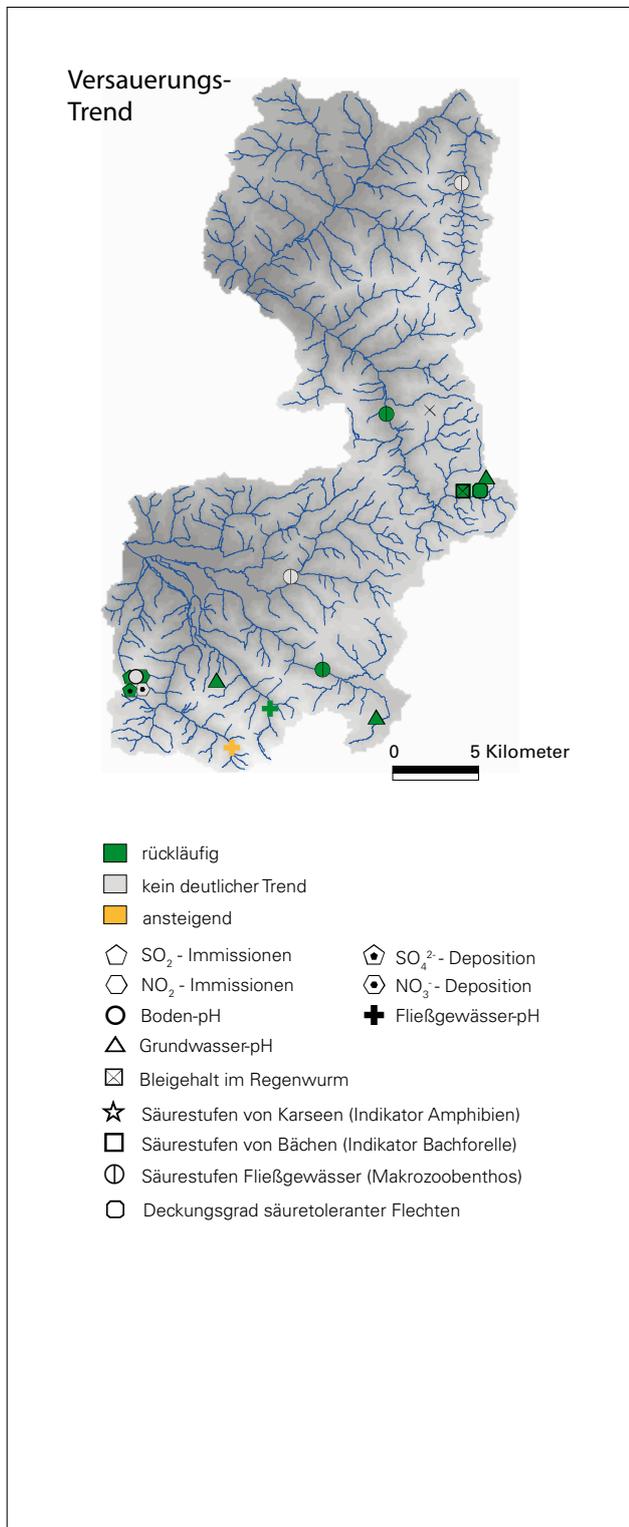


Abb. 5.5.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Elz, Wilde Gutach, Dreisam und Brugga im Hochschwarzwald

den Jahren 2005/2006/2007 unterhalb oder im Bereich oder des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. An einer Messstelle liegt der mittlere pH-Wert mit 6,7 knapp über pH 6,5. Die mittleren pH-Werte an den beiden anderen Quellen erreichen in den Jahren 2005 bis 2007 pH 6,0 bis 6,4.

An allen drei Quellen kann eine positive Entwicklung festgestellt werden, u.a. da bei den Mittelwerten von 1994 - 1996 auf 2005 - 2007 eine klare pH-Wert-Anhebung um 0,2 bis 0,3 pH festgestellt wird. Auch gibt es in den letzten Jahren - als weiteres Anzeichen einer Verbesserung - nicht mehr solch tiefreichenden kurzfristigen pH-Absenkungen.



#### Positiver Trend

Abgenommen haben die durch SO<sub>2</sub> verursachten atmosphärischen Säureeinträge. Alle vier wiederholt auf Makrozoobenthos untersuchten Bachabschnitte haben sich entweder um eine Säureklasse verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten (Bezug 2007). An allen drei Grundwassermessstellen wurden zuletzt Mitte der 1990er Jahre starke pH-Wert Absenkungen beobachtet.

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. Der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt im Vergleich zu Messungen der 1970er und 1980er Jahre bis heute keine deutliche Tendenz.

#### Negativer Trend

Nein

**LUBW**

Abb. 5.5.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Elz, Wilde Gutach, Dreisam und Brugga im Hochschwarzwald

In den Zeitreihen der pH-Werte im Quellwasser ist in manchen Jahren ein Zusammenhang zu den Niederschlägen und/oder zu den gemessenen Säureeinträgen aus der Atmosphäre auffällig (Abb. 5.5.2-1, 5.5.4-1). Die insbesondere in den Jahren 1994 und 1995 überdurchschnittlich hohen Säureeinträge führten in diesen Jahren und dem Folgejahr zu sehr niedrigen pH-Werten in den Quellwässern (Abb. 5.5.4-1).

Im letzten Untersuchungsjahr 2007 fallen an allen drei Messstellen die pH-Werte wieder auf niedrige Werte wie es seit 1994-1996 nur zum Teil in 2001 und 2002 beobachtet werden konnte. Die Minimumwerte in 2007 sind mit pH 5,6 bis 6,4 jedoch nicht so niedrig wie in 1994-1996 mit Werten von pH 4,8 bis 5,3. Grund für die pH-Wertabnahmen in 2007 sind offenbar die in 2007 wieder höheren Niederschläge mit auch wieder größeren Säureeinträgen. Die Säureeinträge an der Depositionsmessstelle Schauinsland sind in 2007 wieder so hoch wie es zuletzt in 2002 der Fall war (Abb. 5.5.2-1, 5.5.4-1).

Beispielhaft soll die oben beschriebene Verbesserung der Versauerungssituation in diesem Gebiet anhand der pH-Wert-Zeitreihe einer Quelle dargestellt werden. Die Messstelle QF 2 Kleislewaldquelle liegt nahe der Stadt Freiburg in der Ortschaft Oberried-Zastlertal unterhalb des Feldbergs im Kristallin des Südschwarzwalds in einem Nadelwaldgebiet. Die Quelle liegt auf 880 m Höhe. Klüfte und Hangschutt führen der Quelle schnell versickerndes Wasser zu. Die in den Jahren 1989, 1995 und 1996 beobachteten großen pH-Absenkungen wurden

nach 1997 nicht mehr registriert (Abb. 5.5.4-1). Nur noch vereinzelt in 2001, 2002 und 2007 sinken die pH-Werte wieder aufgrund der höheren Niederschläge und höheren Säureeinträge, jedoch werden mit pH 6,3 bis 6,4 nicht mehr Werte von unter pH 6,0 erreicht, wie es in 1989 und 1995 der Fall war.

### 5.5.5 Gesamtbewertung

Im Hochschwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden im Vergleich zum Nordschwarzwald weniger häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich, da die Säure-Pufferkapazität des Gesteins hier geringfügig höher ist (häufig sind Gneise).

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.5.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Elz, Wilde Gutach, Dreisam und Brugga im Hochschwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.5.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

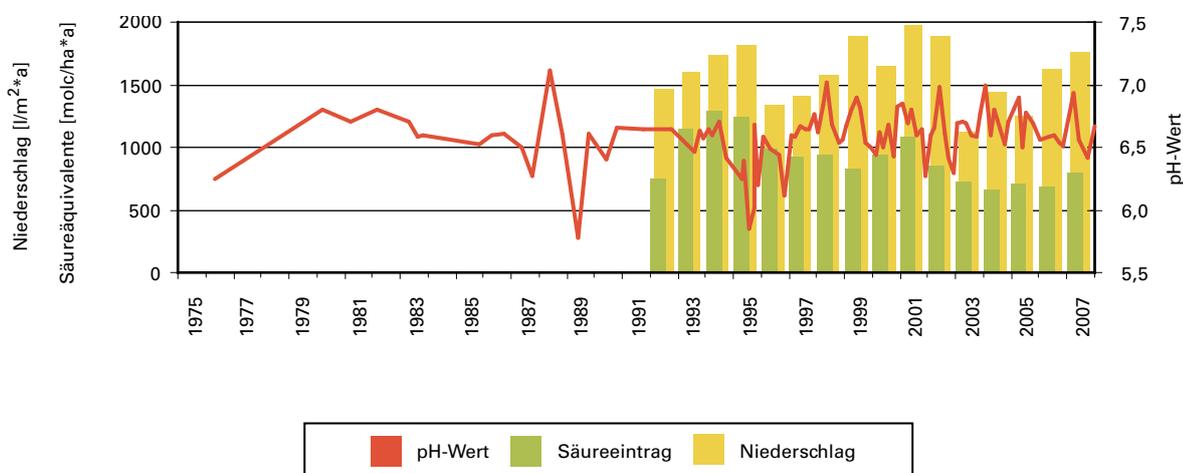


Abb. 5.5.4-1: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0001/120-8 QF 2 Kleislewaldquelle - Oberried-Zastlertal im Südschwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag (Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitenau, Feldberg) und des atmosphärischen Säureeintrags (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, LUBW-Depositionsmessstelle Schauinsland).

## 5.6 Das Einzugsgebiet von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald

### 5.6.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Kirnach, Brigach und Breg liegt im südöstlichen Schwarzwald (Abb. 5.6.1-1). Seine Aus-

dehnung beträgt 264 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf 1149 m ü. NN, der niedrigste auf 703 m ü. NN mit etwa 2°C niedrigeren Temperaturen als der Landesdurchschnitt.

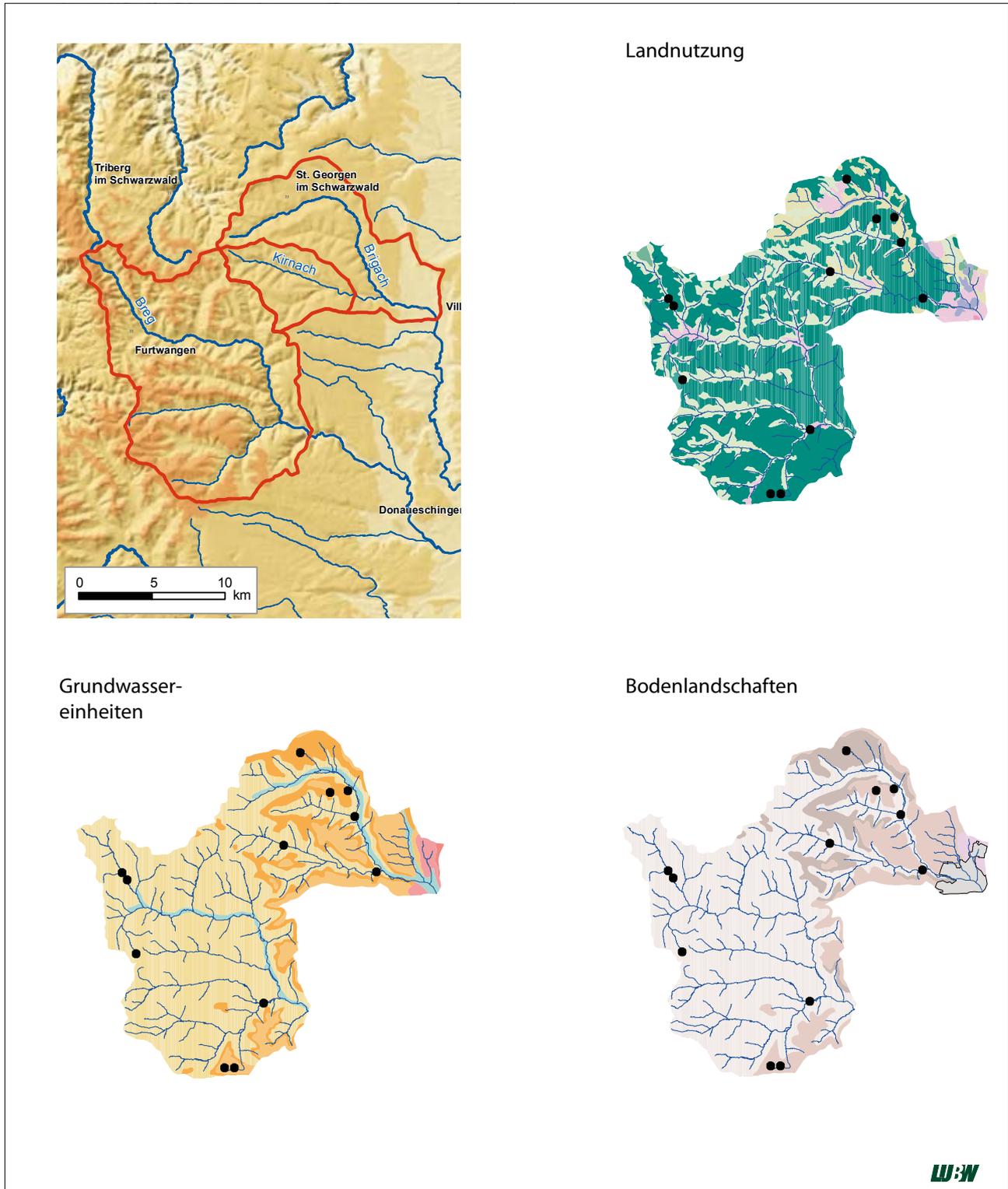


Abb. 5.6.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

Landnutzung: Der Nadelwaldanteil nimmt gegenüber dem vorher beschriebenen, im Westen angrenzenden Untersuchungsraum (Dreisam, Elz) in den Einzugsgebieten dieses Raumes erheblich zu. Fast zwei Drittel der Fläche wird von Nadelwäldern bestockt. Unverändert hoch bleibt hingegen der Grünlandanteil mit über 23 % der Gesamtfläche. Der relativ hohe Flächenanteil an Siedlungen ist in erster Linie auf die Orte St. Georgen, Furtwangen und Vöhrenbach und v.a. Villingen zurückzuführen.

Bodenlandschaften: Der Untersuchungsraum ist zu 71 % mit paläozoischen und kristallinen Gesteinen ausgestattet. Einen Flächenanteil von 23 % nehmen die Sedimentgesteine des Buntsandsteins ein. Der versauerungsanfällige Mittlere und Untere Buntsandstein ist daran mit über 13 % beteiligt. Der Buntsandstein ist in den Einzugsgebieten der Brigach und der Kirnach weit verbreitet. Im Einzugsgebiet der Breg kommt er flächendeckend im östlichen Bereich vor. Während im Hochschwarzwald Lehmsande das Bodensubstrat bilden, sind im östlichen Teil dieses Gebietes häufig auch Sande zu finden.

### 5.6.2 Atmosphäre

Im Untersuchungsgebiet befindet sich keine Messstellen zur Immissions- und Depositions-Erfassung.

#### Bioindikatoren Atmosphäre

Die Wald-Dauerbeobachtungsfläche Donaueschingen befindet sich im Süden des Untersuchungsgebietes auf einer Höhe von ca. 1000 m ü. NN. Es handelt sich um einen Tannen-Fichtenwald im Bereich des Oberen Buntsandsteins. Die Flechte *Lecanora comizaoides* als Säurezeiger konnte an den Trägerbäumen nicht nachgewiesen werden. Dies deutet auf einen allenfalls geringen Eintrag von versauernden Substanzen hin.

### 5.6.3 Pedosphäre

In diesem Einzugsgebiet liegt die Boden-Dauerbeobachtungsfläche 120 südwestlich der Ortschaft St. Georgen mit podsolierter Braunerde aus Mittlerem Buntsandstein; die Nutzung ist Nadelwald.

1986 wurden pH-Werte von 3,2 bis 4,2 gemessen, 1997 schließlich an einer wenig entfernten Stelle 3,1 bis 4,8. Damit liegen hier keine Änderungen vor, sondern Messwert-Streuungen.

#### Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Donaueschingen wurden zwischen 1986 und 2005 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei und Cadmium in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand im Jahr 1986 (Blei, Cadmium) und sind seitdem rückläufig. 2005 lagen sie bei den drei Schwermetallen Blei, Cadmium und Zink noch immer über dem Landesdurchschnitt (Standort Donaueschingen, Messjahr 2005: 17,7 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS; 4,7 mg Cd/kg TS gegenüber 3,55 mg Cd/kg TS; 262 mg Zn/kg TS gegenüber 240 mg Zn/kg TS) [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

### 5.6.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Der Krumpendobelbach ist ein Zufluss zur Breg. Sein Einzugsgebiet liegt im Bereich des Kristallins sowie des Oberen Buntsandsteins und ist komplett bewaldet. Die Bachforellen-Populationen wurden im Rahmen der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung letztmalig im Herbst 1995 untersucht. Der Bach wurde aufgrund des sehr geringen Jungfischbestandes als kritisch sauer eingestuft.

Die 17 Messstellen zur Erfassung des Makrozoobenthos in Fließgewässern liegen sämtlich im Bereich des kristallinen Grundgebirges. Einige Einzugsgebiete reichen bis in die Verbreitungsgebiete der Buntsandstein-Deckschichten. Selbst an den Orten an denen dieses zutrifft, wurde - wie für die übrigen Gewässerabschnitte - die Einstufung episodisch schwach sauer vorgenommen.

5 der 17 Gewässerabschnitte die 1993 bis 1995 beprobt wurden, wurden auch 2007 nochmals beprobt und lieferten ein durchweg positives Ergebnis: 1 Probestelle wies die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 4 Probestellen die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Alle 5 Probestellen haben sich entweder um eine Klasse verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten.

## Grundwasser

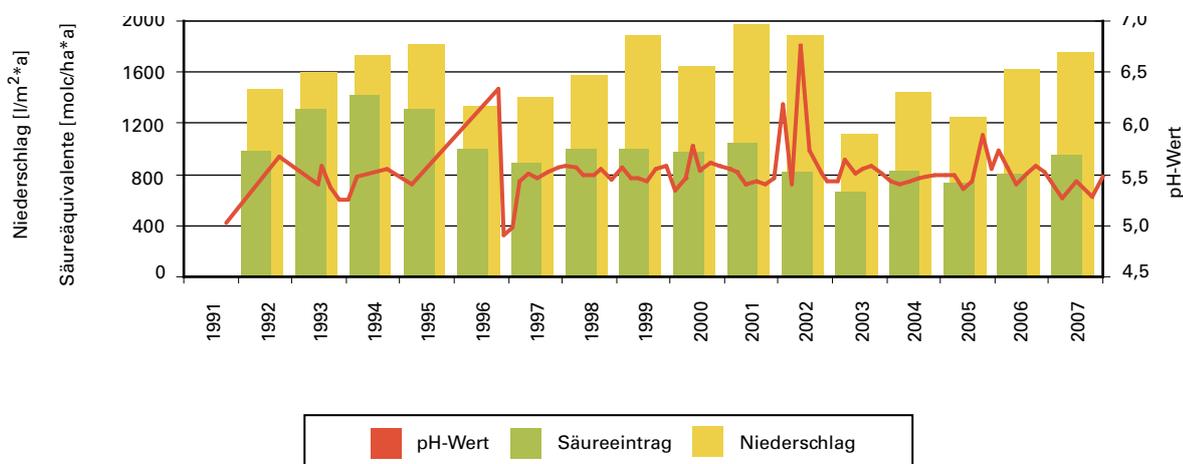
Von den in diesen Flussgebieten vorhandenen insgesamt sechs Grundwassermessstellen sind vier für eine Beurteilung der Versauerungsentwicklung geeignet. Es handelt sich dabei meist um Messstellen, die seit Mitte der 1990er Jahre sogar mehrmals im Jahr beprobt worden sind. Einige wenige pH-Werte stammen aus den 1970er und 1980er Jahren. Die drei Quellen liegen im Flusseinzugsgebiet der Brigach, ein Brunnen im Einzugsgebiet der Breg. Für das Einzugsgebiet der wilden Gutach gibt es keine geeigneten Grundwassermessstellen.

Die drei Quellen besitzen nur sehr kleine Einzugsgebiete. Das Einzugsgebiet des Brunnens ist mit 11 km<sup>2</sup> größer und erstreckt sich von der Stadt Furtwangen bis an die Bregquelle. Die Einzugsgebiete sind bewaldet, zum Teil existiert Grünland und in zwei Fällen deckt ein locker bebautes Siedlungsgebiet der Stadt St. Georgen einen Teil der benachbarten Einzugsgebiete ab. Die Einzugsgebiete sind von den Windwurfschäden der Stürme der Jahre

1990/1991 und 1999 nicht betroffen gewesen. Die Quellen sind meist Kluft- und Schichtquellen, wobei auch mehrere Meter mächtige sehr durchlässige Hangschuttdecken vorliegen, die die Quellen schnell auf Niederschläge reagieren lassen. Eine Quelle und der Brunnen liegen im kristallinen Grundgebirge mit Granit- und Gneisgesteinen. Die anderen beiden Quellen liegen im Unteren und Mittleren Buntsandstein, wobei keine Überdeckung mit besser säureabpufferndem Oberem Buntsandstein existiert.

Drei der vier Messstellen, die beiden Quellen im Buntsandstein und der Brunnen im Kristallin, zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute sehr kritische pH-Werte. An den beiden Quellen liegen die einzelnen pH-Werte mit meist pH 5,3 bis 5,9 auch in den Jahren 2005/2006/2007 weit unterhalb des Grenzwerts der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Dies gilt auch für den Brunnen mit Einzelwerten pH 5,8 bis 6,3. Die mittleren pH-Werte an den beiden Quellen und dem Brunnen erreichen in den Jahren 2005 bis 2007 pH 5,5 bis 6,0.

Hingegen ist das Wasser der vierten Messstelle - im Kristallin - kaum versauert. Der mittlere pH-Wert der Jahre 2005/2006/2007 liegt mit pH 6,6 oberhalb des Grenzwerts der Trinkwasserverordnung. Nur wenige Einzelwerte fallen nur knapp unter pH 6,5. Dieser hier höhere pH-Wert verdeutlicht im Vergleich mit den o.g. Quellen im Buntsandstein den Einfluss der Pufferfähigkeit von kristallinen Gesteinen auf den pH-Wert des Grundwassers.



**LUBW**

Abb. 5.6.4-1: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0600/268-0 Harzlochquelle - St. Georgen im Südschwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag und Säureeintrag (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium im Schwarzwald (Als mittlere Niederschlagssumme pro Jahr ist das Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau und Feldberg dargestellt. Der mittlere Säureeintrag pro Jahr ist das Mittel der LUBW-Depositionsmessstationen Hornisgrinde, Wildsee und Schauinsland).

An allen vier Messstellen zeichnen sich Verbesserungen ab. Die mittleren pH-Werte der Jahre 2005 - 2007 sind im Vergleich zu 1994 - 1996 mit maximal pH 0,2 zwar nur wenig erhöht bzw. sind gleichgeblieben, jedoch sind spätestens seit Mitte der 1990er Jahre keine so extrem starken pH-Absenkungen mehr zu beobachten. Dies ist als eine positive Entwicklung zu werten.

Beispielhaft soll die Versauerungsentwicklung der Harzlochquelle (0600/268-0) beschrieben werden (Abb. 5.6.4-1). Sie liegt im Einzugsgebiet des Flusses Brigach auf der Gemarkung der Gemeinde St. Georgen auf etwa 830 m Höhe, das Einzugsgebiet reicht bis auf nahezu 900 m hinauf und umfasst die Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandstein. Klüfte und Hangschutt führen

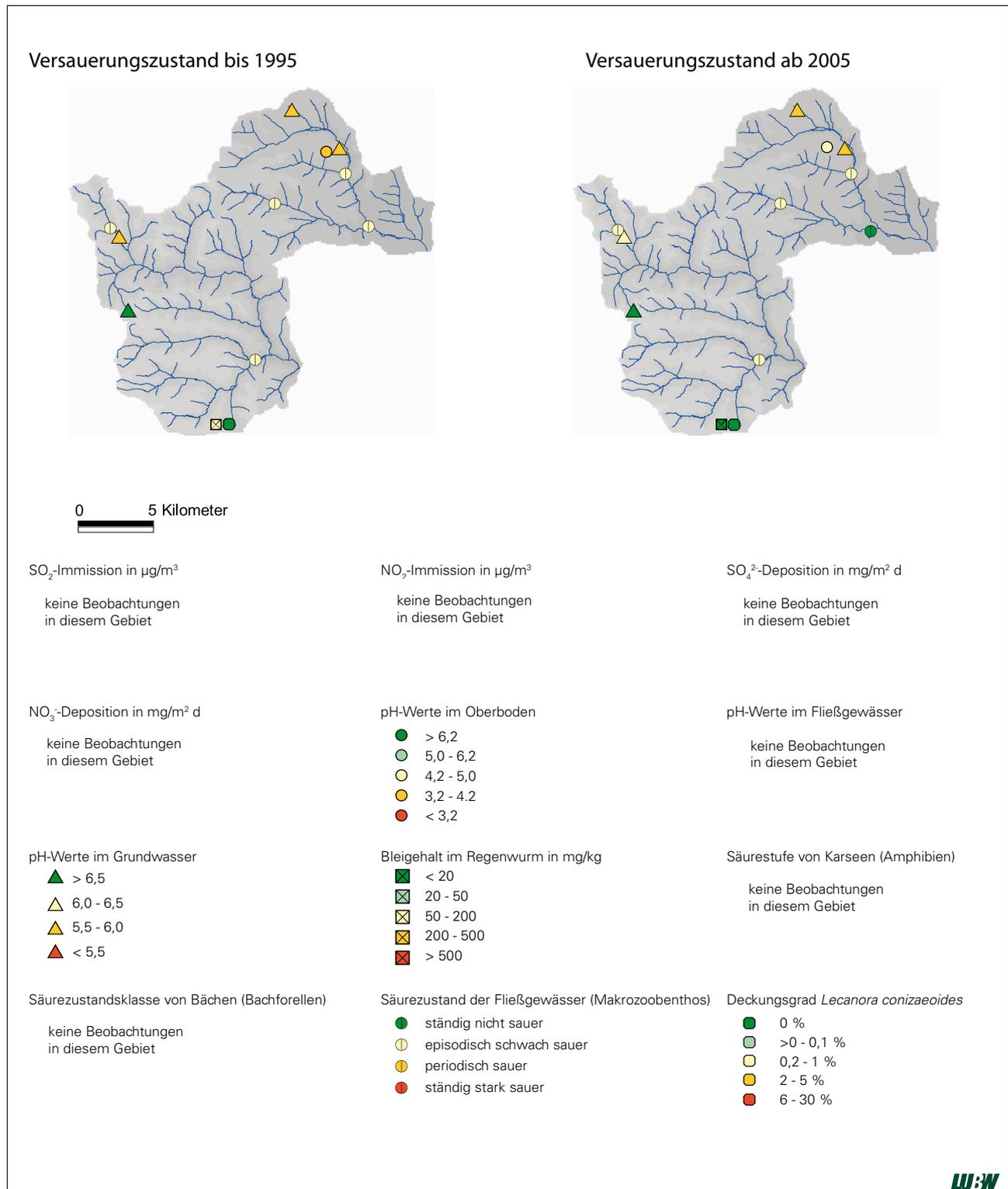


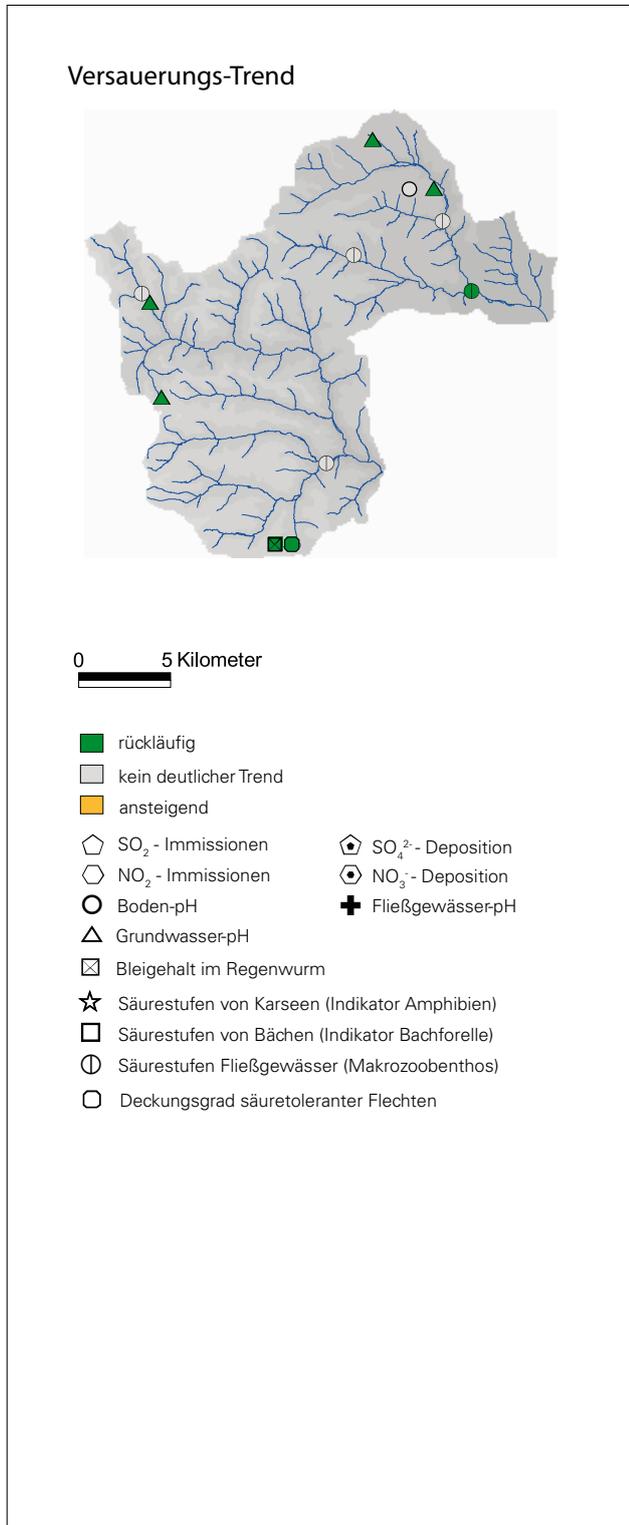
Abb. 5.6.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald

der Quelle schnell versickerndes Wasser zu. Sie ist mit einem mittleren Abfluss von 7 l/s eine sehr ergiebige Klufthquelle. Die pH-Werte dieser Quelle liegen von 1998 bis 2007 immer über pH 5,3 und erreichen auch vereinzelt höhere pH-Werte über 6,0. In den letzten Jahren existieren keine so starken pH-Absenkungen bis auf pH 5,0 bzw. 4,9, wie sie 1991 und im Winter 1996/1997 zu beobachten

waren (Abb. 5.6.4-1). Jedoch wird in 2007 kein Wert über pH 5,5 erreicht.

### 5.6.5 Gesamtbewertung

Im südöstlichen Schwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden im Vergleich im Vergleich zum Nordschwarzwald



#### Positiver Trend

Alle fünf wiederholt auf Makrozoobenthos untersuchten Bachabschnitte wiesen auf keine relevante Versauerung mehr hin (2007: Säureklassen 1 und 2). An allen vier Grundwassermessstellen werden seit Mitte der 1990er Jahre keine vergleichbar starken pH-Wert Absenkungen mehr gemessen, wie sie davor aus Einzelmessungen bekannt waren.

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. Der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt im Vergleich zu Einzelmessungen aus den 1970er Jahren bis Beginn der 1990er Jahre bis heute keine deutliche Tendenz.

#### Negativer Trend

Nein



Abb. 5.6.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald

weniger häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich, da die Säure-Pufferkapazität des Gesteins hier höher ist (häufig sind Gneise).

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.6.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Kirnach, Brigach und Breg im südöstlichen Schwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.6.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

## 5.7 Das Einzugsgebiet von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese im südlichen Schwarzwald

### 5.7.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese liegt im südlichen Schwarzwald (Abb. 5.7.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 373 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt

liegt auf 1485 m ü. NN, der niedrigste auf 420 m ü. NN. Entsprechend der Höhenlage ist die Temperatur im Jahresgang ca. 2°C niedriger als im Landesdurchschnitt. Auffällig sind die ganzjährig erheblich höheren Niederschlags-

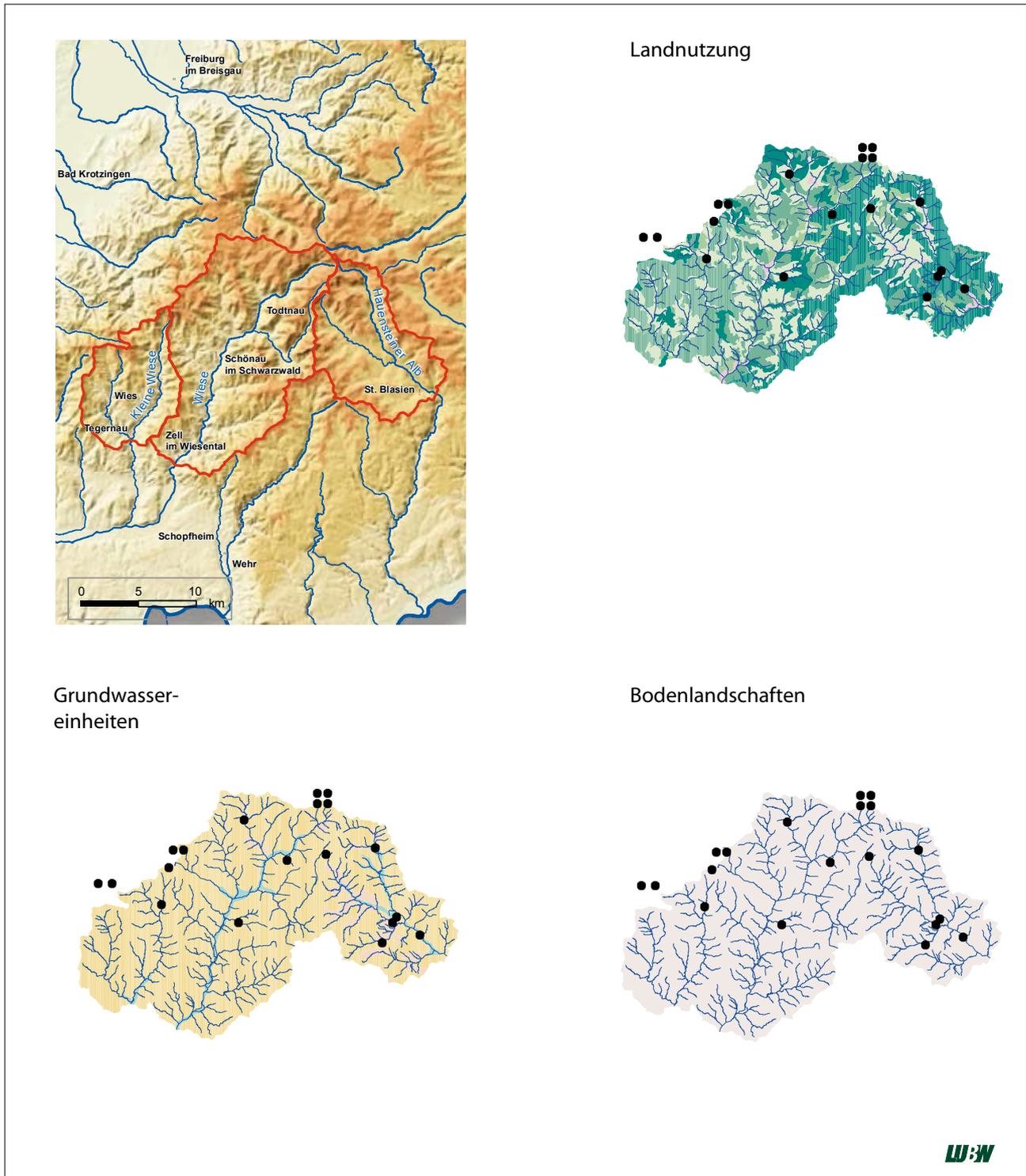


Abb. 5.7.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleine Wiese im südlichen Schwarzwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

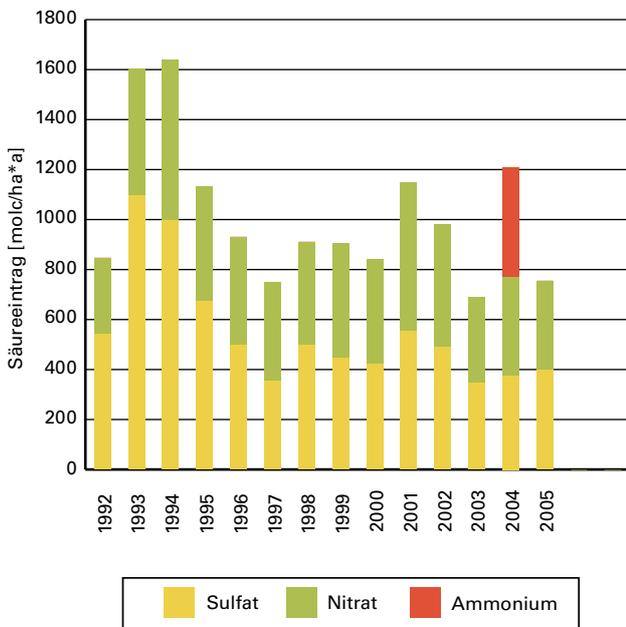


Abb. 5.7.2-1: Säureeintrag von Sulfat und Nitrat von 1992-2005 und Ammonium für 2004 an der Messstelle Feldberg

beträge, die im Herbst und Winter um bis zu 70 mm pro Monat höher ausfallen. Im Frühjahr und Sommer dagegen sind bis zu 20 mm pro Monat niedrigere Verdunstungsraten als im Landesdurchschnitt festzustellen.

Landnutzung: Nadel- und Mischwälder nehmen zu etwa gleichen Anteilen in diesem Untersuchungsraum zwei Drittel der Gesamtfläche ein. Laubwälder haben einen

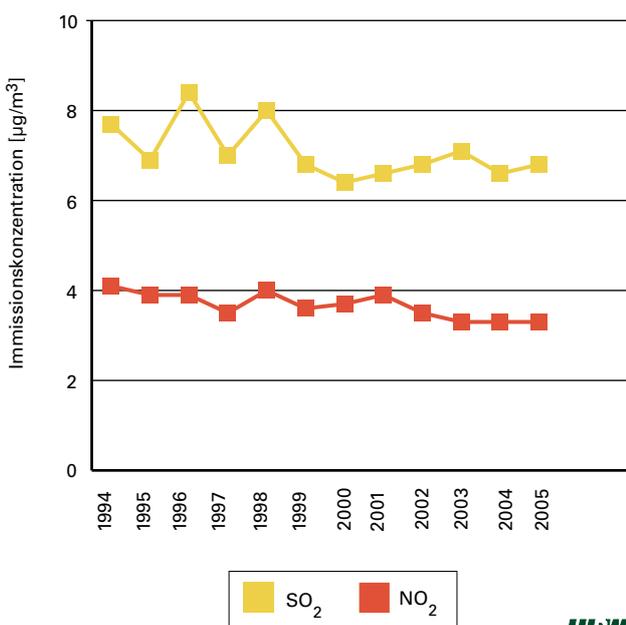


Abb. 5.7.2-2: NO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Immissionen an der Messstelle Feldberg von 1994-2005

relativ hohen Flächenanteil von fast 4 % ein. Dies ist im Vergleich zu allen anderen bisher betrachteten Räumen der höchste Wert. Etwa ein Viertel der Fläche wird als Grünland bewirtschaftet.

Bodenlandschaften und Hydrogeologie: Kristallines Grundgebirge ist mit mehr als 90 % Flächenanteil in diesem Untersuchungsraum vorherrschend und bildet Böden aus skeletthaltigen bis skelettreichen flach- bis tiefgründige Lehmsanden. Quartäre Ablagerungen entlang der Flüsse Wiese und Hauensteiner Alb sowie Becken- und Moränenablagerungen v.a. im Einzugsgebiet der Hauensteiner Alb bilden die restlichen Grundwassereinheiten.

## 5.7.2 Atmosphäre

Die Immissionsmessstation Schwarzwald Süd (Kälbescheuer) liegt ca. 1,2 Kilometer außerhalb des hier betrachteten Raumes. Es handelt sich um eine Messstation mit aktiver Probenahme zur Erfassung der Hintergrundbelastung. Im Jahr 1992 wurde ein Jahresmittelwert von 3 µg/m<sup>3</sup> in der Luft gemessen. Dieser Wert ging bis zum Jahr 2007 auf 2 µg/m<sup>3</sup> zurück. Die gemessene Immissionskonzentration an Stickstoffdioxid lag im Jahr 1992 bei 6 µg/m<sup>3</sup>. Dieser Wert ging bis zum Jahr 2007 geringfügig auf 5 µg/m<sup>3</sup> zurück.

Die Depositionsmessstelle Feldberg liegt in unmittelbarer Nähe zur nördlichen Begrenzung des Untersuchungsgebietes und wurde 2005 abgebaut.

Die Säureeinträge durch Sulfat an der Messstelle Feldberg verringerten sich im Zeitraum 1992 bis 2005 um rund 26 % (Abb. 5.7.2-1). Der Nitrat-bedingte Säureeintrag zeigt starke Schwankungen, aus denen sich kein Trend ableiten lässt. Der Eintrag an Ammonium wurde nur in dem Jahr 2004 in der Gesamtdosition erfasst. Ammonium lieferte hier einen Beitrag von rund 36 % zum Säureeintrag.

Die Immissionskonzentration von Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid an der Messstelle Feldberg zeigen von 1994 bis 2005 leicht rückläufige Konzentrationen (Abb. 5.7.2-2).

## Bioindikatoren Atmosphäre

Die Wald-Dauerbeobachtungsfläche Schönau ist der am höchsten gelegene Standort der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung. Die Dauerbeobachtungsfläche befindet sich auf einer Höhe von ca. 1200 m ü. NN. Die Flechte *Lecanora conizaeoides* als Säurezeiger konnte an den Trägerbäumen nicht nachgewiesen werden. Dies deutet auf einen allenfalls geringen Eintrag von versauernden Substanzen hin.

### 5.7.3 Pedosphäre

Hier liegen fünf Boden-Dauerbeobachtungsflächen. Drei davon (121 bis 123 bzw. St. Blasien 1 bis 3) sind Podsole bis podsoliierte Braunerden aus Gneis bzw. Granit unter Nadelwald mit den typischen niedrigen pH-Werten.

Auf ebenfalls kristallinem Ausgangsgestein finden sich zwei Grünlandstandorte. An der Messstelle 125 (NSG Belchen) finden sich gesteinstypische pH-Werte zwischen 3,9 im Oberboden und 4,7 im Unterboden. An der Messstelle 129 (Domäne Glashof) ist der Oberboden durch Düngung auf 6,1 erhöht (ehemaliger Acker mit Pflughorizont).

## Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Schönau (über 1200 Meter über NN) wurden zwischen 1985 und 2005 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei und Cadmium in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand im Jahr 1985 (Blei, Cadmium) bzw. 1990 (Zink) und sind seitdem rückläufig. 2005 lagen sie nur bei Blei noch über dem Landesdurchschnitt, bei Cadmium und Zink deutlich darunter (Standort Schönau, Messjahr 2005: 56 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 2,4 mg Cd/kg TS gegenüber 3,55 mg Cd/kg TS; 160 mg Zn/kg TS gegenüber 240 mg Zn/kg TS) [RAHTKENS & V.D.TRENCK 2006].

### 5.7.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

## Bioindikatoren Fließgewässer

Der Schleifenbach zeigt im Zeitraum 1990 bis 1995 zwar eine für die Reproduktion von Bachforellen ausreichend hohe Zahl an adulten Tieren, jedoch so gut wie gar keine Jungtiere, so dass dieser Bach bis 1995 in die Säurezustandsklasse stark sauer eingestuft wurde. Bis zum Jahr 2000 (dem vorläufig letzten Untersuchungsjahr) verbesserten sich die Bedingungen für diesen Bioindikator aufgrund einer ausgeglicheneren Altersstruktur (Abb. 5.7.4-1), so dass der Schleifenbach nur noch als kritisch sauer klassifiziert wurde [IUS 2000].

Von den 28 Gewässerabschnitten, an denen im Zeitraum 1993 bis 1995 das Makrozoobenthos erfasst wurde, musste nur das Hirschbächle als permanent stark sauer eingestuft werden. Bemerkenswert ist, dass drei weitere Messstellen außerhalb des Untersuchungsgebietes, die nur einige Kilometer vom Hirschbächle entfernt liegen, auch als permanent stark sauer klassifiziert wurden. Bis auf einen Zufluss der Kleinen Wiese im Westen des Gebietes wurden alle weiteren Messstellen als episodisch schwach sauer eingeordnet.

Vier der 28 Gewässerabschnitte die 1993 bis 1995 beprobt wurden, wurden auch 2007 nochmals beprobt und lieferten ein durchweg positives Ergebnis: 2 Probestellen wiesen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 2 Probestellen die Säureklasse 2 (episodisch schwach sauer) auf. Alle

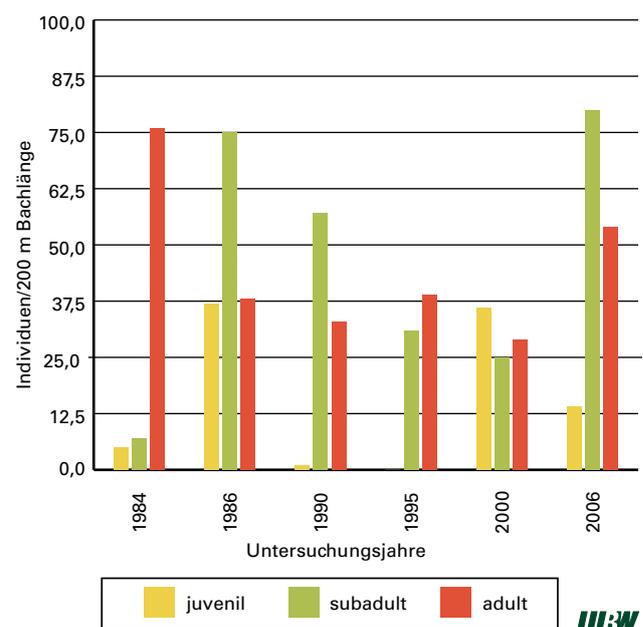


Abb. 5.7.4-1: Entwicklung der Bachforellenpopulation im Schleifenbach; [Quelle: IUS 2000]

4 Probestellen haben sich entweder um eine Klasse verbessert oder ein gleichbleibend gutes Ergebnis erhalten.

### Grundwasser

Von den in diesem Gebiet vorhandenen insgesamt 11 Grundwassermessstellen ist eine für die Beurteilung der Versauerungsentwicklung geeignet. Sie liegt im Fluss-

seinzugsgebiet der Wiese. Es handelt sich um eine Quelle, die über mehrere Jahre sogar mehrmals im Jahr beprobt worden ist. Für die Einzugsgebiete von Kleiner Wiese und Hauensteiner Alb gibt es keine geeigneten Messstellen.

Die Quelle liegt nicht weit vom Feldberg entfernt am Hang des obersten Wiesentals in der Gemeinde Todtnau.

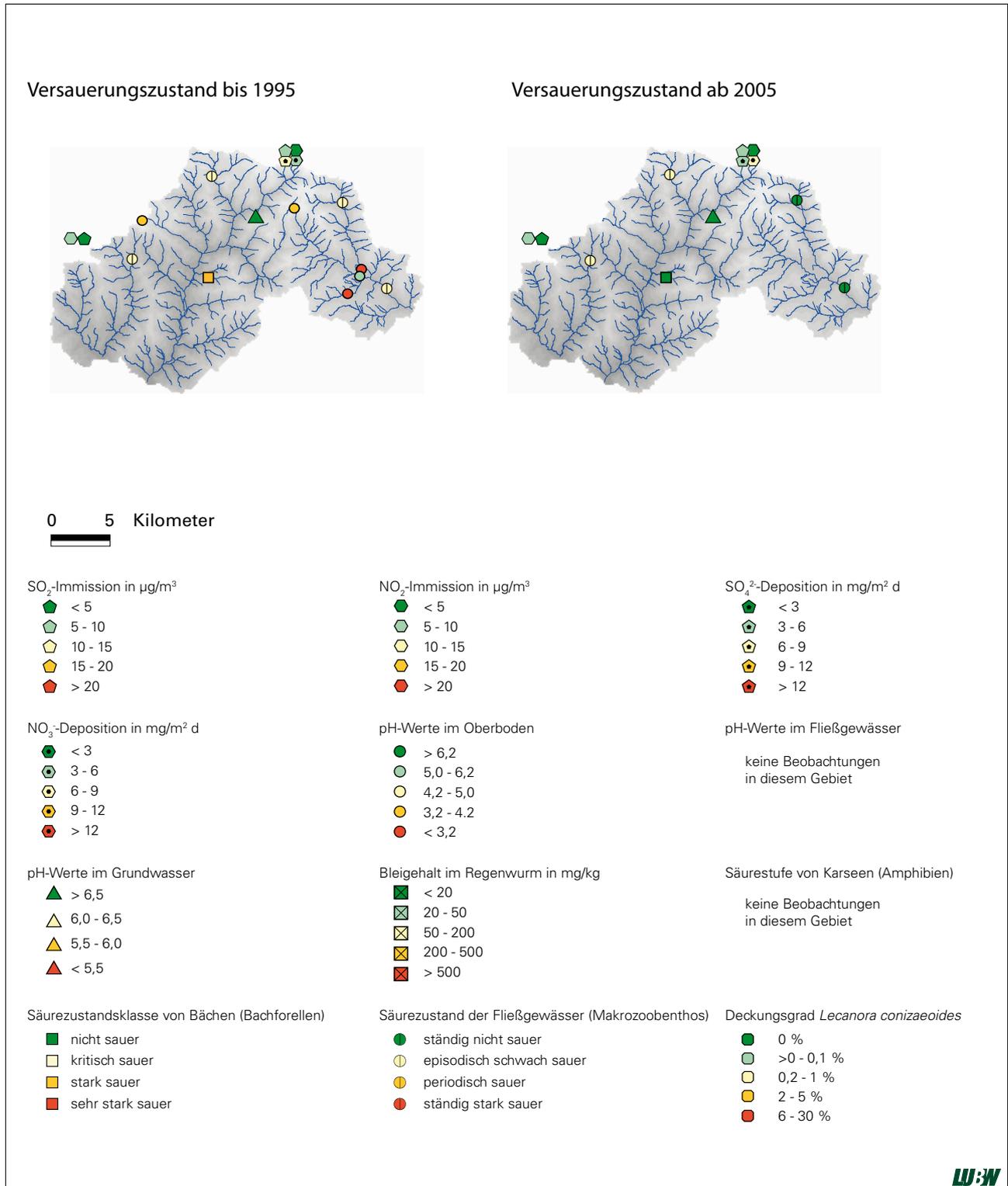
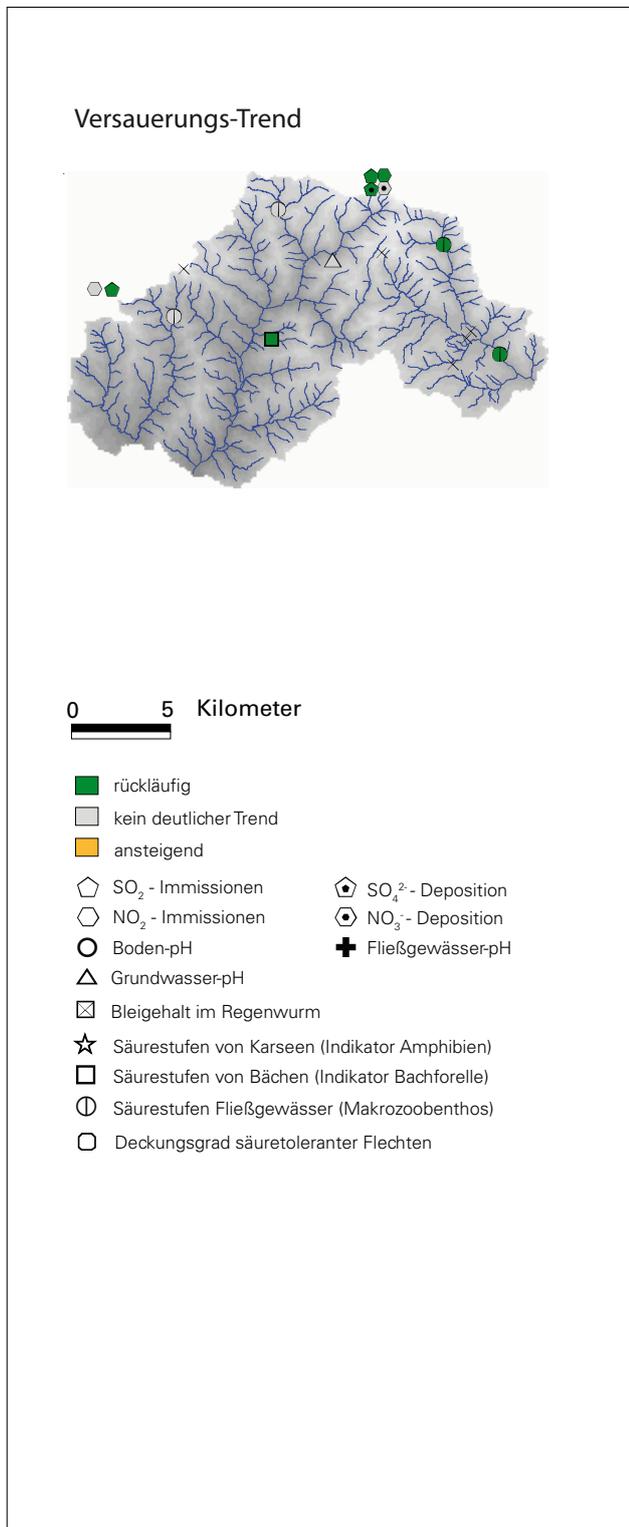


Abb. 5.75-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleiner Wiese im südlichen Schwarzwald.

Es handelt sich um eine Stollenquelle, das heißt, dass das im Berg infiltrierende Sickerwasser über einen ehemaligen Bergbaustollen gefasst wird und am Stollenmund als Quelle austritt. Die Mauswaldstollenquelle liegt auf 800 m Höhe, ihr Einzugsgebiet reicht bis auf 1.150 m hinauf. Neben Klüften führt auch Hangschutt das Wasser heran. Das dominierende Gestein im Einzugsgebiet ist der Gneis.

Das Einzugsgebiet der Mauswaldquelle ist nahezu durchweg bewaldet, auf einer Bergkuppe befindet sich ein Stück Grünland, welches touristisch in Form einer Sesselliftanlage mit einer Höhengaststätte genutzt wird. Die Stürme der Jahre 1990/91 und 1999 haben keine Schäden im Wald verursacht.



#### Positiver Trend

Alle vier wiederholt auf Makrozoobenthos untersuchten Bachabschnitte wiesen eine verbesserte oder gleichbleibende Säurestufe auf (2007: Säureklassen 1 und 2).

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen.

An der einzigen Grundwassermessstelle ist die Situation gegenüber den 1980er und 1990er Jahren unverändert, jedoch ist die Situation als positiv zu werten, da dieses Gebiet mit pufferstärkeren Gneisgesteinen nicht so versauerungsgefährdet ist wie andere Gebiete. Hier liegen die pH-Werte nahezu immer über pH 6,5.

#### Negativer Trend

Nein

Abb. 5.75-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleiner Wiese im südlichen Schwarzwald.

Die Messstelle war und ist von der Versauerung nur gering beeinflusst, da im Einzugsgebiet das im Vergleich zum Buntsandstein pufferstärkere Gneisgestein ansteht und die Immissionen geringer sind als in anderen Gebieten. Für die Grundwassermessstelle liegen insgesamt 52 pH-Werte seit den 1960er Jahren vor, davon liegen nur zwei Werte in den 1980er Jahren mit je pH 6,49 knapp unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Viele Werte liegen über pH 7,0, einige erreichen sogar pH 7,5. Die mittleren pH-Werte reichen in den Jahren 1994 bis 1996 von pH 6,6 bis 6,9 in 2005 bis 2007 von pH 6,8 bis 7,1. Jedoch werden in 2006 ähnlich niedrige Einzelwerte bis pH 6,6 (6,7) registriert, wie in 1994 bis 1996 und in den 1980er Jahren jeweils nach hohen Niederschlägen und/oder sehr hohen Säureeinträgen (Abb. 5.7.2-1 und 5.7.4-2).

Daher wird die Grundwasserversauerungsentwicklung in diesem Gebiet als gleichbleibend eingestuft, jedoch ist das Grundwasser in diesem Gebiet aufgrund seiner geologischen Ausstattung mit pufferstärkerem Gneisgestein nicht in dem Maße gefährdet wie andere Gebiete mit pufferschwächerem Buntsandstein im Nordschwarzwald.

### 5.7.5 Gesamtbewertung

Im südlichen Schwarzwald liegt der pH-Wert der Oberböden im Vergleich zum Nordschwarzwald weniger häufig im stark sauren Aluminiumpufferbereich.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.7.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Hauensteiner Alb, Wiese und Kleiner Wiese im südlichen Schwarzwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.7.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

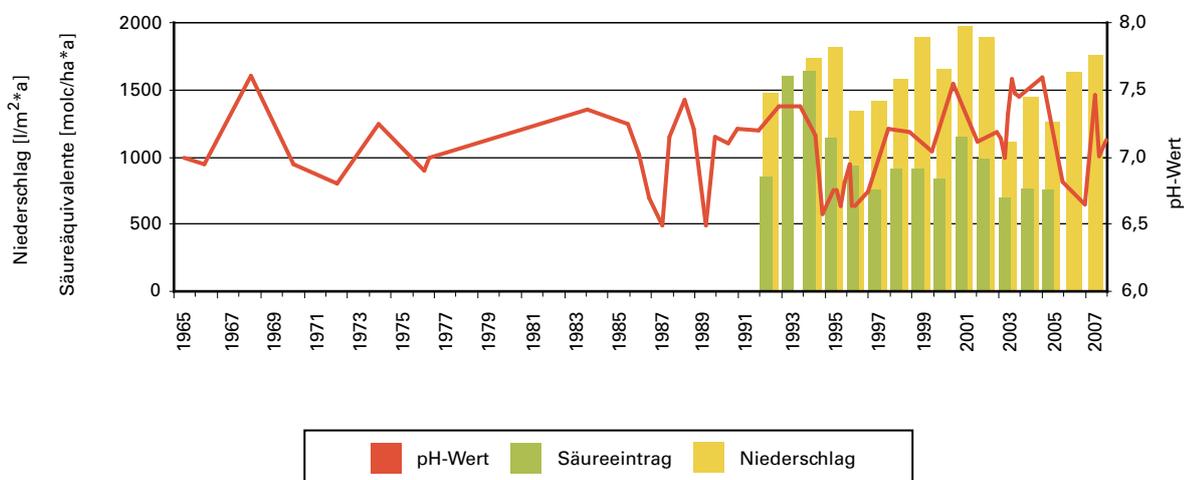


Abb. 5.7.4-2: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0002/121-6 Mauswaldstollenquelle - Todtnau im Südlichen Schwarzwald, der jährlichen mittleren Mengen von Niederschlag (Mittel der DWD-Messstationen Freudenstadt, Baiersbronn, Breitnau, Feldberg) und des atmosphärischen Säureeintrags (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, LUBW-Depositionsmessstelle Feldberg).

## 5.8 Das Einzugsgebiet von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald

### 5.8.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach liegt im westlichen Odenwald (Abb. 5.8.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 92 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt

liegt auf 545 m ü. NN, der niedrigste auf 99 m ü. NN.

Landnutzung: Dieses mit 92 km<sup>2</sup> kleinste aller Untersuchungsgebiete ist im Bereich der Mittelgebirges stark

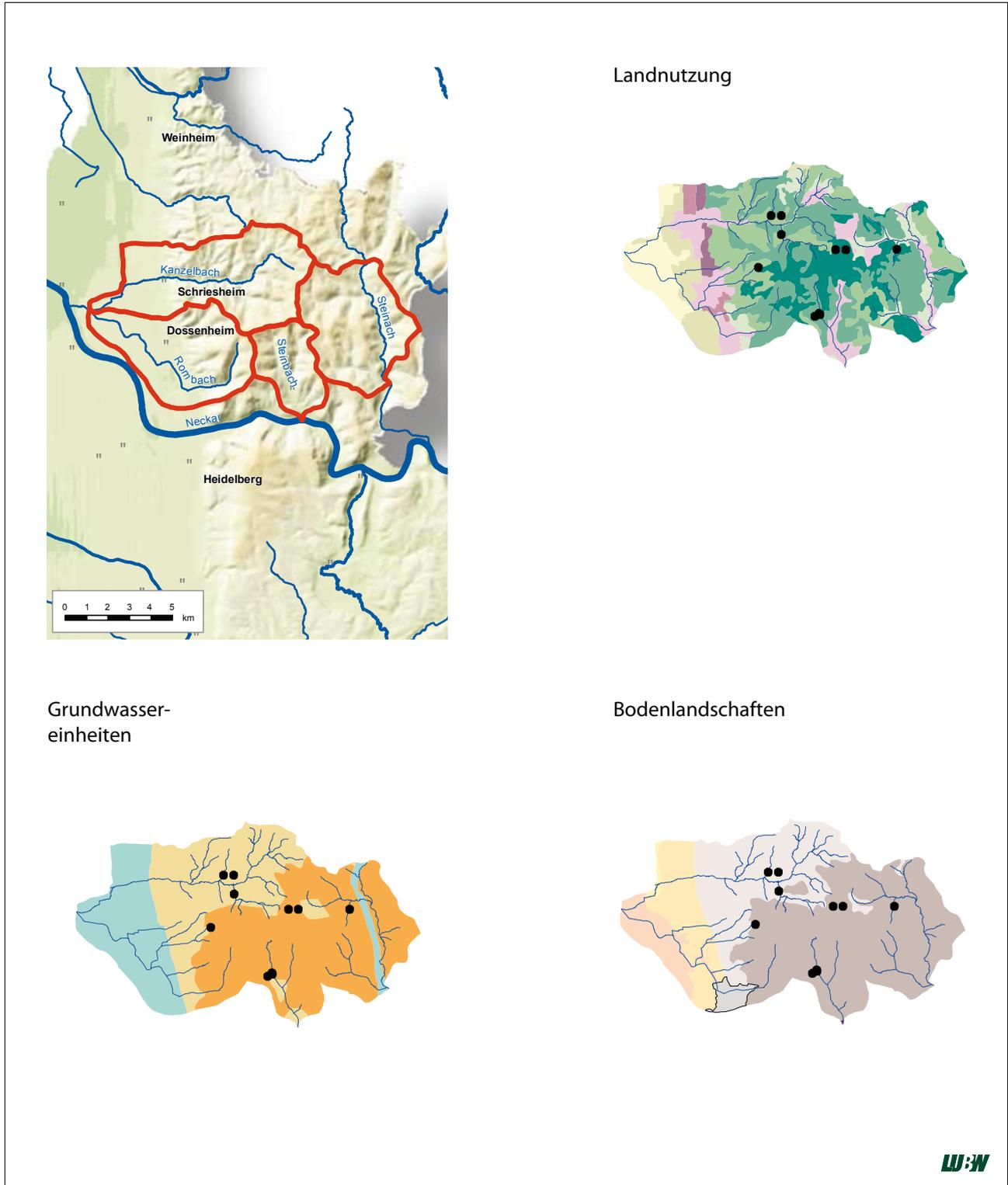


Abb. 5.8.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).

bewaldet. Auffallend hoch ist der Anteil der Misch- und Laubwälder gegenüber den Nadelwäldern, die hier nur etwa 15 % der gesamten Fläche des Untersuchungsgebietes einnehmen. Die Oberrheinebene ist durch höhere Besiedlung gekennzeichnet. In diesem Gebiet ist auch der Flächenanteil ackerbaulichen Nutzung besonders hoch.

Bodenlandschaften und Hydrogeologie: Eine deutliche West-Ost-Zonierung lassen die Bodenlandschaft und die Hydrogeologie erkennen. Die im Osten im Bereich des Mittelgebirges gelegenen Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandsteins haben etwa einen Flächenanteil von ca. 47 %. Das kristalline Grundgebirge im Westen dieser Landschaft macht ca. 27 % der Fläche des Untersuchungsgebietes aus. Im Bereich der Ebene weist die Karte der Grundwassereinheiten nur noch quartäre Schotter auf. Dieser Bereich wird in der Karte der Bodenlandschaften noch aufgegliedert in Auen und Moore (7 % Flächenanteil) und Vorbergzone (12 % Flächeanteil).

### 5.8.2 Atmosphäre

Die Luftmessstation Odenwald (Wilhelmsfeld) wurde erst im Sommer 1999 in Betrieb genommen. Die Immissionskonzentrationen lagen im Jahr 2000 für  $\text{SO}_2$  bei  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und für  $\text{NO}_2$  bei  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Im Jahr 2007 wurden  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel für  $\text{SO}_2$  und  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahresmittel für  $\text{NO}_2$  festgestellt.

#### Bioindikatoren Atmosphäre

Auf der Wald-Dauerbeobachtungsfläche Schriesheim konnte die Flechte *Lecanora conizaeoides* sowohl im Jahr 1991 als auch elf Jahre später im Bestand nachgewiesen werden. Der Deckungsgrad dieses Säurezeigers ist allerdings rückläufig und der Flächenanteil dieser Flechte halbierte sich im angegebenen Zeitraum.

### 5.8.3 Pedosphäre

In diesem Einzugsgebiet liegt die Dauerbeobachtungsfläche Wilhelmsfeld (Intensiv-Messstelle) mit Braunerde aus Mittlerem Buntsandstein unter Nadelwald. Auch hier finden sich die erwartungsgemäß niedrigen Boden-pH-Werte, die seit Messbeginn 1995 im Bereich der Messgenauigkeit

schwankend auf unverändertem Niveau liegen.

#### Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Schriesheim wurden zwischen 1985 und 2005 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei und Cadmium in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand im Jahr 1985 (Cadmium), 1987 (Zink) bzw. 2005 (Blei). Die Bleigehalte an dem Standort schwanken extrem, für den Maximalwert 2005 konnte keine plausible Erklärung gefunden werden. Die Cadmiumgehalte waren kontinuierlich rückläufig bis 2000 und sind 2005 sprunghaft angestiegen. Auch hierfür konnte keine Erklärung gefunden werden. Die Zinkgehalte sind demgegenüber seit 1994 nahezu konstant (Standort Schriesheim, Messjahr 2005:  $620 \text{ mg Pb}/\text{kg TS}$  gegenüber  $2,3 \text{ mg Pb}/\text{kg TS}$  im Landesdurchschnitt;  $9,4 \text{ mg Cd}/\text{kg TS}$  gegenüber  $3,55 \text{ mg Cd}/\text{kg TS}$ ;  $213 \text{ mg Zn}/\text{kg TS}$  gegenüber  $240 \text{ mg Zn}/\text{kg TS}$ ) [LUBW 2006].

### 5.8.4 Hydrosphäre

#### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

#### Bioindikatoren Fließgewässer

Zwei der drei Bäche des westlichen Odenwaldes (Mühlbach, Steinbach) zeichnen sich durch kleine Einzugsgebiete mit geringen Abflüssen aus, die in trockenen Jahren vollständig austrocknen können. Dies war mindestens im Jahr 2006 der Fall, so dass die Populationen von Bachforellen in diesen Bächen nicht versauerungsbedingt, sondern witterungsbedingt (bzw. möglicherweise als Folge veränderter klimawandelbedingter Niederschlagsverteilung) erloschen sind. Sommer mit langen Trockenperioden sind infolge der prognostizierten Veränderungen durch den Klimawandel in Zukunft häufiger zu erwarten [LfU 2005b]. Sie können in den Fällen, wenn Tiere – wie Bachforellen – nicht in weiter unterhalb gelegene Bach- und Flussbereiche abwandern können, zum vollständigen Erlöschen einer Art in dem Oberlauf eines Baches führen mit der Folge, dass das Räuber-Beute Verhältnis massiv gestört wird. Eine Durchgängigkeit von Fließgewässern ist

deshalb in Zeiten erhöhter Austrocknungsgefahr besonders wichtig [LfU 2004].

Der Kanzelbach wurde zuletzt 1989 untersucht. Zwar nahm die Population an Bachforellen gegenüber 1986 ab, die nur leicht schiefe Alterstruktur spricht gegen eine langfristige (versauerungsbedingte) Schädigung und für eine Situation, die für eine Reproduktion und damit Arterhaltung der Bachforellen in diesem Bach spricht.

Von den 13 Gewässerabschnitten, in denen in den Jahren 1993 bis 1995 das Makrozoobenthos untersucht wurde, mussten nur zwei (Sengesselloch und Kanzelbach) als permanent stark sauer eingestuft werden. Das Einzugsgebiet des Steinbaches liegt im Verbreitungsgebiet des Unteren und Mittleren Buntsandsteins, während der Kanzelbach auch noch bis zur Messstelle das kristalline Grundgebirge durchfließt. Bemerkenswert ist die Einstufung des Sengesselochs, eines Zuflusses des Steinbaches, da dieser schon 1993 pH-Werte um 6,5 aufwies (s. o.). Drei weitere Gewässerabschnitte wurden als episodisch sauer eingestuft. Sie befinden sich ebenfalls im Bereich des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. Dass aber nicht alle Gewässerabschnitte, die das Verbreitungsgebiet dieses schlecht puffernden Gesteins durchfließen, versauert sein müssen zeigen vier weitere Gewässerabschnitte im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes. Diese sind wie die übrigen vier Gewässerabschnitte im Kristallin nur als episodisch schwach sauer eingestuft worden.

3 der 13 Gewässerabschnitte wurden 2007 nochmals beprobt. Dabei wiesen zwei Probestellen die Säureklasse 1 (permanent nicht sauer) und 1 Probestelle die Säureklasse 3 (periodisch sauer) auf.

### **Grundwasser**

Von den in diesen Flussgebieten vorhandenen insgesamt 20 Grundwassermessstellen sind drei für die Beurteilung der Versauerungsentwicklung geeignet. Es handelt sich um Quellen, die über mehrere Jahre zum Teil mehrmals im Jahr beprobt worden sind.

Für die Einzugsgebiete des Rombachs und des Kanzelbachs gibt es keine geeigneten Grundwassermessstellen,

jedoch liegt eine der drei geeigneten Quellen im Einzugsgebiet der Steinach. Die anderen beiden liegen in unmittelbar benachbarten Bacheinzugsgebieten, so dass sie auch zur Beurteilung der Versauerungssituation herangezogen werden können. Die Sengessellochquelle liegt am Sengesselbach in einem Teileinzugsgebiet des Steinbaches und die weitere Quelle im Einzugsgebiet des Mühlbaches, welcher nachdem er auf seinem Fließweg den Odenwald verlassen hat, in der Rheinebene durch die Ortschaft Handschuhsheim fließt.

Die drei Quellen besitzen nur sehr kleine Einzugsgebiete. Die Einzugsgebiete sind vollständig bewaldet. Die Mischwaldbestände sind von den Windwurfschäden der Stürme der Jahre 1990/1991 und 1999 nicht betroffen gewesen, jedoch sind aus den 1980er Jahren Sturmschäden und flächige Kahlschläge bekannt. Die Quellen sind Kluft-, Verwerfungs- oder Schichtquellen, wobei an der Grundwasserneubildung meist auch mehrere Meter mächtige Hangschuttdecken beteiligt sind, welche den Quellen schnell versickerndes Wasser zuführen. Die drei Quellen liegen im Unteren und Mittleren Buntsandstein. Der obere Buntsandstein mit seinem besser abpufferndem Gestein ist nicht zugegen, zum Teil existiert Rotliegendes in den Einzugsgebieten.

In diesem Gebiet wurden in den 1980er und 1990er Jahren die landesweit niedrigsten pH-Werte gemessen. Der absolut niedrigste Wert betrug pH 3,96 (Jahr 1994).

Alle drei Messstellen zeigen im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute sehr kritische pH-Werte. An den Quellen liegen viele der pH-Einzelwerte auch in den Jahren 2005/2006/2007 zwischen pH 5,0 und pH 6,5 und damit zum Teil weit unterhalb des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von pH 6,5. Die Sengessellochquelle hat vereinzelt auch höhere pH-Werte bis 6,7, jedoch wird aufgrund der hier großen Schwankungen auch pH 5,7 erreicht.

Die mittleren pH-Werte über die drei Jahre 2005/2006/2007 liegen an den drei Quellen bei pH 5,3, bei pH 5,8 und an der Sengessellochquelle bei pH 6,3. Jedoch zeichnen sich an allen Messstellen deutliche Verbesserungen ab. Die mittleren pH-Werte der drei Jahre

1994 - 1996 lagen mit pH 4,9, pH 5,5 und an der Sengessellochquelle mit pH 5,5 im Vergleich zu 2005 - 2007 wesentlich niedriger. Insbesondere fällt der stark erhöhte pH-Anstieg um pH 0,8 an der Sengessellochquelle auf. Auch sind an allen drei Quellen seit den 1990er Jahren keine so extrem niedrigen pH-Absenkungen z.B. bis auf pH 3,96 mehr zu beobachten, insbesondere an der Senges-

sellochquelle und an der Hahnengrundquelle, bei denen die Minimawerte seit Mitte der 1990er Jahre nicht mehr auf 4,82 bzw. 3,96 pH fallen, sondern nur noch minimal pH 5,7 bzw. 5,0 erreichen. Dies ist als eine positive Entwicklung gegenüber den 1990er Jahren zu werten, jedoch ergibt sich gegenüber Einzelwerten aus den 1950er und 1960er Jahren keine Verbesserung. Aus diesen Jahren lie-

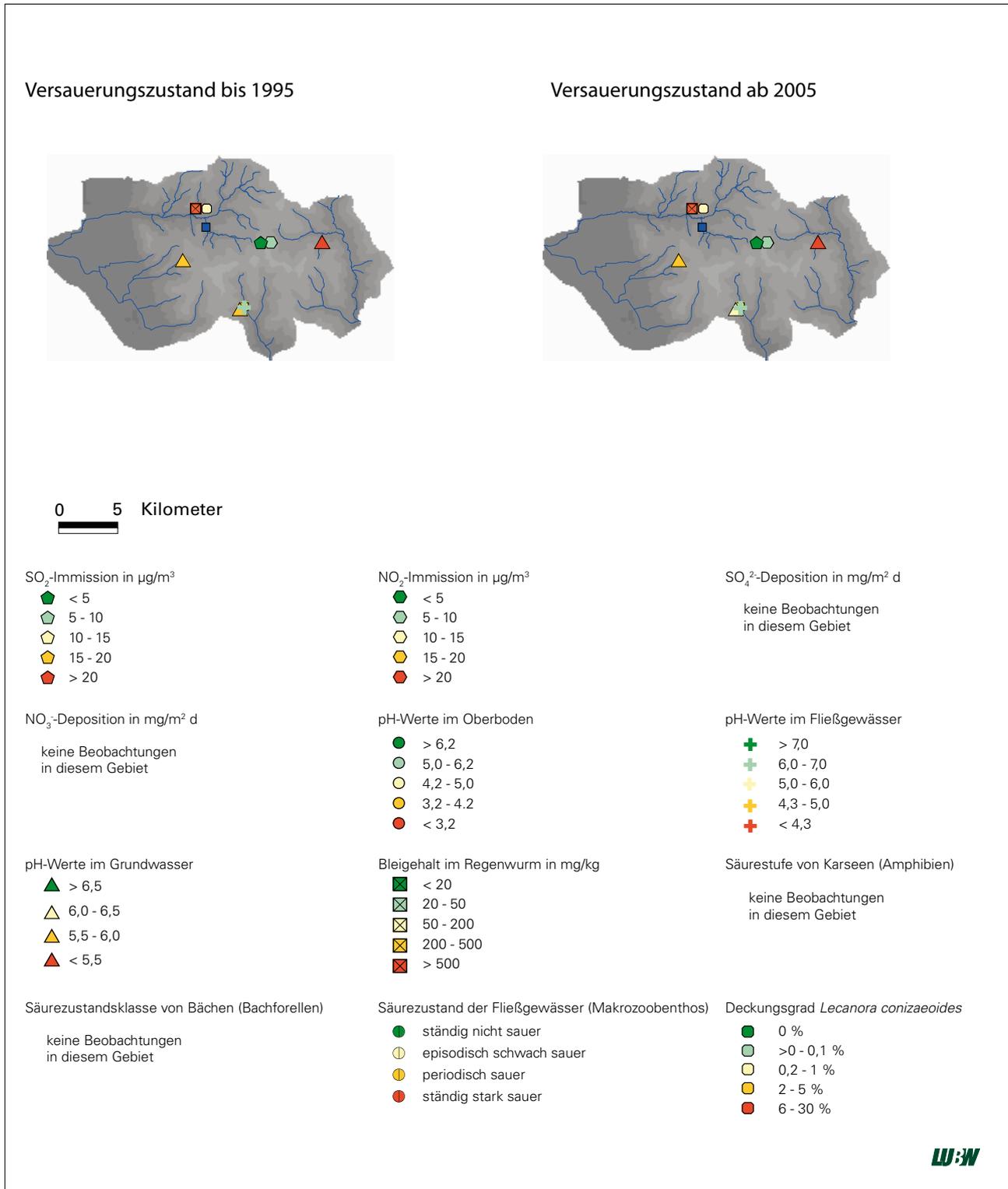
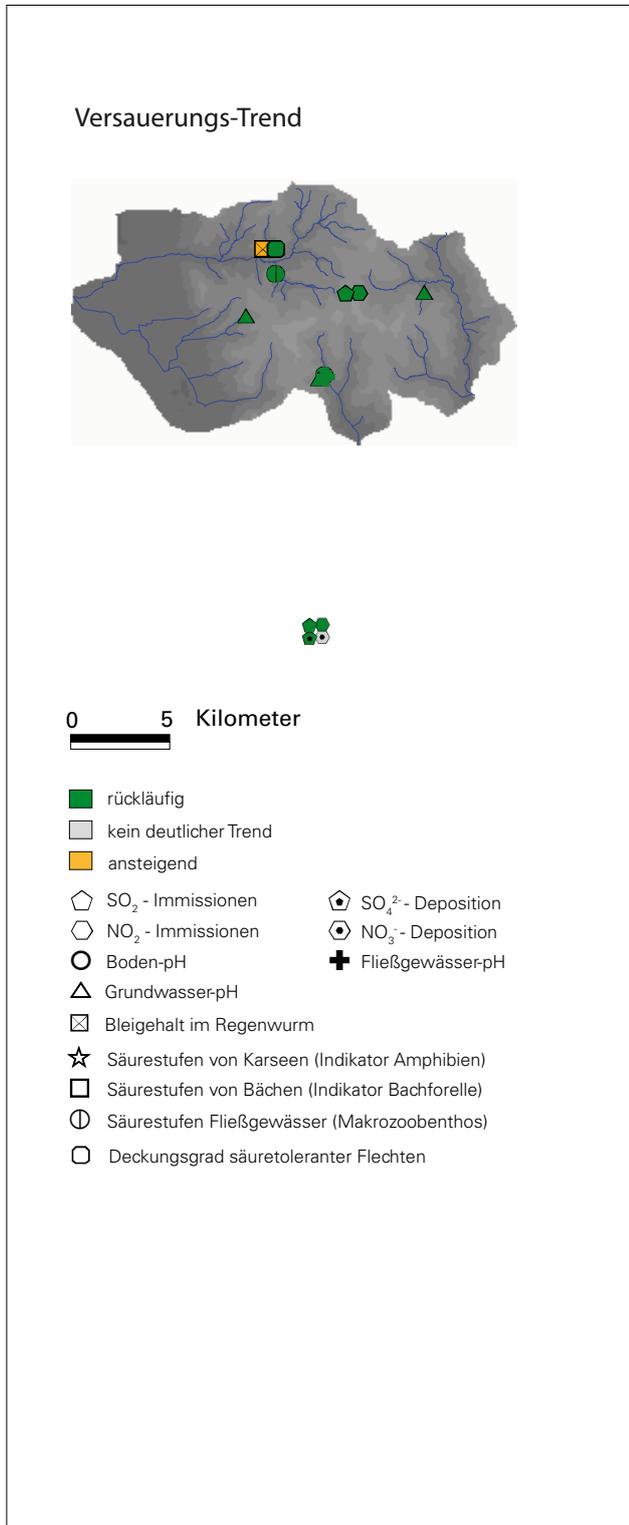


Abb. 5.8.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor und nach 1995 in den Einzugsgebieten von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald.

gen bei der Hahnengrundquelle drei historische Werte von pH 4,9 bis pH 5,5 vor.

Beispielhaft soll die Versauerungsentwicklung der Zimmerholzquelle gezeigt werden (Abb. 5.8.4-1). Die Quelle 0091/355-9 QF Zimmerholzquelle liegt im Einzugsgebiet des Mühlbaches auf der Gemar-

kung der Gemeinde Dossenheim auf etwa 350 m Höhe, das Einzugsgebiet reicht bis auf nahezu 475 m hinauf und umfasst die Gesteine des mittleren Buntsandsteins. Klüfte und Hangschutt führen der Quelle schnell versickerndes Wasser zu. Die Kluftquelle zeigt mit einem mittleren pH-Wert von 5,8 in 2005 bis 2007 höhere pH-Werte gegenüber den Werten aus 1994 bis 1996 mit



#### Positiver Trend

An allen drei Quellen werden seit Mitte der 1990er Jahre keine vergleichbar starken pH-Wert Absenkungen mehr gemessen, wie sie aus den 1980er und 1990er Jahren bekannt waren. Auch der langfristige pH-Trend im Quellwasser zeigt über alle Messstellen seit Mitte der 1980er Jahre eine positive Tendenz.

#### Kein deutlicher Trend

Die Bachforellenbestände an dem einzigen Bach, der permanent Wasser führt, sind klein und von unausgewogener Altersstruktur. Eine der drei wiederholt auf Makrozoobenthos untersuchten Bachabschnitte, wies mit Säureklasse 3 weiterhin eine periodische Versauerung auf.

Die Flussgebiete im Odenwald sind nach wie vor sehr stark versauert. In den Quellen fallen die pH-Werte vereinzelt bis zu 5,0 pH.

#### Negativer Trend

Nein

Abb. 5.8.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald.

pH 5,5. Die pH-Werte dieser Quelle liegen von 1998 bis 2007 immer zwischen pH 5,1 und 6,2 und zeigen nur noch einmal in 2001 die in den 1980er und 1990er Jahren öfters beobachteten sehr großen pH-Absenkungen bis auf pH 5,1 und 5,2, wie in 1988, 1989, 1994 und 1995. Die pH-Absenkungen sind in jüngerer Zeit nicht mehr so tiefreichend.

### 5.8.5 Gesamtbewertung

Die Säurepufferkapazität der Böden des Odenwalds ist häufig sehr gering (Abb. 2.2-2). Ursächlich sind die pufferschwachen Ausgangsgesteine (47 % Buntsandstein und 27 % Grundgebirge). Bedingt durch den benachbarten Ballungsraum Mannheim-Heidelberg musste dieses Gebiet historisch vermutlich höhere atmosphärische Säureinträge verkraften als die übrigen Versauerungsgebiete des Landes.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.8.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.8.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

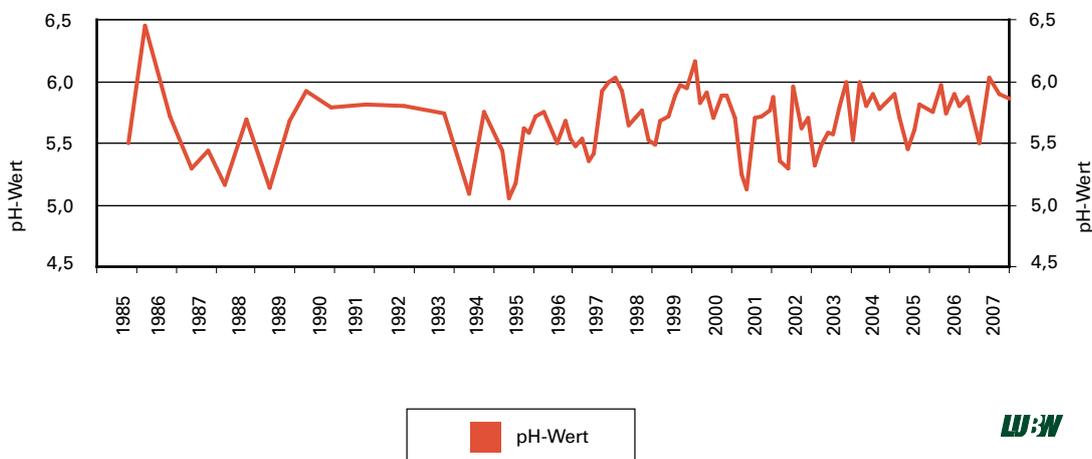


Abb. 5.8.4-1: Entwicklung der pH-Werte für die Messstelle 0091/355-9 QF Zimmerholzquelle – Dossenheim im Odenwald.

## 5.9 Das Einzugsgebiet von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland

### 5.9.1 Gebietsbeschreibung

Das Einzugsgebiet von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland (Abb. 5.9.1-1). Seine Ausdehnung beträgt 307 km<sup>2</sup>, der höchste Punkt liegt auf 585 m ü. NN, der niedrigste auf 260 m ü. NN. Klimatisch erwäh-

nenswert sind die gegenüber dem Landesdurchschnitt etwas erhöhten Niederschlagssummen im Herbst und Winter.

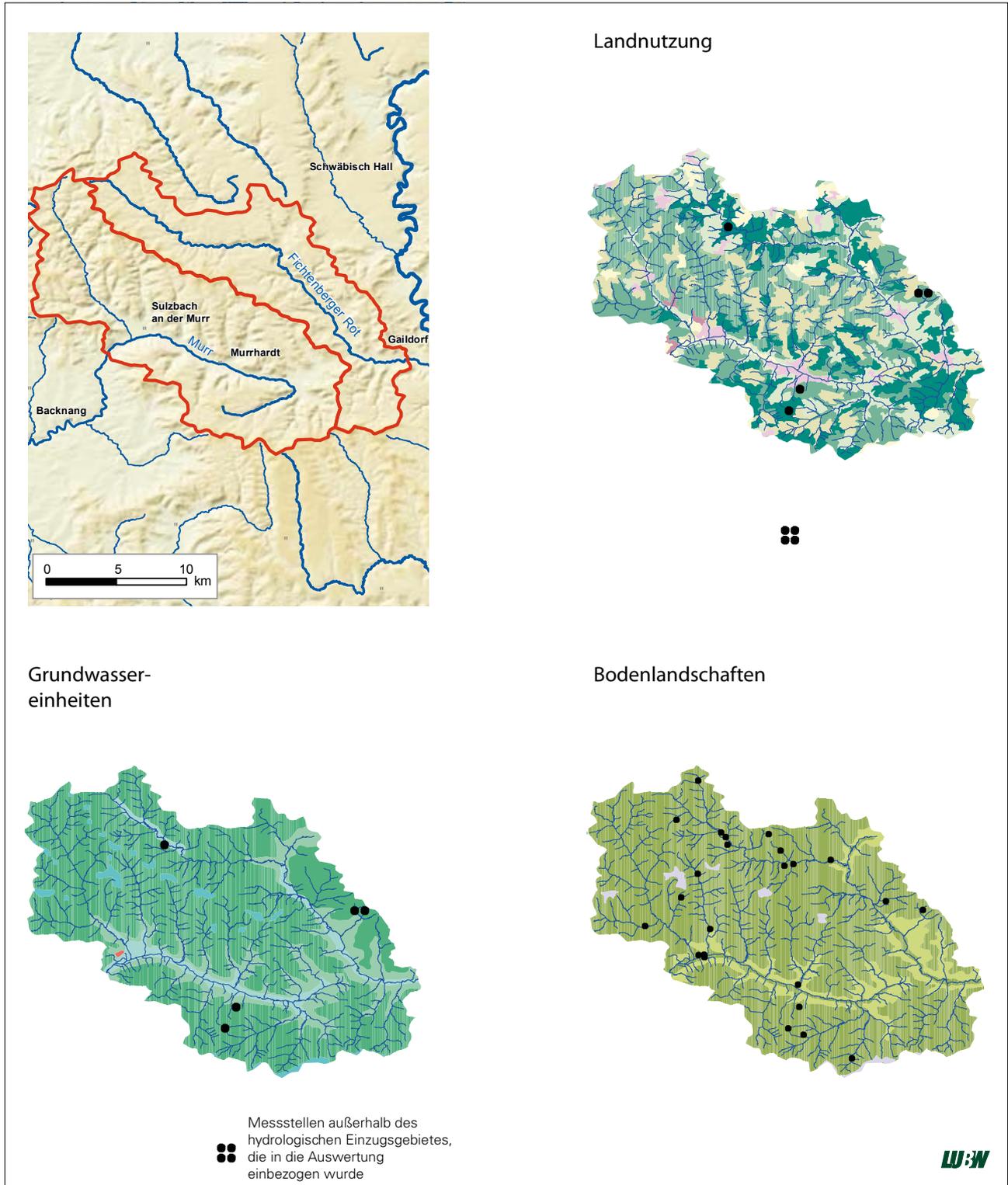
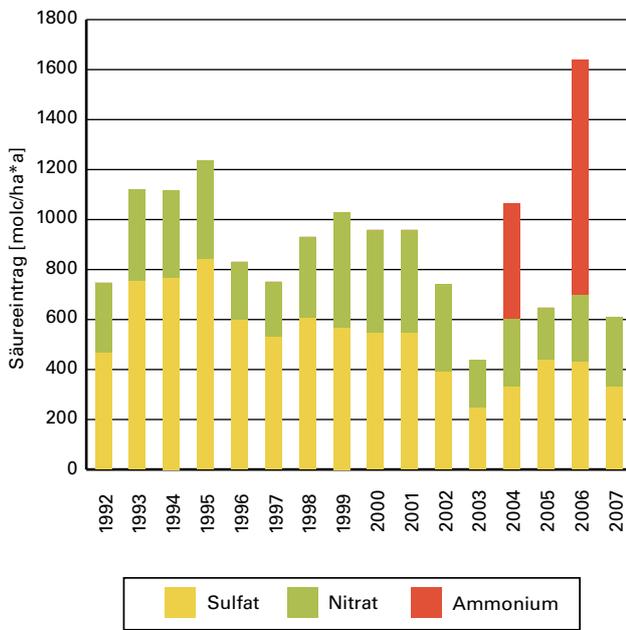


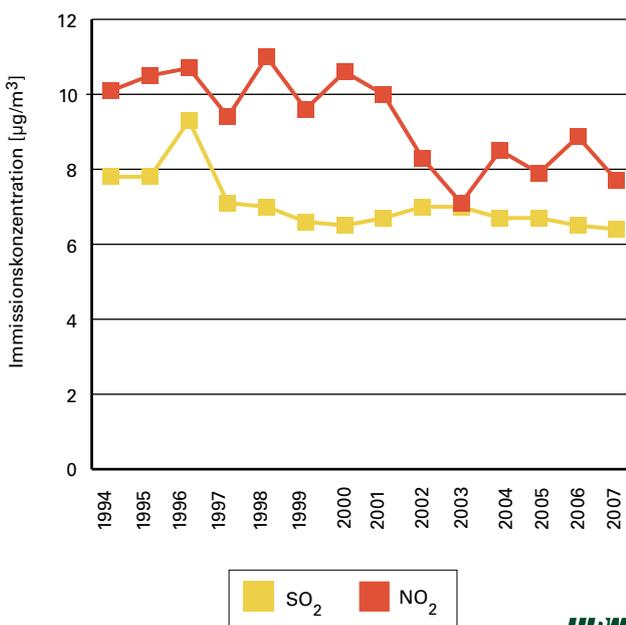
Abb. 5.9.1-1: Topographische Lage, Landnutzung, Bodenlandschaften, Hydrogeologie und Lage der Messstellen in den Einzugsgebieten von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland (Legende siehe Abbildung 5.1.1-2).



LUBW

Abb. 5.9.2-1: Säureeintrag von Sulfat und Nitrat von 1992-2007 und Ammonium für 2004 und 2006 an der Messstation Welzheimer Wald

Landnutzung: Die Nutzung als Wald tritt in diesem Untersuchungsgebiet zurück und macht nur 60 % der gesamten Fläche aus. Auch der Nadelwaldanteil ist mit rund 20 % sehr gering. Mit über 30 % haben die Landnutzungsformen Grünland und Komplexe Parzellenstrukturen einen vergleichsweise hohen Flächenanteil. Das Untersuchungsgebiet ist zu jeweils 3 % von Acker- und Siedlungsflächen bedeckt.



LUBW

Abb. 5.9.2-2: Schwefeldioxid- und Stickstoffdioxid-Immissionen (Passivsammler) an der Messstation Welzheimer Wald von 1994-2007

Bodenlandschaften und Hydrogeologie: Oberkeuper und Oberer Mittelkeuper sind die wichtigsten Grundwassereinheiten in diesem Untersuchungsgebiet. Über 14 % der Fläche macht der Gipskeuper aus. Die Flächenangaben der Bodenlandschaften und der Grundwassereinheiten variieren auch in diesem Untersuchungsgebiet deutlich. Dies hängt wiederum mit der Mächtigkeit der Gesteinschichten zusammen. Die Schichten des Ober- und Oberen Mittelkeupers sind hier teilweise so geringmächtig, dass sie als hauptsächlicher Grundwasserleiter nicht mehr relevant ist, hingegen aus der Sicht der Bodenbildung von entscheidender Bedeutung. Dadurch ist die Bodenlandschaft Keuperbergland auch mit fast 89 % angegeben und das Areal des Gipskeuper-Hügellandes beschränkt sich auf gut 10 %.

## 5.9.2 Atmosphäre

Die Messstation Welzheimer Wald liegt 5 km südöstlich außerhalb des Einzugsgebietes. Dort wird sowohl die Deposition, als auch die Immission erhoben.

Die Sulfat-bedingten Säureeinträge an der Messstation Welzheimer Wald verringerten sich im Zeitraum 1992 bis 2007 um rund 29 % (Abb. 5.9.2-1). Der Nitrat-bedingte Säureeintrag zeigt 1992 und 2007 vergleichbare Werte, während in den Jahren 1993 bis 1995 und 1999 bei beiden Komponenten deutlich höhere Einträge verzeichnet worden sind. Im trockenen und heißen Jahr 2003 wurde ebenfalls bei beiden Komponenten das Minimum erreicht. Der Eintrag an Ammonium wurde nur in den Jahren 2004 und 2006 in der Gesamtdeposition erfasst. Ammonium lieferte hier im Jahr 2004 einen Beitrag von rund 43 % und im Jahr 2006 einen Beitrag von 57 % zum Säureeintrag.

Die mit Passivsammlern ermittelten Immissionskonzentration von Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid an der Messstelle Welzheimer Wald zeigen von 1994 bis 2007 leicht rückläufige Konzentrationen (Abb. 5.9.2-2).

## Bioindikatoren Atmosphäre

Die Wald-Dauerbeobachtungsfläche Schwäbisch-Hall am nordöstlichen Rand des Untersuchungsgebietes zeigt eine rückläufige Luftbelastung an. Der Deckungsgrad des Versauerungszeigers *Lecanora conizaeoides* nahm innerhalb des betrachteten Zeitraums um mehr als zwei Drittel ab.

## 5.9.3 Pedosphäre

Im Einzugsgebiet befinden sich die Boden-Dauerbeobachtungsflächen 69 und 70. Hier ist es der Stubensandstein, der das pufferarme Ausgangsgestein der sauren Böden stellt. Die pH-Werte liegen unter Nadelwald zwischen 3,9 und 4,3.

## Bioindikatoren Boden

Auf der Dauerbeobachtungsfläche Schwäbisch Hall wurden zwischen 1987 und 2000 Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Die Gehalte der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink in den Regenwürmern hatten ihren Höchststand im Jahr 1987 und sind seitdem rückläufig. Bis zum Jahr 2000 haben sich die Gehalte bei allen drei Schwermetallen in etwa halbiert und liegen auf einem aus ökotoxikologischer Sicht unbedenklichen Niveau (Standort Schwäbisch Hall, Messjahr 2000: 8,6 mg Pb/kg TS gegenüber 2,3 mg Pb/kg TS im Landesdurchschnitt; 3,7 mg Cd/kg TS gegenüber 3,5 mg Cd/kg TS; 280 mg Zn/kg TS gegenüber 238 mg Zn/kg TS) [LUBW 2006].

## 5.9.4 Hydrosphäre

### Bioindikatoren Stehende Gewässer

Untersuchungen von Seen zur versauerungsbedingten Situation von Amphibien liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor.

### Bioindikatoren Fließgewässer

Untersuchungen von Bächen zur versauerungsbedingten Situation von Bachforellen liegen aus diesem Einzugsgebiet nicht vor. Alle sechs Gewässerabschnitte des Makrozoobenthos-Programms konnten unabhängig von der Nutzung (Misch- oder Nadelwald, Grünland) als nur episodisch schwach sauer eingestuft werden. Eine Nachuntersuchung 2007 fand in diesem Gebiet nicht statt.

### Grundwasser

Von den in diesem Flussgebiet vorhandenen insgesamt acht Grundwassermessstellen ist nur eine Quelle - 0002/610-2 QF Vorderwestermurr, Murrhardt - für eine Trendbeurteilung geeignet, da sie die einzige in diesem Flussgebiet ist, die saureres Quellwasser führt (Abb. 5.9.4-1). Gemäß Datenlage der LUBW und der zur Verfügung stehenden Daten der Wasserversorger ist die Grundwasserversauerung in diesem Flussgebiet nur ein singuläres Problem - an nur dieser einen Quelle. Von 173 im Keupersandstein liegenden Quellen und Brunnen mit gemessenen pH-Werten weisen nur acht - pH-Werte von kleiner 6,5 auf. Dabei handelt es sich nur um einzelne niedrige Werte in den einzelnen Datenreihen. Die anderen Werte lie-

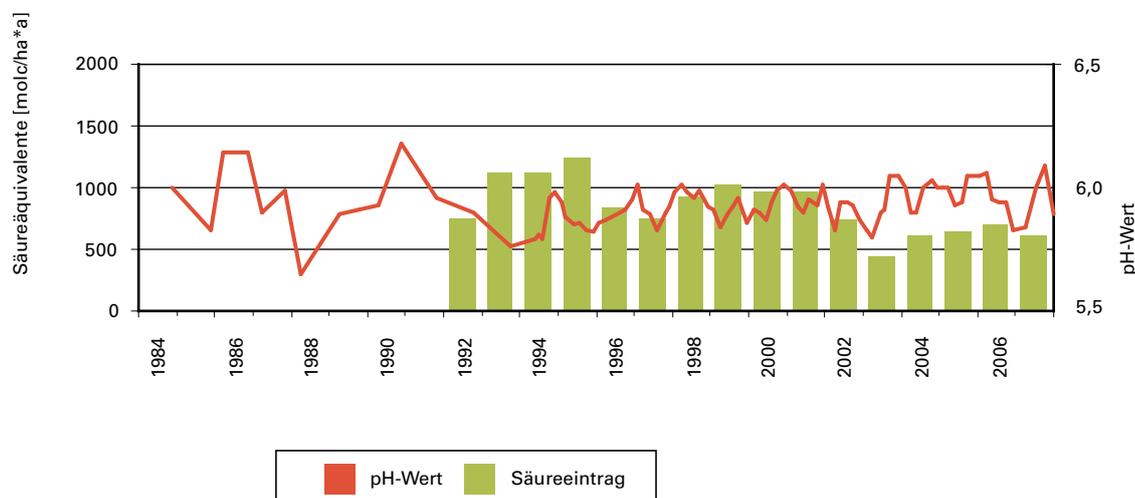


Abb. 5.9.4-1: Entwicklung der pH - Werte für die Messstelle 0006/210-2 QF Quelle Vorderwestermurr - Murrhardt im Keuperbergland und der jährlichen atmosphärischen Säureintragsmengen (Nitrat, Sulfat, ohne Ammonium, LUBW-Luftmessstation Welzheimer Wald).

gen nahezu immer über pH 6,5. Nur an der Quelle Vorderwestermurr existieren viele Werte von kleiner pH 6,5. Meistens liegen die Werte sogar unter pH 6,0.

Die Quelle Vorderwestermurr wurde über mehrere Jahre mehrmals im Jahr beprobt. Die Quelle liegt auf etwa 510 m Höhe am Hang des Hoblerbergs, welcher aus Stubens-

andstein aufgebaut ist. Das kleine Einzugsgebiet umfasst auch die bis auf 540 m reichende Bergkuppe. Klüfte und Hangschutt führen schnell versickerndes Wasser zum Quellaustritt. Das Einzugsgebiet ist durchweg bewaldet, jedoch haben Kahlschläge Ende der 1980er Jahre und offenbar schlechte Bodenverhältnisse dazugeführt, dass heute immer noch nicht ein geschlossener Baumbestand

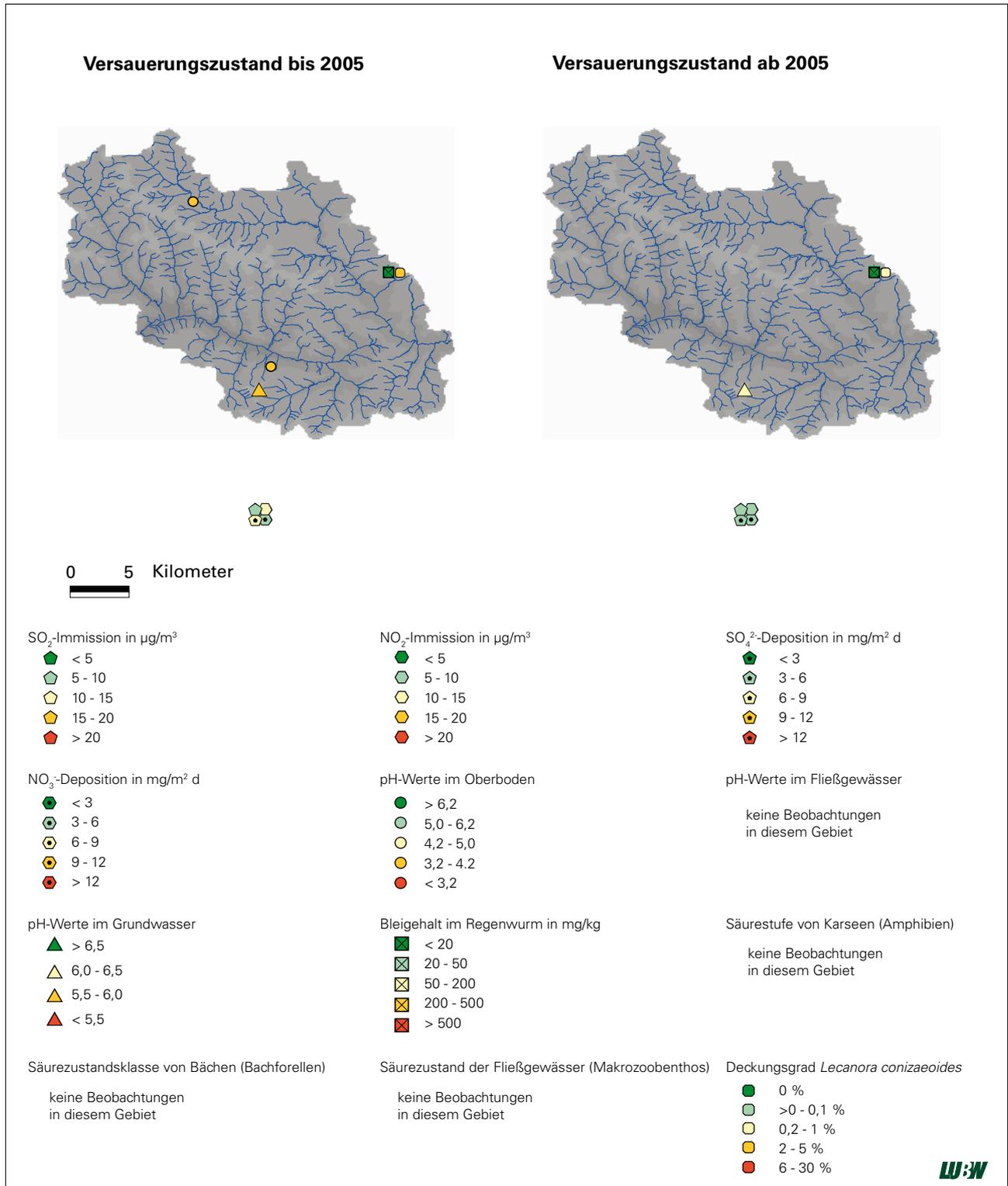
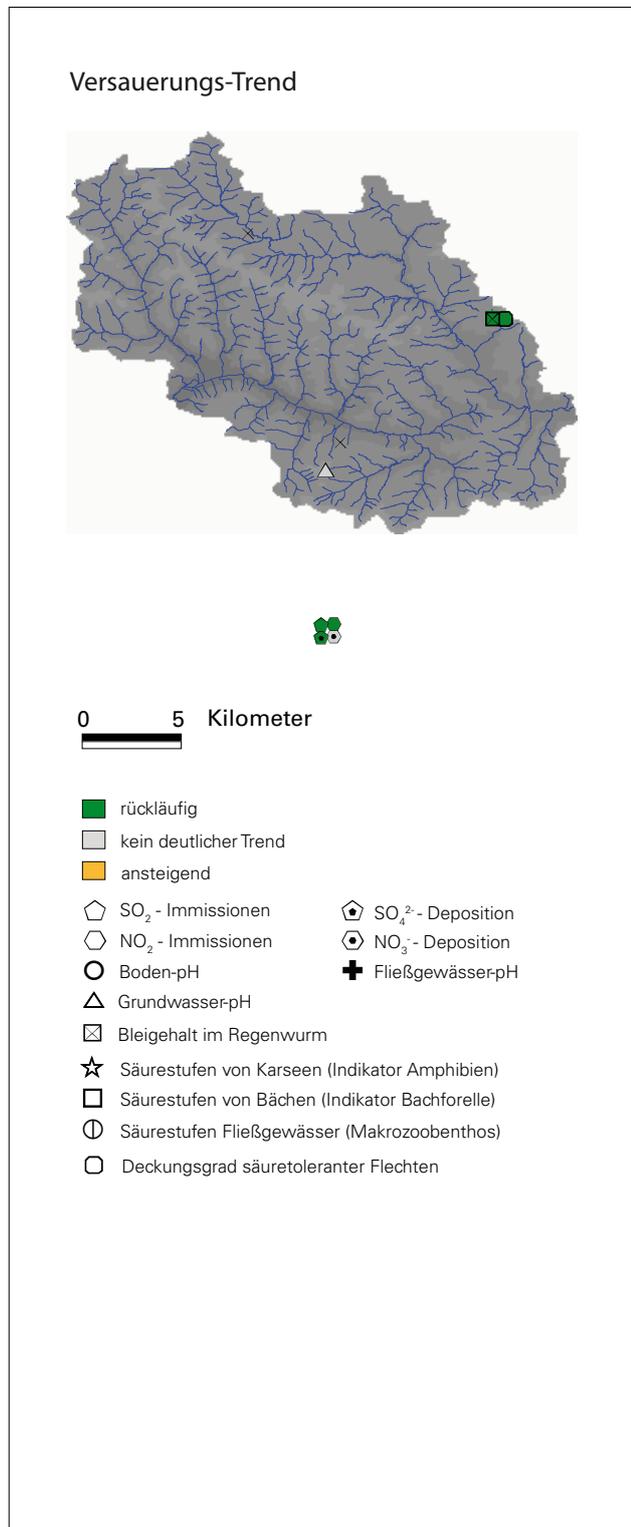


Abb. 5.9.5-1: Versauerungszustand in den Zeiträumen vor 1995 und ab 2005 in den Einzugsgebieten von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland

existiert. Die Humusschicht scheint nach den Kahlschlägen nahezu vollständig abgebaut zu sein. So wird der humusarme Sandboden vom Regenwasser schnell durchsickert. Die Quelle zeigt im Hinblick auf den Trinkwasserschutz bis heute kritische pH-Werte (Abb. 5.9.4-1). Alle pH-Werte der Messstelle liegen auch in den Jahren 2005/2006/2007 unterhalb des Grenzwertes der Trinkwas-

serverordnung von pH 6,5. Die mittleren pH-Werte an den einzelnen Quellen erreichen in den Jahren 2005 bis 2007 nur pH 5,9 bis 6,0. Bei Betrachtung der Einzelwerte ist auffällig, dass die pH - Werte in 2005 - 2007 nur bis auf pH 5,8 fallen, im Gegensatz zu den 1980er Jahren als mit pH 5,65 ein etwas tieferer Wert erreicht wurde. Jedoch ist dieser Unterschied nicht so signifikant wie an einigen der



#### Positiver Trend

Die Abnahme der durch SO<sub>2</sub> verursachten atmosphärischen Säureeinträge ist im Keuperbergland weniger deutlich als im Schwarzwald. Sehr deutlich nahm hingegen der Deckungsgrad der Flechtenart *Lecanora conizaeoides* (Versauerungszeiger) um mehr als zwei Drittel ab.

#### Kein deutlicher Trend

Bei den atmosphärischen Stickstoffeinträgen ist noch kein rückläufiger Trend zu erkennen. An der einzigen von der Versauerung betroffenen Messstelle in diesem Flussgebiet ist die Entwicklung seit Mitte der 1980er Jahre gleichbleibend. Jedoch ist die Situation als positiv zu werten, da dieses Gebiet nicht so versauerungsgefährdet ist wie andere Gebiete. Hier liegen die pH-Werte anderer Quellen und Brunnen nahezu immer über pH 6,5

#### Negativer Trend

Nein

Abb. 5.9.5-2: Versauerungstrend in den Einzugsgebieten von Kanzelbach, Rombach, Steinbach und Steinach im Odenwald.

Quellen der o.g. anderen Flussgebiete, so dass die aktuelle Versauerungssituation an dieser Quelle als unverändert einzustufen ist. Auch werden in 2005 – 2007 die Maxima der 1980er Jahre von pH 6,1 bis 6,2 nicht erreicht.

### **5.9.5 Gesamtbewertung**

Das Keuperbergland ist durch kleinräumig wechselnde Gesteinsschichten geprägt. Hier treten sehr gering gepufferte Böden eher kleinflächig hervor.

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.9.5-1 die Messdaten aus dem Einzugsgebiet von Murr und Fichtenberger Rot im Keuperbergland dargestellt. Die Darstellung ist stark vereinfacht, in dem alle Messdaten bis 1995 und ab 2005 (2002) zusammengefasst wurden. In Abbildung 5.9.5-2 findet sich für die Parameter, für welche eine Wiederholungsmessung vorliegt die Bewertung des zeitlichen Verlaufes (Versauerungstrend; der pH-Trend im Grundwasser wurde als positiv eingestuft, wenn die Anzahl kurzfristig niedriger pH-Werte abgenommen hat, auch wenn der mittlere pH-Wert keinen Trend zeigt).

# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die aktuelle Versauerungssituation in Baden-Württemberg wird anhand landesweiter Daten der LUBW (Kap. 4) und langjähriger Messreihen in den Versauerungsgebieten (Kap. 5) interpretiert.

## 6.1 Die atmosphärischen Stickstoffeinträge sind noch zu hoch

Ist die anthropogene Versauerung für Baden-Württemberg nach Jahrzehnten der Emissionsminderung aktuell noch ein relevantes Umweltthema? Ja, aber die Situation hat sich seit Mitte der 1980er Jahre deutlich verbessert. Aus heutiger Sicht muss neben den immer noch zu hohen atmosphärischen Säureeinträgen auch die Versauerung durch Ernte in der Forstwirtschaft stärker beachtet werden.

Die atmosphärischen Säureeinträge durch nasse Deposition haben sich in Baden-Württemberg in den letzten 25 Jahren von 2,0 auf 1,0 kmol<sub>c</sub>/ha a halbiert (Abb 4.1-2). Dieser Rückgang wurde im Wesentlichen durch die Emissionsminderung bei SO<sub>2</sub> ermöglicht (Abb. 4.1-1). Die atmosphärischen Säureeinträge sind zur Zeit maßgeblich verursacht durch NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> Emissionen und zu über 90 % anthropogen [vgl. BUWAL 1996]. Dass die aktuellen Stickstoffeinträge tatsächlich weitgehend anthropogen sind, kann durch überschlägige Bilanzen der Emissionen und Depositionen in Baden-Württemberg belegt werden [UMEG 2004b].

Hohe Niederschläge bedeuten hohe Auswaschung von Säuren aus der Atmosphäre und den Böden und damit periodische Säureschübe. In Trockenjahren kommt es daher zu unterdurchschnittlichen Säureeinträgen. Dies findet in Baden-Württemberg alle 5 bis 7 Jahre statt. Die atmosphärischen Säureeinträge sind in den von Natur aus sauren Gebieten im Schwarzwald, Odenwald und Teilen des Keuperberglandes besonders spürbar.

Die zweite, stellenweise ebenso wichtige Ursache der anthropogenen Versauerung ist die Landnutzung. Die Entnahme von Erntegütern wirkt grundsätzlich versauernd.

## 6.2 Die Bodenversauerung ist bei forstlicher Nutzung von Bedeutung

Wie ist die Versauerungssituation im Boden allgemein? Wie sind Acker-, Grünland- und Waldstandorte zu bewerten? In Lösslehm- und Kalksteingebieten – wie etwa dem Kraichgau, der schwäbischen Alb und großen Teilen des Oberrheingrabens – wird die anthropogene Entkalkung und Versauerung der Böden auch über Jahrhunderte keine Bedeutung haben. Nur in den Gebieten mit Böden aus Graniten, Gneisen, Sandstein und Sanden – das sind 20 % der Landesfläche – wirkt die anthropogene Versauerung.

Ackerböden werden auf Jahrhunderte unkritisch bleiben. Hier wird der Bodenversauerung seit langem durch Kalkung entgegengewirkt. Wenn Grünlandstandorte auf pufferarmen Gesteinen auf extensive Bewirtschaftung umgestellt werden, kann dies zu merklichen pH-Abnahmen führen, da die Kalkung entfällt und durch Ernteentzug basische Nährstoffe entzogen werden. In den versauerungssensitiven Gebieten bleibt diese Entwicklung weiter zu beobachten.

Von größerer Bedeutung ist die Bodenversauerung auf pufferarmen Ausgangsgesteinen, wenn dort eine forstliche Nutzung stattfindet. In der Forstwirtschaft führt die Entnahme von Holz, insbesondere wenn die Rinde nicht im Wald verbleibt und nicht gekalkt wird, zu einer zusätzlichen Bodenversauerung in der Größenordnung von bis zu 1,0 kmol<sub>c</sub>/ha a und kann bei Kahlschlägen bis zu 2,0 kmol<sub>c</sub>/ha a führen [vgl. LfU 1997, v. Wilpert 2008].

In Baden-Württemberg sind 600.000 ha Waldfläche betroffen. Das sind 16 % der Landesfläche. Hier addieren sich die Effekte von atmosphärischen Säureeinträgen und nutzungsbedingter, bodeninterner Säurebildung. Ein Schritt zur Verminderung der Bodenversauerung ist der Waldumbau in Richtung Mischwälder, der häufig aber nur in Kombination mit einer Kalkung gelingen kann (siehe Kap. 6.7). Durch den Waldumbau wird die systeminterne Säurebelastung der Böden reduziert, indem aufgrund verbesserter Nährstoffbedingungen weniger organische Säuren gebildet bzw. diese schneller mikrobiologisch abgebaut

werden. Zu einer Minderung der Säurebelastung führt die Rückführung von Ästen, Rinden und Holzaschen in den Wald, weil dadurch Nährkationen wieder auf die Böden gelangen. Kahlschläge wirken sich über die Mineralisierung der im Boden verbleibenden organischen Substanz besonders negativ aus. Selbst eine moderate Holzentnahme führt ganz automatisch zur Versauerung.

### **6.3 Anthropogen versauerte Grundwässer treten vereinzelt auf**

Wie ist die Versauerungssituation im Quell- und Grundwasser allgemein? Gibt es Handlungsbedarf für die Trinkwasserversorgung? Die Grundwasserversauerung ist in Baden-Württemberg kein Problem in der Gesamtfläche. Nur in den Gebieten mit von Natur aus pufferarmen Gesteinen im Schwarz- und Odenwald - das sind 20 % der Landesfläche - treten natürlich saure und anthropogen verstärkt versauerte Grundwässer mit pH-Werten  $< 6,5$  auf. In diesen Gebieten wurde an oberflächennahen Quellen eine Stabilisierung der Versauerungssituation beobachtet. Seit dem Beginn zeitlich hochauflösender pH-Wertmessungen Mitte der 1990er Jahre sind erheblich seltener oder keine pH-Wert-Absenkungen zu beobachten. Allerdings zeigt der langfristige pH-Trend im Quellwasser keine deutliche Tendenz (hier seit den 1960er Jahren).

Rohwasser mit pH-Werten kleiner pH 6,5 darf nicht an den Verbraucher abgegeben werden, da saures Wasser aus dem Grundwasserleiter oder aus den Wasserleitungen Schwermetalle lösen kann und damit die Gesundheit der Verbraucher gefährdet werden kann. Für die Trinkwassernutzung ist in den natürlich versauerten und anthropogen verstärkt versauerten Gebieten eine Rohwasseraufbereitung in Form der Entsäuerung notwendig (Vorgabe der Trinkwasserverordnung), wie es schon seit Jahrzehnten praktiziert wird. In 2004 wurde das Rohwasser in Baden-Württemberg an 12 % aller Wasserwerke zumindest teilweise entsäuert. Hierunter befinden sich hauptsächlich Wasserversorgungen im Schwarz- und Odenwald. Von 291 Gemeinden auf den pufferarmen Gesteinen in Schwarzwald und Odenwald muss in 154 Gemeinden (52 %) das Rohwasser entsäuert werden, d.h. auf 526.000 ha.

Derzeit lässt sich schwer einschätzen, welche Bedeutung die anthropogene Versauerung für den Zustand der schon

natürlich sauren Quell- und Grundwässer heute noch hat. Sicher ist, dass von der anthropogenen Versauerung die Rohwässer aus oberflächennah gespeisten Quellen besonders betroffen sind, da diese temporär auf Niederschläge reagieren. Das betrifft die Wasserversorgungen von etwa jeder 5ten bis 10ten Gemeinde im Schwarzwald und Odenwald, bei denen mindestens einmalig pH  $< 5,6$  bzw. pH  $< 6,0$  gemessen wurde. Es ist zu erwarten, dass sich die weitere Minderung der atmosphärischen Säureeinträge an diesen Quellen positiv auswirken wird. Jedoch wird hier trotz erwarteter zukünftiger Verbesserungen die technische Entsäuerung weiterhin unumgänglich sein, da hier die natürliche Versauerung der stärkere Einflussfaktor ist.

### **6.4 Die Qualität der Lebensräume hat sich verbessert**

Wie wirkt sich die Versauerungssituation auf die Lebensräume aus? Sind hier noch Verbesserungen möglich? Die Lebensbedingungen für Pflanzen und Tiere werden durch komplexe Wirkungszusammenhänge bestimmt. Die Versauerung ist dabei nur ein Umweltfaktor. Mit den folgenden fünf Indikatororganismen und -gruppen werden versauerungsbedingte Veränderungen der Lebensräume dokumentiert.

#### ■ Flechten

Die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* signalisiert bei alleinigem Vorkommen eine extrem hohe Belastung mit  $\text{SO}_2$ . Landesweit ist ihr Anteil seit 1985 rückläufig. Die Flechtenkartierung zeigt dabei, dass der nordwestliche Teil von Baden-Württemberg nach wie vor stärker von sauren Immissionen geprägt ist als der südliche Landesteil.

#### ■ Bachforelle

Sieben von acht untersuchten Bächen in den versauerungssensitiven Gebieten weisen heute eine höhere Bachforellendichte und / oder eine bessere Altersstruktur auf als in den Jahren bis 1995. Ein Überleben der Bachforelle scheint in diesen Bächen gesichert zu sein.

#### ■ Amphibien

Die versauerungsbedingten Laichschäden und Schäden in den Anfangsstadien der Amphibienentwicklung hat sich an fast allen untersuchten Schwarzwaldseen seit Mitte der 1990er Jahre zum Teil deutlich verbessert. Allerdings wurden bislang keine Erweiterung des Artenspektrums festgestellt [GEBHARDT 2007]. Ob dies versauerungsbedingt ist oder andere Gründe hat kann derzeit nicht beurteilt werden.

■ Makrozoobenthos

Die Lebensgemeinschaft des Makrozoobenthos weist beim Vergleich der Jahre 1995 und 2007 eine Zunahme säureempfindlicher Arten auf und deutet somit auf eine Verminderung der Säurebelastung der Fließgewässer hin.

■ Regenwurm

Abnehmende Schwermetallgehalte (z.B. Blei, Cadmium, Zink) in der Regenwurmart *Lumbricus rubellus* seit den 1980er Jahre belegen die Verbesserung des Lebensraumes für Regenwürmer in Böden unter Wald.

Versauerungsbedingte Veränderungen der Lebensräume sind in Baden-Württemberg heute sicher kein Problem in der Fläche mehr. Das belegt der Zustand der Flechten. Aber betroffen bleiben potentiell – wie auch bei der Boden- und Grundwasserbeschaffenheit – alle Areale mit sauren Gesteinen unter Wald (16 % der Landesfläche).

Für die Pflanzen und Tiere, die sich teilweise an das von Natur aus saure Milieu gut angepasst haben, sind die Lebensbedingungen im Einzugsgebiet der Bachoberläufe des Schwarzwaldes und Odenwalds immer noch anfällig gegenüber Versauerungsschüben in Folge von Starkniederschlägen und Schneeschmelze.

**6.5 Im Nordschwarzwald und im Odenwald sind Verbesserungen möglich**

Wie ist die Versauerungssituation in den von Natur aus versauerten Gebieten von Baden-Württemberg? Der Nordschwarzwald und der Odenwald sind die Gebiete mit den geringsten Pufferkapazitäten gegen Säureinträge und zugleich die Gebiete, in denen sich die Versauerungssituation in den letzten drei Dekaden am deutlichsten verbessert hat (Tab. 6.5-1). Die Schädigungsraten des Amphibienlaichs haben sich in Gewässern des Nordschwarzwaldes und des Odenwaldes, die einen mittleren pH-Wert <5,5 aufweisen, deutlich verringert, zum Teil halbiert [GEBHARDT 2007]. Im Nordschwarzwald und Odenwald hat an oberflächennahen Quellen seit Mitte der 1980er bzw. 1990er Jahre die Häufigkeit niedriger pH-Werte abgenommen. Nordschwarzwald und Odenwald sind auch die Gebiete, in denen durch Emissionsminderung noch Verbesserungen der Lebensbedingungen von Tieren und Pflanzen sowie der Quell- und Oberflächenwasserbeschaffenheit zu erwarten sind.

Tab. 6.5-1: Zustand und Trend der Versauerung in pufferarmen Gebieten Baden-Württembergs (Details siehe Kapitel 5)

	Natürliche Säurepufferkapazität	Landnutzungseinfluss	Trend der Versauerung seit den 1980er Jahren			Verbesserungspotential
			Säureinträge	Organismen	Gewässer	
Odenwald	---	--	++	+	+	++
Nördlicher Schwarzwald	---	--	++	+	+	++
Mittlerer Schwarzwald	--	-	++	[0]	+	+
Südlicher Schwarzwald	-	-	++	[0]	+	+
Keuperbergland	[-]	[-]	++	[0]	[0]	[+]

Legende:  
 Natürliche Säurepufferkapazität: --- sehr geringe, -- geringe, - geringe bis mittlere Säurepufferkapazität, [-] uneinheitlich  
 Landnutzungseinfluss: -- sehr negativ (z.B. wegen hohem Nadelwaldanteil), - negativ, [-] uneinheitlich  
 Trend Säureinträge: ++ Säureinträge haben stark abgenommen  
 Trend Organismen: + einzelne empfindliche Organismengruppen haben sich erholt, [0] wenig Beobachtungen verfügbar  
 Trend Gewässer: +Häufigkeit niedriger pH-Werte abgenommen, [0] wenig Beobachtungen verfügbar  
 Verbesserungspotential: ++ Verbesserungen möglich, + wenig Verbesserungen möglich, [+] uneinheitlich

Im Hochschwarzwald kann im Vergleich zum Nord-schwarzwald keine größere Verbesserung durch Minderung der anthropogenen Säureinträge erreicht werden, weil die Pufferkapazität des bodenbildenden Ausgangssubstrates vergleichsweise groß ist.

Eine Aussage für das Keuperbergland ist schwierig, da das Bodenmuster hier kleinräumig variiert. Es ist nicht auszuschließen, dass hier kleinräumig – nicht untersuchte – Effekte der anthropogenen Versauerung vorhanden sind.

In allen von Natur aus versauerten Gebieten mit forstlicher Nutzung bleibt die Notwendigkeit der Erhaltungskalkung zur Sicherung der vielfältigen Funktionen des Waldes auch unabhängig von den atmosphärischen Säureinträgen bestehen (vgl. Kap. 6.7).

## 6.6 Globale Emissionen beeinflussen die Situation im Land

Welche Anforderungen an die Emissionsminderung in Baden-Württemberg ergeben sich aus internationaler Sicht? Für alle Europäischen Mitgliedsstaaten sind für das Jahr 2010 nationale Höchstmengen für die Emissionen an  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  festgelegt (sog. NEC-RL 2001/81/EG) und müssen anteilmäßig auch von Baden-Württemberg umgesetzt werden. In diesem Kontext hat die Bundesrepublik Deutschland – relativ zur Wirtschaftsleistung – bereits einen großen Beitrag zur Emissionsminderung bei  $\text{SO}_2$  geleistet. Die Bundesrepublik bleibt jedoch Spitzenreiter in der EU bei den  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen.

Vor einigen Jahren ruhte das Hauptaugenmerk für Emissionsminderungen auf den südlichen und östlichen Mitgliedsstaaten der EU. Im kommenden Jahrzehnt werden die Emissionen der BRIC-Staaten Brasilien, Russland, Indien und China in den Vordergrund treten, weil deren Wirtschaftswachstum den atmosphärischen Säureimport nach Baden-Württemberg verstärkt.

## 6.7 Maßnahmen gegen die Versauerung können auch negative Folgen haben

Was muss bei der Planung zukünftiger Maßnahmen gegen die Versauerung beachtet werden? Welches sind die Minderungsziele in Baden-Württemberg? Maßnahmen gegen die Versauerung sind mit positiven und auch negativen Folgen für Mensch und Umwelt verknüpft. Das zeigen die folgenden Beispiele:

### ■ Kalkung

Nachhaltige Waldwirtschaft ohne Kalkung ist kaum möglich. Und so wird in Baden-Württemberg seit Beginn der 1980er Jahre jährlich auf rund 14.000 ha gekalkt. Positiv für die Umweltbilanz ist hierbei die Produktionssteigerung bei Holz als nachwachsendem Rohstoff und als Form regenerativer Energie. Dem steht die Gefahr möglicher Schwermetalleinträge, Humusabbau, Stickstoffauswaschung in das Grundwasser und  $\text{CO}_2$ -Freisetzung in die Atmosphäre sowie die Wirkungen des Kalkes auf Organismen auf der Negativseite der Bilanz gegenüber.

### ■ Emissionsminderung

Auf der Positivseite einer Emissionsminderung z. B. für Stickstoff steht, dass sowohl der Säure- als auch der Nährstoffeintrag in naturnahe Lebensräume und Gewässer vermindert werden. Positiv auf die Gesundheit wirkt sich die Reduktion sekundärer anorganischer Aerosole (Feinstäube) in der Atmosphäre aus. Auf der Negativseite steht der hierzu technisch notwendige Energie- und Rohstoffeinsatz.

Die Beispiele zeigen, dass eine Abwägung der Vor- und Nachteile einer Minderungsmaßnahme im Sinne einer Umweltbilanz erforderlich ist, denn allgemein steigen die Minderungskosten mit dem Grad der schon erreichten Minderung. Entsprechende Arbeiten zur objektiven Beurteilung von Maßnahmen wurden national und international aufgenommen [vgl. UBA 2008]. Klare Empfehlungen gibt es jedoch noch nicht.

Zwischenzeitlich werden Maßnahmen gegen die Versauerung dadurch ergriffen, dass z.B. die Emission an  $\text{NO}_x$  zum Schutze der menschlichen Gesundheit noch weiter reduziert werden muss. Auch in der Landwirtschaft wird

versucht, die  $\text{NH}_3$ -Emissionen durch verbesserte Herstellungs-, Lager- und Ausbringungstechniken weiter zu reduzieren. Der Waldumbau Richtung Mischwälder zur Erhaltung und Verbesserung des Produktionspotentials ist angepackt, ebenso wie die oben genannten Kompensationskalkungen in den besonders versauerten Gebieten.

Minderungsziele in Baden-Württemberg betreffen die Bereiche Emissionsminderung und forstwirtschaftliche Nutzung gemeinsam. Für die Summe der atmosphärischen und nutzungsbedingten Säurebelastung im Schwarzwald, Odenwald und Teilen des Keuperberglandes könnte sich nach Einschätzung der LUBW ein Wert um  $1 \text{ kmol}_c/\text{ha}$  Jahr als praktikabler Kompromiss erweisen.

## **6.8 Die Aktualisierung des Berichtes erfolgt durch kurze Fachbeiträge**

Wie geht es weiter? Die Auswertungen haben die Wechselwirkungen zwischen den Umweltmedien und den Bedarf für die Beobachtung der weiteren Entwicklung aufgezeigt. Die künftige Dokumentation des Versauerungszustandes soll durch kurze Fachbeiträge im Fachdokumentendienst (FADO) der LUBW erfolgen. Bei den kurzen Fachbeiträgen soll der Fokus auf ausgewählte Einzugsgebiete im Nordschwarzwald und im Odenwald gelegt und die Verknüpfung der biotischen und abiotischen Umweltbeobachtung weiter optimiert werden. Über das Internet sind die Berichte abrufbar:

[www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de) >

Umweltbeobachtung > Stoffhaushalt und Umwelt >

Versauerung

## 7 Literatur

- ALLES, E. (1995): Beispiele für charakteristische Diatomegesellschaften in Schwarzwaldbächen bei unterschiedlichen Säure- und Versauerungsstufen.- in: UM [Hrsg.] (1995), S149-177, Stuttgart.
- BÖHMER, J. (2002): Untersuchungen des Säurezustandes von Stillgewässern des Schwarzwaldes und des Odenwaldes mittels Bioindikatoren (Amphibien).- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), Karlsruhe.
- BÖHMER, J. & H. RAHMANN (1992): Gewässerversauerung - Limnologische Untersuchungen zur Versauerung stehender Gewässer im Nordschwarzwald unter besonderer Berücksichtigung der Amphibienfauna.- 231 S., Ecomed, Landsberg.
- BRAUKMANN, U. (1995): Biologische und chemische Untersuchungen zur Gewässerversauerung in Baden-Württemberg.- in: UM [Hrsg.] (1995), S205-224, Stuttgart.
- BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1996): Luftschadstoff-Emissionen aus natürlichen Quellen in der Schweiz.- Schriftenreihe Umwelt NR. 257, Luft, Bern.
- GEBHARDT, H., LINNENBACH, M., MARTHALER, R., NESS, A., RAPP, N. & H. SEGNER (1990): Untersuchungen zur Auswirkung von Gewässerversauerungserscheinungen auf Fische und Amphibien sowie Erarbeitung einschlägiger Bioindikationsverfahren.- Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 10204348/01/02 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.
- GEBHARDT, H. (1995): Ökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg - Auswirkungen der Gewässerversauerung auf Fische in Fließgewässern.- In: UM [Hrsg.] (1995), S251-282, Stuttgart.
- GEBHARDT, H. (2007): Gewässerversauerung und Amphibien.- In: LAUFER, FRITZ & SOWIG [Hrsg.] (2007), S. 124-131, Stuttgart.
- IUS Institut für Umweltstudien (2000): Untersuchungen zur Fischfauna im Rahmen des Ökologischen Wirkungskatasters Baden-Württemberg.- Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), Karlsruhe.
- IUS Institut für Umweltstudien (2006): Untersuchungen zur Fischfauna im Rahmen des Ökologischen Wirkungskatasters Baden-Württemberg.- Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), Karlsruhe.
- LAUFER, H., FRITZ, K. & P. SOWIG [Hrsg.] (2007): Die Amphibien und Reptilien in Baden-Württemberg.- Ulmer, 807 S., Stuttgart.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz [Hrsg.] (1991): Die Fischfauna der Bäche des Odenwaldes.- Ökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg, Sonderbericht 1, Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), 201 S., Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz [Hrsg.] (1992a): Bioindikationsverfahren zur Gewässerversauerung - Literaturstudie zur Erarbeitung von Bioindikationsverfahren zur Gewässerversauerung.- Projekt "Angewandte Ökologie" Band 3, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), 194 S., Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz [Hrsg.] (1992b): Die Fischfauna der Bäche des Nordschwarzwaldes.- Ökologisches Wirkungskataster Baden-Württemberg, Sonderbericht 3, <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (Bezug in Vorbereitung), 223 S., Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (1994): Auswirkungen saurer Niederschläge auf Böden und Gewässer - Kurzbericht.- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de> (in Vorbereitung), 17 S., Karlsruhe

- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (1996): Bodenversauerung Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen (Literaturstudie).- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/20059/>, 191 S., Karlsruhe
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (1998): Gewässergütekarte Baden - Württemberg.- Gewässerökologie Nr. 49, Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003.- Reihe Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, Nr 85, 36 S., Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz (2005a): Signale aus der Natur.- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/> ID Umweltbeobachtung U92-M3-J05, 68 S., Karlsruhe.
- LfU Landesanstalt für Umweltschutz [Hrg.] (2005b): Informationssystem KLARA - Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung - Analysen spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen im Land Baden-Württemberg.- Bearbeitung Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung PIK, CD-ROM, Karlsruhe.
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (2006): Schwermetalle in Regenwürmern Baden-Württembergs. - <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/> ID Umweltbeobachtung U74-M315-J00, Karlsruhe.
- RAHTKENS, K. & K.T. v.d.TRENCK (2006): Schwermetalle in Regenwürmern Baden-Württembergs. Teil I: Metallgehalte in Regenwürmern von Wald-Dauerbeobachtungsflächen. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox., S. 164-174, Landsberg.
- UBA Umweltbundesamt (2008): Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoff-Emissionsminderungsstrategie – September 2008.- Dessau, 104 S., <http://www.umweltbundesamt.de/luft/downloads/emissionen/hg-stickstoffemissionsminderungsstrategie.pdf>, Dessau/Berlin.
- UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (2003): Säurebilanzmodellansatz Baden-Württemberg.- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/> ID Umweltbeobachtung U26-S1-N03, Karlsruhe.
- UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (2004a): Bilanzbericht Bruchsal 2003.- Ergebnisse vom Intensiv-Monitoring Bruchsal-Forst. <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/> ID Umweltbeobachtung U93-M111-J02, Karlsruhe.
- UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (2004b): Stickstoffbilanz Baden-Württemberg.- Stand Mai 2004.- <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/> ID Umweltbeobachtung U93-S7, Karlsruhe.
- UM Umweltministerium Baden-Württemberg [Hrg.] (1995): Saurer Regen - Probleme für Wasser, Boden und Organismen.- Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg, Ecomed, 302 S., Landsberg.
- UM Umweltministerium (2007): Stellungnahme zur Landtagsanfrage Drucksache 14/2023 vom 13.12.2007.- [www.landtag-bw.de](http://www.landtag-bw.de), 25S., Stuttgart.
- UNECE United Nations Economic Commission for Europe (2009): ICP Modelling and Mapping - International Cooperative Programme on Modelling and Mapping of Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends.- Internetseite <http://www.unece.org/env/lrtap/WorkingGroups/wge/mapping.htm>
- UVM Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg [Hrg.] (2004): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, Zweite Auflage, 2 CD-ROM, Stuttgart.
- v. WILPERT, K. (2008): Waldbauliche Steuerungsmöglichkeiten des Stoffhaushalts von Waldökosystemen – am Beispiel von Buchen- und Fichtenvarianten der Conventwald-Fallstudie.- Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung – Band 40, 230 S., Freiburg.
- Wirth V. (1993): Trendwende bei der Ausbreitung der anthropogen geförderten Flechte *Lecanora Conizaeoides*. Phytocoenologia 23, S. 625-636, Berlin-Stuttgart.

