

# Geographisch-geologische Standortaspekte der Gewässerversauerung in Bayern

Reinhold Lehmann

## 1. Einleitung

Seit dem Beginn der 80er Jahre wird in der Bundesrepublik Deutschland die Versauerung von Grund- und Oberflächengewässern im Zusammenhang mit den Emissionsbelastungen durch säurebildende Luftschadstoffe gesehen und näher untersucht (Umweltbundesamt, 1984).

Die Gewässer können sowohl durch natürliche Prozesse in der Bio- und Geosphäre als auch durch die Deposition von Säuren und säurebildenden Luftschadstoffen aus anthropogenen Quellen versauern.

Unter Versauerung wird nach der Definition des ad hoc Arbeitskreises „Gewässerversauerung“ (Umweltbundesamt, 1987) „die Veränderung der Gewässerbeschaffenheit verstanden, die als Folge des Verlustes an Pufferkapazität im Einzugsgebiet auftreten. Sie führen im Ergebnis zu einer Zunahme der freien und gebundenen Säuren im Wasser“ Dabei ist es jedoch schwierig, zwischen vom Menschen verursachter und natürlicher Versauerung zu unterscheiden. Nach Berechnungen von ULRICH & BÜTTNER (1985) werden allein durch die Emission von Stickstoff- und Schwefelverbindungen auf die Fläche der Bundesrepublik Deutschland im Durchschnitt seit 25 Jahren etwa siebenmal mehr an Säurefracht pro ha und Jahr deponiert, als natürlicherweise durch die Silikatverwitterung, die in basenarmen und pufferungsschwachen Gebieten vorherrscht, neutralisiert werden kann (Abb. 1).

Die Erfassung solcher Gebiete, die aufgrund ihrer geringen Pufferkapazität zu einer Gewässerversauerung neigen, das räumliche und zeitliche Auftreten, sowie die Mechanismen, die zu einer Aufhebung der Versauerung führen, waren in dem Forschungsvorhaben der Bayerischen Landesanstalt für Wasserforschung, das vom Umweltbundesamt gefördert wurde, vordringlichstes Ziel (vgl. BAUER et al., 1988). Aus diesen Kartierungen, die für die gesamte Bundesrepublik Deutschland durchgeführt wurden (LEHMANN & SCHMITT, 1987) und nur einen Teilaspekt des gesamten Forschungsvorhabens darstellen, werden die Ergebnisse für Bayern gesondert vorgestellt.

## 2. Kartographische Erfassung von schwach gepufferten Räumen in Bayern

Da eine Erfassung der Gewässerversauerung in der Praxis nur punktweise und diskontinuierlich erfolgen kann, liegt es nahe, nach einer Form der Darstellung zu suchen, die es erlaubt, Aussagen über das vorhandene Gefährdungspotential zu machen. Hierfür wurde ein Konzept entwickelt (Abb. 2), das kartographisch auf der Grundlage der Karbonatgehalte der Gesteine und der Basen-

versorgung der Böden, Gebiete bzw. Landschaften erfaßt, die geogen potentiell zu einer Gewässerversauerung neigen.

### 2.1 Pufferungsvermögen der anstehenden Gesteine in Bayern

Neben dem Boden spielt das anstehende Gestein eine entscheidende Rolle für die Abpufferung von Säureeinträgen. Für die Pufferkapazität des Gesteins ist vor allem die mineralische Zusammensetzung, die Durchlässigkeit (Kontaktzeit) sowie die Verwitterungsstabilität von Bedeutung. Hierbei ist der Karbonatgehalt der wichtigste Faktor. Gesteine und Lockersedimente wurden deshalb in drei Gruppen eingeteilt, die der entsprechenden Kartenlegende in Abb. 3 zu entnehmen sind.

Aufgrund der Maßstabsvorgabe von 1 : 2 000 000, war eine generalisierte Darstellung des Karteninhalts unumgänglich. Bei kleinräumig starkem Wechsel in der Geologie erfolgte die Einstufung der Gesteine durch einen Mittelwert. Ebenso mußte berücksichtigt werden, daß aufgrund unterschiedlicher Bildungsbedingungen Gesteinsarten gleichen geologischen Alters verschiedene Karbonatgehalte aufweisen können.

#### 2.1.1 Regionale Übersicht

*Karbonatreich* sind z. B. die Kalkalpen (Kalk, Dolomit), Alpenvorland, Teile des Jura, die Landschaften des Muschelkalks, die glazialen und fluviatilen Ablagerungen.

*Karbonathaltig* sind Molasse, Flysch, Iller-Lechplatte, Tertiärhügelland mit ihren äolischen Auflagen (Löß) ebenso wie die nördliche Gipskeuper- und südliche Fränkische Platte (überwiegend Ton- und Mergelgesteine mit Lößüberlagerungen), Steigerwald und Frankenhöhen, bestehend aus Gipskeuper (überwiegend Tonstein). Karbonathaltig sind z. B. auch die vorwiegend aus Ton- und Sandsteinen bestehenden Gesteine des mittleren und oberen Keupers sowie des Lias, die sich wie ein Gürtel um den karbonatreichen Dogger und Malm legen. Dieser Gürtel setzt sich in der Oberkreide, die bis in die Bodenwöhrer Bucht reicht, fort.

Noch als karbonathaltig wurden der obere Buntsandstein des Spessarts und Odenwalds eingestuft.

*Karbonatfrei bis karbonatarm* ist das Mittelfränkische Becken mit seinen Keupersandsteinen oder der mittlere und untere Buntsandstein des Spessart. Im Frankenwald, der überwiegend aus sauren Schiefen, Grauwacken und Diabasen besteht, treten vereinzelt auch Kalkgesteine auf. In den Grenzgebieten nach Thüringen werden z. T. pyritreiche Griffelschiefer abgebaut, die bei der

Verwitterung saure, sulfatreiche Wässer hervorgerufen. Insgesamt besteht der Frankenwald aus karbonatarmen Gesteinen.

Karbonatarm eingestuft wurde auch das Fichtelgebirge, das vorwiegend aus Graniten, Gneisen, Phylliten, Grauwacken, Quarziten und Basalt besteht (im südlichen Fichtelgebirge sind darin Kalksilikate- und Marmore eingeschaltet) und der Oberpfälzer- und Bayerische Wald mit seinen Gneisen, Graniten, Schiefen und Metabasiten. Im Hinblick auf die Gewässerversauerung ist die Verbreitung der jüngeren Granite, die vor allem im Fichtelgebirge und der nördlichen Oberpfalz vorkommen, von Bedeutung, da diese kieselsäurereicher und basenärmer sind als die älteren Granite.

## 2.2 Pufferungsvermögen der Böden aufgrund ihrer Basenversorgung in Bayern

Um das Pufferungsvermögen bzw. die Sensibilität der Böden gegenüber dem Eintrag von versauernd wirkenden Luftschadstoffen beurteilen zu können, ist das Kriterium Basenversorgung herangezogen worden, das als einziger pedologischer Faktor flächenmäßig für die Bodengesellschaften der gesamten Bundesrepublik Deutschland vorliegt.

Die Basenversorgung beruht auf dem natürlichen geogenen, durch die Verwitterung bestimmten Nachlieferungsvermögen der Pflanzennährstoffe, insbesondere der basisch wirkenden Hauptnährelemente Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium (ROESCHMANN, 1978/79). Sie gibt einen Hinweis auf den durchschnittlichen Basengehalt eines Bodens, der sich aus Bodenart, Humusgehalt, Kationenaustauschkapazität und Basensättigung abschätzen läßt. Die verschiedenen Bodengesellschaften wurden in vier Gruppen eingeteilt und sind der entsprechenden Legende der Abb. 3 zu entnehmen.

### 2.2.1 Regionale Übersicht

Auf den sauren wenig basenreichen ostbayerischen Gesteinen haben sich aufgrund der unterschiedlichen Oro- und Topographie, der klimamorphologischen Prozesse (z. B. Vereisung, Solifluktionserscheinungen) etc. differenzierte Böden mit geringer Basenversorgung entwickelt, wie z. B. lehmig-sandige bis lehmig-steinig-grusige z. T. podsolige Braunerden.

Dagegen entstanden beispielsweise auf den Basalten zwischen Marktredwitz und Mitterteich mittel bis gut basenversorgte Braunerden. Ähnlich wie in Ostbayern sind die Verhältnisse im Spessart und Odenwald. Hier finden sich auf den sauren bzw. basenarmen Sandsteinen entsprechend schlecht basenversorgte Braunerden. Ähnliches gilt auch für die Teile des oberen und mittleren Keupers, die sich vornehmlich aus basenarmen Ton- und Sandsteinen zusammensetzen und örtlichen Überlagerungen von Flug- und Decksanden. Auf dem Gipskeuper dagegen sind aufgrund des Ausgangsmaterials gut basenversorgte Böden zu finden.

Die Böden des Muschelkalks, unteren Keupers, Malms etc., die stark kalk- und dolomitreich sind, wurden von der Basenversorgung her als gut eingestuft.

## 2.3 Zur Gewässerversauerung neigende Gebiete in Bayern

Die Abb. 2 gibt den Entwicklungsprozeß der zur Karte der „zur Gewässerversauerung neigenden Gebiete in Bayern“ führt (Abb. 4), vereinfacht wieder. Diese komplexe thematische Karte und ihre Gefährdungsabstufungen (siehe Kartenlegende) stellen eine Synthese aus den beiden geogenen Karten der Abb. 3, unter Berücksichtigung der Landnutzung und des Gewässersystems, dar. Dem Boden wurde hierbei Priorität zuerkannt, da er bei oberflächennahem Abfluß den Chemismus des Wassers entscheidend mitbestimmt.

Die Abb. 4 weist somit Räume aus, die infolge der geogenen Gegebenheiten auf den Eintrag von versauernd wirkenden Luftschadstoffen empfindlich reagieren. Die weiß belassenen Bereiche sind somit hinsichtlich einer Gewässerversauerung nicht gefährdet.

In *farbigen Halbtönen* werden Regionen dargestellt, die von ihrer natürlichen geogenen Situation her unterschiedlich stark gefährdet sind, jedoch sekundär abpuffernd wirkenden Einflüssen, wie Besiedlung und Landnutzung, unterliegen. Diese Einflüsse werden noch an einem Beispiel aus dem nordostbayerischen Raum detaillierter beschrieben.

In entsprechenden *Volltönen* sind die am stärksten gefährdeten Wald- und Moorgebiete hervorgehoben. Daraus wird ersichtlich, daß das Auftreten saurer Gewässer meist auf die siedlungsfernen, bewaldeten Höhen der Mittelgebirge und kalkarmen Moore begrenzt ist.

Die Abgrenzungen der Flächen mit Halb- und Volltönen sind allein schon aufgrund der meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse nicht scharf, sondern fließend.

Bei der Erstellung dieser Karte konnte aufgrund des heutigen Wissenstandes nicht zwischen Gebieten mit natürlich sauren Gewässern und Gebieten, in denen eine Gewässerversauerung erst im Zuge der anthropogen bedingten Deposition von säurebildenden Luftschadstoffen eingetreten ist, unterschieden werden.

## 3. Stand der pH-Wert-Situation in den Oberflächengewässern Bayerns

### 3.1 Indikatoren für eine Gewässerversauerung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Gewässerversauerung zu erfassen. Außer den physikalisch-chemischen Bestimmungsmethoden, die die Verhältnisse im Wasser zu einem bestimmten Zeitpunkt wiedergeben, können biologisch und/oder fischereipathologische Untersuchungen die Auswirkungen auf die verschiedenen Lebensgemeinschaften im Bach über längere Zeiträume wiedergeben. Mit paläolimnologischen Untersuchungsmethoden können anhand von Seesedimentkernen die Trends über Jahrtausende beobachtet werden.

Ein sehr wesentlicher Indikator der Gewässerversauerung ist der pH-Wert, der von entscheidender Bedeutung für den Chemismus und die Biozöosen in den Gewässern ist. Je nach Jahres- oder Tageszeit kann der pH-Wert, d. h. die Säurekonzentration, stark schwanken, wobei die Schwankungen in pufferungsschwachen Räumen bzw.

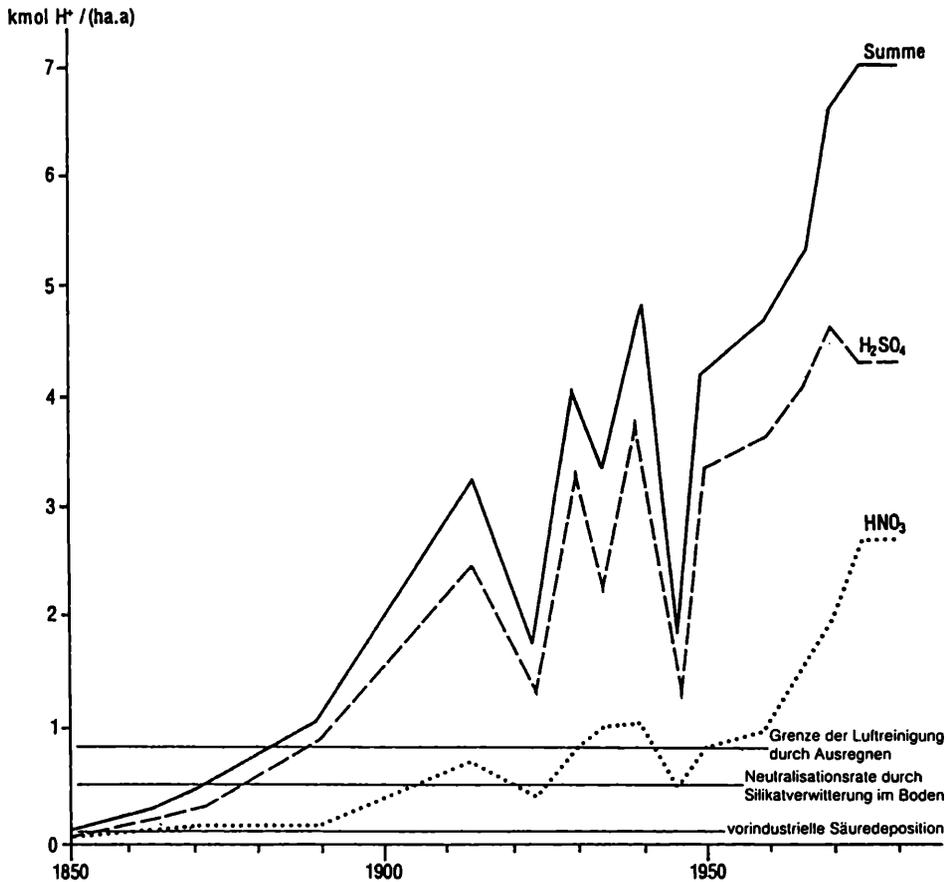


Abbildung 1

Säure-Emission (SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>) in der Bundesrepublik Deutschland seit 1850, ausgedrückt in kmol H<sup>+</sup> pro ha und Jahr.  
Quelle: ULRICH & BÜTTNER, 1985

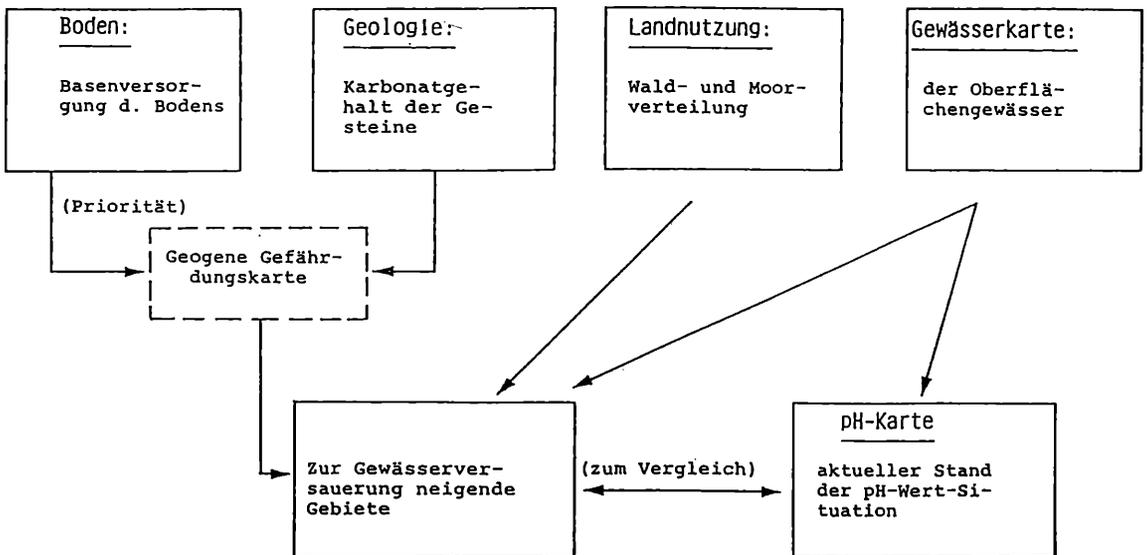


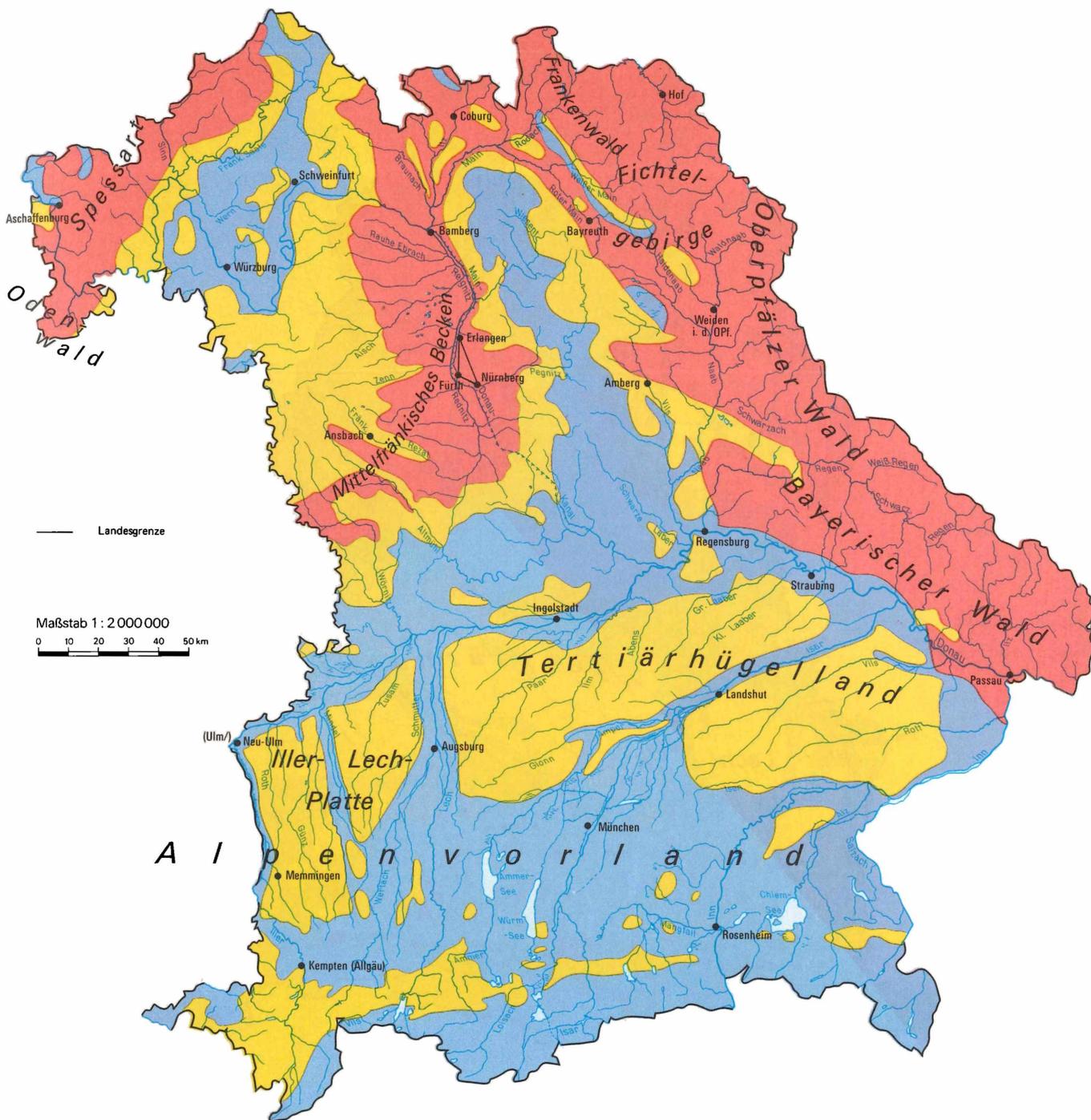
Abbildung 2

Vereinfachte Darstellung der Entstehung der Karte „zur Gewässerversauerung neigende Gebiete in Bayern“

Abbildung 3a

**Pufferungsvermögen der anstehenden Gesteine**

aufgrund ihres Karbonatgehalts



Karbonatgehalt des Gesteins:



• Oberzentrum/mögliches Oberzentrum

Zentrale Doppel- und Mehrfachorte sind durch Linien verbunden (nach Ministerkonferenz für Raumordnung)

Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland Umweltbundesamt Berlin, September 1987

Grundkarte: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Boppard 1978 und 1979

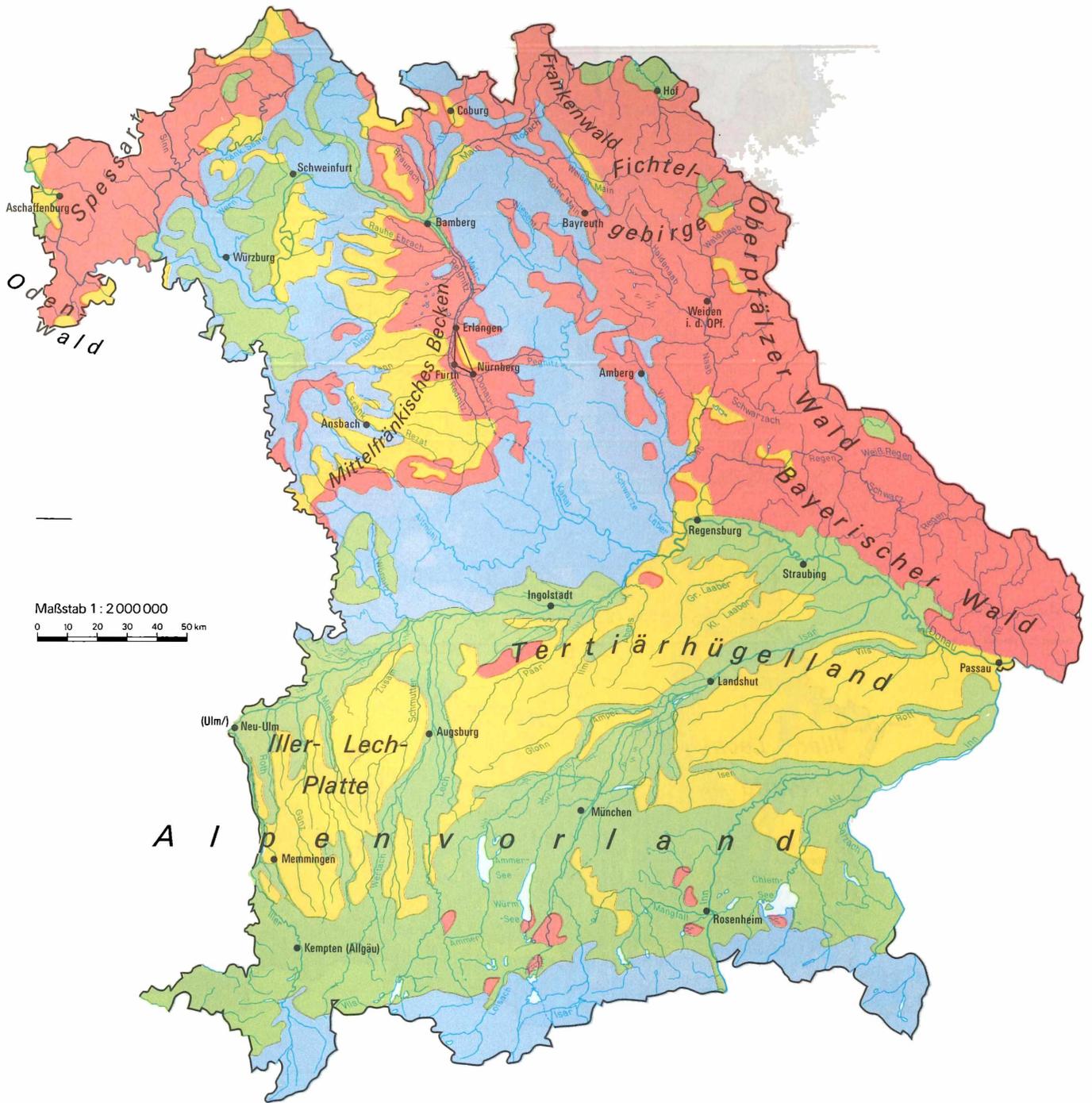
Bearbeiter: Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, München/Wielenbach

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Abbildung 3 b

**Pufferungsvermögen der Böden**

aufgrund ihrer Basenversorgung



Basenversorgung der Böden:



● Oberzentrum/mögliches Oberzentrum

Zentrale Doppel- und Mehrfachorte sind durch Linien verbunden (nach Ministerkonferenz für Raumordnung)

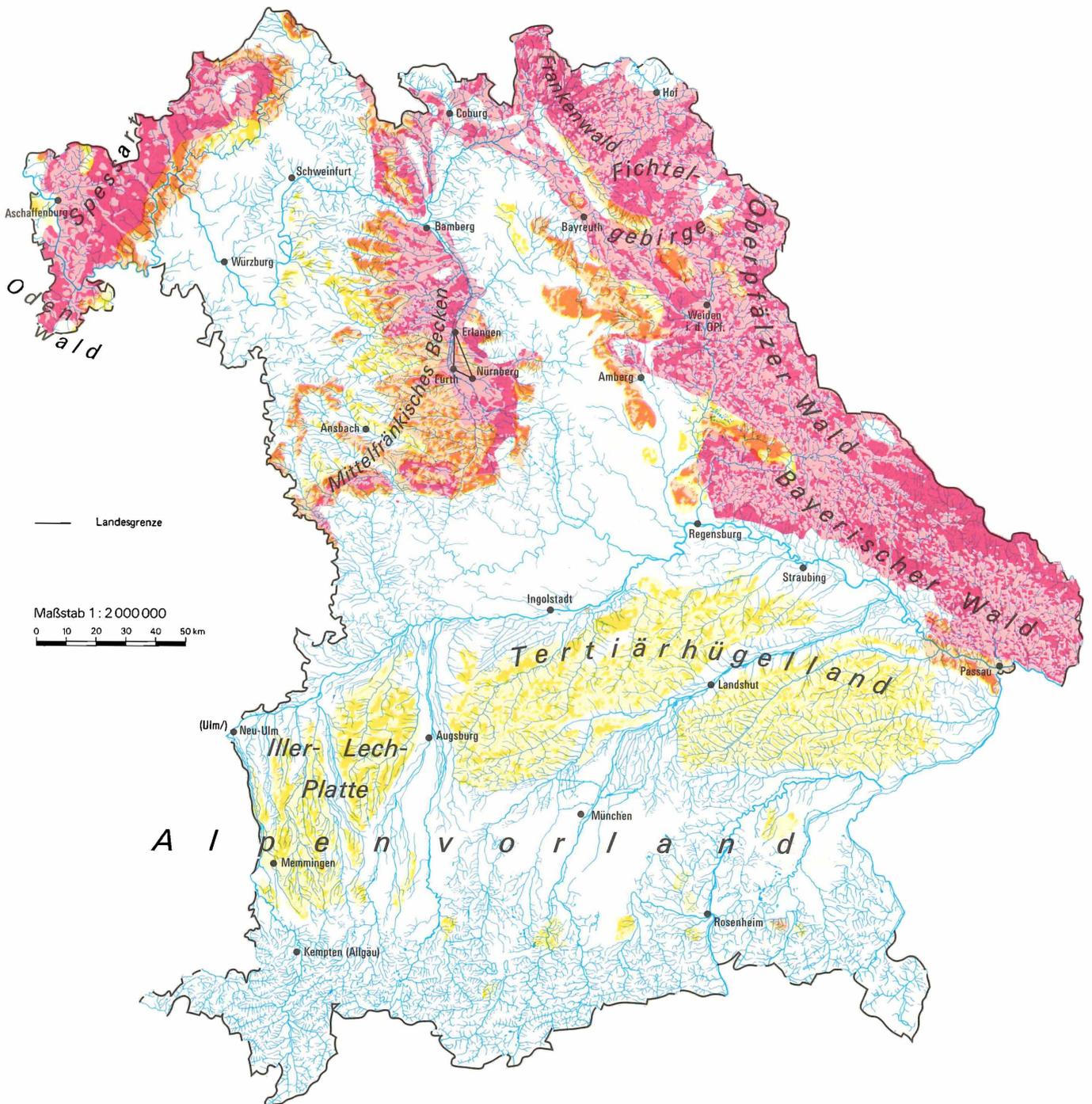
Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland Umweltbundesamt Berlin September 1987

Grundkarte: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Boppard 1978 und 1979

Bearbeiter: Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, München/Wielenbach

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

**Abbildung 4**  
**Zur Gewässerversauerung neigende Gebiete**



Gefährdungsstufen:

Gefährdungsgebiete  
 (Wald, Moor u. ä.)



● Oberzentrum/mögliches Oberzentrum

Zentrale Doppel- und Mehrfachorte sind durch Linien verbunden  
 (nach Ministerkonferenz für Raumordnung)

Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland Umweltbundesamt Berlin,  
 September 1987

Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Boppard 1978 und 1979

Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, München/Wienlbach

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Abbildung 5

Aktuelle Gewässerversauerung



Minimale pH-Werte in Oberflächengewässern:

- ▲ unter 4,3
- 4,3 bis 5,0
- über 5,0 bis 6,0

● Oberzentrum/mögliches Oberzentrum

Quelle: Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland - Umweltbundesamt Berlin, September 1987

Grundkarte: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland, Boppard 1978 und 1979

Bearbeiter: Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung, München/Wielenbach

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

Zentrale Doppel- und Mehrfachorte sind durch Linien verbunden (nach Ministerkonferenz für Raumordnung)

Gewässern am stärksten ausfallen. Solange noch Karbonate vorhanden sind, spielt das Kohlensäure/Hydrogenkarbonat Puffersystem (Kohlensäuregleichgewichtssystem) in Gewässern die wesentliche Rolle, wobei zu beachten ist, daß schon bei pH-Werten unter 5,5 noch andere Puffersubstanzen wie Aluminium oder Huminstoffe mit beteiligt sein können (HÜTTER, 1984).

Ein weiterer Indikator, der im Zusammenhang mit den Depositionsraten steht, ist der analytisch zu bestimmende Sulfatgehalt im Wasser. Diesbezügliche Ergebnisse müssen jedoch immer im Zusammenhang mit dem möglichen geogenen Background diskutiert werden.

### 3.2 Aktueller Stand der Gewässerversauerung in Bayern (< pH 6)

Der Abb. 4 der „zur Gewässerversauerung neigenden Gebiete in Bayern“ wird mit der Abb. 5 der „aktuelle Stand der Gewässerversauerung in Bayern (< pH 6)“ gegenübergestellt. Bei einem Vergleich der beiden Abbildungen ergeben sich sehr gute Übereinstimmungen, so daß in den Gebieten, in denen geogen die Gefahr einer Gewässerversauerung besteht, diese oftmals schon auftritt.

Die pH-Werte aus dem ostbayerischen Raum entstammen zum größten Teil eigenen Messungen (BAUER et al., 1988), die anderen Werte, die der Karte zugrunde liegen, stellen Messungen der verschiedensten Bearbeiter über einen Zeitraum von 8 Jahren (1978-1985) dar.

Die Messungen wurden in drei Bereiche zusammengefaßt, wobei pH-Werte über 6,0 nicht in dieser Karte dargestellt wurden. Die Abstufungen können der Legende entnommen werden. Die Grenze bei pH 6,0 wurde deshalb gezogen, weil sich darunter erste Auswirkungen auf die Wasserorganismen und Veränderungen in den Artenzusammensetzungen feststellen lassen. Zudem beginnt das Puffersystem des Kohlensäure/Hydrogenkarbonats nachzulassen. In dem höchsten Bereich (grüne pH-Punkte) liegen noch viele natürlich sauren Gewässer, da vor allem pH-Werte von 5,5-6,0 bei den extrem weichen Gewässern der Mittelgebirge häufig schon durch den CO<sub>2</sub>-Gehalt verursacht werden.

Die Abgrenzung bei pH 5,0 wurde gewählt, weil darunter das Puffersystem der Kohlensäure nicht mehr wirksam ist. Außerdem beginnt hier die verstärkte Freisetzung von dreiwertigem Aluminium, das viele Wasserorganismen, so z. B. den Leitfisch der Mittelgebirgsbäche, die Bachforelle, toxisch schädigt und bis zur Letalität führen kann. Der ungerade pH-Wert 4,3 als unterste Grenze, ergab sich aus der Tatsache, daß der Titrationsendpunkt der Säurekapazität erreicht ist. Zudem sind nur noch wenige besonders säuretolerante Organismen in solchen Gewässern zu finden.

### 3.3 Gewässerversauerung im nord- und nordostbayerischen Grundgebirge

Da es zwar wünschenswert aber aufgrund der Datenstruktur nicht möglich war, die pH-Situation für Bayern zu verschiedenen Abflusssituationen in einer Gesamtübersicht darzustellen, wird dies beispielhaft am nord- und nordostbayerischen Untersuchungsraum vorgenommen. Dieser Raum ist vom Gefährdungscharakter her eines

der flächenmäßig größten zusammenhängenden und bewaldeten Gebiete der Bundesrepublik Deutschland.

#### 3.3.1 Naturräumliche Beschreibung des Untersuchungsraumes

Das nord- und nordostbayerische Grundgebirge reicht von der Donau und dem österreichischen Waldviertel im Südosten bis zur Grenze der ehemaligen DDR im Norden. Im Westen grenzen die breiten Urstromtäler der Naab und des Regens und im Nordwesten die morphologisch markante Störungszone, die Fränkische Linie, das Grundgebirge gegenüber den gut gepufferten kalkreichen Gesteinen der Fränkischen Alb und des Obermainisch-Oberpfälzischen Hügellandes ab. Das Grundgebirge gliedert sich aufgrund der geologischen und morphologischen Gegebenheiten in 4 deutlich voneinander abgegrenzte Mittelgebirgslandschaften (MEYNEN et al., 1962), deren geogene Gegebenheiten bereits in der Abb. 3 vorgestellt wurden.

1. Bayerischer Wald
2. Oberpfälzer Wald
3. Fichtelgebirge
4. Frankенwald mit dem Bayer. Mittelvogtländischen Kuppenland

##### 3.3.1.1 Klimatische Gegebenheiten

Die genannten Mittelgebirgslandschaften stellen Klimascheiden dar. Sie liegen in der Übergangszone von maritimer und kontinentaler Prägung (BAUMGARTNER, 1985), im Sommer quer zur zyklonalen Westströmung, im Winter quer und in Nordostbayern z. T. offen zur antizyklonalen Ostströmung. Bei Südostlagen werden sie von niederschlagsreichen Vb-Tiefs (Dauerregen) gequert, die von der Adria nordostwärts ziehen. Wolken und Hochnebel sind für die Hoch- und Kammlagen der vier Mittelgebirge, insbesondere für den Hinteren Bayerischen Wald, von Bedeutung. Heftige kurzanhaltende Gewitterregen (Starkregen) sind für den Spätfrühling und Frühsommer typisch (HARTKE & RUPPERT, 1959). Das Klima zeichnet sich durch niedrige mittlere *Jahrestemperaturen* aus, je nach Höhenlage zwischen 7 und 3° C, die wesentlich niedriger sind als die in vergleichbaren Höhen, z. B. in den Alpen. Die Winter sind lang, rau und niederschlags- bzw. schneereich. Eine *Schneedecke* von  $\geq 1$  cm liegt im Durchschnitt 60-80 Tage, in den Hochlagen des Fichtelgebirges bis zu ca. 120 Tage und im Bayerischen Wald bis zu 150 Tage (KNOCH, 1952). Die *Schneeschnmelze* dauert im allgemeinen von Mitte März bis Mitte April, in den Hochlagen des Hinteren Bayerischen Waldes von Ende April bis Anfang Juni.

Der mittlere *Jahresniederschlag* nimmt im Frankенwald und im Fichtelgebirge aufgrund der Höhenverteilung von 1000 bzw. 1200 mm im Westen bis auf unter 600 mm im Osten ab (KNOCH, 1952). Im Oberpfälzer und Bayerischen Wald steigen die Niederschläge aufgrund der Orographie von 700 mm im Westen auf 1000 mm im Osten an und im Hinteren Bayerischen Wald sogar bis über 1800 mm (KNOCH, 1952). Die *Maxima* liegen im Juli und Dezember. Die Nieder-

schlagsminima liegen im Frühjahr in den Monaten Februar/März und im Herbst zwischen September und November.

### 3.3.1.2 Vegetation

Da in den bewaldeten Gebieten die Depositionen höher sind als im Freiland (HÜSER, 1988) und in der Regel abpuffernde Einflüsse aus anthropogenen Quellen fehlen, hat die Waldverteilung und -zusammensetzung einen bedeutenden Einfluß auf die Gewässerversauerung. Der Anteil der Waldflächen in den 4 Mittelgebirgslandschaften weist regional starke Schwankungen auf. Im Hinteren Bayerischen Wald, Fichtelgebirgswall und im Frankenwald (ohne Münchberger Gneismasse) erreicht der Wald noch einen Anteil bis zu 50 %. (BAUER et al., 1988). Nur in den Höhenlagen über 700 bis 800 m ü. NN nimmt der Wald noch große geschlossene Areale ein. Tiefer gelegene Landschaften, wie z. B. Münchberger Gneismasse, Vorderer Oberpfälzer und Vorderer Bayerischer Wald, sind weitgehend entwaldet (Waldanteil meist weit unter 30 %) und landwirtschaftlich genutzt. Im Frankenwald liegen die Siedlungen und bewirtschafteten Gebiete auf den Hochflächen, so daß sie durch ihre abpuffernde Wirkung einer flächenhaften Versauerung der tief eingeschnittenen Gewässer entgegenwirken.

Von der ursprünglichen Waldgesellschaft, einem Bergmischwald mit Buche, Eiche, Tanne, Kiefer, Fichte und gelegentlich Ahorn und Ulme, gibt es noch kümmerliche Reste im Nationalpark Bayerischer Wald. In den heutigen *Wirtschaftswaldungen* dominiert mit 60-90 % der Nadelwald, in dem die Fichte vorherrscht. Der Anteil der Tanne ist infolge der neuartigen Waldschäden stark zurückgegangen. In Höhen über 1 100 m ü. NN des Hinteren Bayerischen Waldes findet sich fast reiner Bergfichtenwald. Der Laubwald, meist aus Buche bestehend, erreicht nur lokal höhere Anteile bis zu 25 %.

### 3.3.2 Versauerungssituation in den Gewässern

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Fragestellung, wie sich die Versauerung zu verschiedenen Abflußsituationen darstellt und wie weit diese aus den bewaldeten Quell- und Oberlaufregionen in die landwirtschaftlich genutzten und besiedelten Bereiche hinausgetragen werden.

Von den Oberflächengewässern sind im Untersuchungsraum die Mehrzahl Fließgewässer, wobei die Mittelläufe in der Regel bereits so weit durch Siedlungseinflüsse geprägt sind, daß sie nur ausnahmsweise pH-Situationen im sauren Bereich aufweisen. Natürliche Seen treten im Untersuchungsgebiet nur im Bayerischen Wald auf (Kleiner und Großer Arbersee, Rachelsee). Größere Stauseen sind die Trinkwassertalsperren Mauthaus im Frankenwald sowie Frauenau im Bayerischen Wald, ferner der Ranna-See und der Blaubacher See im Bayerischen Wald, der Liebensteinspeicher, der Eixendorfer See, der Perlsee, der Silbersee, die Trausnitz- und Kainzmühlsperre im Oberpfälzer Wald und im Fichtelgebirge der Weißendorfer See, der Fichtelsee, der Förmitz- und der Feisnitzspeicher. Hinzu kommen zahlreiche ältere und kleinere Stauanlagen und Weiher,

wie der Nageler See im Fichtelgebirge, der Gaisweiher im Oberpfälzer Wald und die zahlreichen Klausen im Bayerischen Wald (Klausen = Wasserstauhaltung für die ehemalige Holzdrift).

Von den genannten stehenden Gewässern sind jedoch nur ein Teil, die überwiegend in Waldgebieten liegen, mehr oder weniger versauert. Insgesamt wurden während des Forschungsvorhabens, das von Herbst 1983 bis Frühjahr 1987 dauerte, rund 1 800 Wasserproben aus versauerungsgefährdeten Oberflächengewässern im nord- und nordostbayerischen Grundgebirge einer Vollanalyse unterzogen (BAUER et al., 1988), wobei mit den eigentlichen pH-Messungen wesentlich mehr Punkte erfaßt wurden. Damit ist anzunehmen, daß ein relativ gutes, flächendeckendes Bild über die pH-Wert-Situation von 1983 bis 1987 im Untersuchungsraum, soweit es sich um versauerungsgefährdete Gebiete handelt, gewonnen wurde.

Für die Meßwerte in den intensiver untersuchten Modelleinzugsgebieten, bei denen die Meßdichte in räumlicher Hinsicht sehr eng ist, war es bei diesen Übersichtsdarstellungen notwendig, mehrere Meßpunkte zusammenzufassen.

Da die kontinuierliche, flächenmäßige Erfassung versauerter Gewässer praktisch nicht möglich ist, mußten die Zeitpunkte ausgewählt werden, zu denen man die hydrologisch-chemische Amplitude abgrenzen kann. Die kritischsten Phasen hinsichtlich der Versauerung, die zu starken pH-Absenkungen führen, sind einmal die gut zu erfassenden, länger anhaltenden Schneeschmelzen oder auch Dauerregen und die schnell und kurzfristig ablaufenden Starkregenereignisse, die naturgemäß nur schwer untersucht werden können. Diese treten, wie oben erwähnt, meist im Sommer durch örtlich begrenzte Gewitter auf. Ein zweiter wichtiger Zeitpunkt, der in der Regel die günstigste pH-Situation aufzeigt, ist der stark geogen geprägte und leichter zu registrierende Niedrigwasserabfluß.

Die in Abb. 6 dargestellten und gemessenen „*minimal pH-Werte*“ der Oberflächengewässer des Untersuchungsgebietes, stellen den pessimalen (ungünstigsten Wirkungsbereich) Zustand dar, der für die ökotoxikologische Beurteilung wichtig ist. Gewässer, die auch bei Niedrigwasserabflüssen niedrige pH-Werte aufweisen, müssen als ganzjährig versauert angesehen werden.

Die *minimal pH-Werte* werden überwiegend im Frühjahr bei der *Schneeschmelze* angetroffen. Gelegentlich treten sehr niedrige pH-Werte auch im Sommer und Herbst im Zusammenhang mit zufällig erfaßten Stark- oder Dauerregenereignissen auf. Die Schneeschmelze im Frühjahr führt zu länger anhaltenden pH-Depressionen, die mit raschen und starken pH-Absenkungen bis zum pH-Minimum kurz nach dem Einsetzen der Schneeschmelze verbunden sind. Dieser pH-Abfall zu Beginn der Schneeschmelze erklärt sich nach JOHANNESSEN & HENRIKSEN (1978) dadurch, daß mit den ersten 30 % der Schneeschmelze 50-80 % der im Schnee akkumulierten Schadstoffe ausgewaschen werden. Der Wiederanstieg des pH-Wertes erfolgt nicht so steil und viel langsamer als zu Beginn der Depression. Zum anderen dürfte ein erheblicher Teil des Schmelzwassers oberflächlich bzw. oberflächennah abflie-

Ben. Die oberflächennahen Bodenschichten weisen im allgemeinen sehr niedrige pH-Werte auf, wie auch die Untersuchungen von WITTMANN & FETZER (1982) und AUERSWALD & BÖHM (1988) ergaben. Dadurch erfolgt auch seitens der Boden- und Gesteinsschichten keine Abpufferung der sauren Schmelzwasser, eher noch eine Säurezufuhr.

Dagegen sind die pH-Absenkungen infolge eines *Starkregenereignisses*, sogenannte *pH-Schocks*, meist nur kurz andauernd (Stunden bis wenige Tage). Infolge der überwiegend diskontinuierlichen Messungen und der räumlichen Begrenztheit solcher Gebiete wurden derartige Ereignisse nicht allzu häufig erfaßt. Die angetroffenen, z. T. sehr niedrigen pH-Werte deuten darauf hin, daß bei diesen pH-Schocks die pH-Minima noch tiefer liegen können als im Frühjahr bei der Schneeschmelze. Starke pH-Absenkungen wurden vor allem nach längeren Trockenzeiten beobachtet, was auf eine Akkumulation der Schadstoffe in der Vegetation und auf dem Boden und ihre rasche Auswaschung durch den Starkregen hindeutet. Hinzu kommt nach ULRICH & BÜTTNER (1985) eine Anreicherung von Säuren (Salpetersäure,  $\text{HNO}_3$ ) in den obersten Bodenschichten des Waldes infolge der Nitrifikation der Destruenten, dem verringerten Aufnahmevermögen der Bäume sowie eine Aufkonzentrierung der Säure durch Austrocknen der Böden. So wurde der pH-Wert von 2,9 am Steinbach im Fichtelgebirge, der tiefste gemessene pH-Wert im ganzen Untersuchungsprogramm, nach einem Gewitter im Sommer 1984, festgestellt. An der oberen Waldnaab wurde im Mai 1985 im Zusammenhang mit einem Starkregenereignis ein pH-Sturz von pH 6,8 auf 4,8 innerhalb von Stunden gemessen.

In der Abb. 7 kommen die *pH-Werte bei Niedrigwasser* zur Darstellung, einem Zeitpunkt, zu dem der Abfluß stark durch das Grundwasser beeinflusst wird. Die Abb. 7 dokumentiert auch, daß es Gebiete mit Gewässern gibt, die ganzjährig versauert sind.

Aus den Abb. 6 und 7 lassen sich folgende Gebiete mit stark versauerten Gewässern erkennen:

- Fichtelgebirge mit Steinwald
- Nördlicher Oberpfälzer Wald
- Hochlagen des Hinteren Bayerischen Waldes.

Einen Schwerpunkt der Gewässerversauerung bildet im Untersuchungsgebiet eindeutig das *Fichtelgebirge*. Stark versauert sind insbesondere die Waldbäche im nördlichen Fichtelgebirgswall zwischen dem Waldstein und Kornberg. Im Westen sind es die Gebiete um den Ochsenkopf und Schneeberg, den höchsten Erhebungen des Fichtelgebirges.

Im *Steinwald* sind die Zuflüsse zur Kösseine sehr stark versauert. Besonders bei Fichtelnaab und Weißem Main beginnen relativ rasch Siedlungseinflüsse abpuffernd zu wirken, so daß sich die pH-Situation nach einer relativ kurzen Fließstrecke bereits verbessert.

Im *Oberpfälzer Wald* ist im Bereich des Flossenbürger Granitmassivs mit seinen großen Wäldern die pH-Situation nicht viel besser als im Fichtelgebirge. Auch hier sind einige Bäche am Oberlauf der Waldnaab, der Rumpelbach, der Mühlbach und einige kleine nördliche Zuflüsse zum Zottbach ganzjährig versauert. Im übrigen Oberpfäl-

zer Wald ist wie im anschließenden Teil des Bayerischen Waldes die pH-Situation noch relativ günstig. Die pH-Absenkungen bei der Schneeschmelze führen nur an wenigen Gewässern zu pH-Werten unter 5,0 oder 4,3. Im Sommer und Herbst liegen die pH-Werte weitgehend über pH 6. Niedrige pH-Werte treten nördlich des Eixendorfer Stausees und vereinzelt im Bereich der Bodendöhrer Bucht auf.

Die z. T. sehr sauren Grubenseen östlich von Schwandorf sind ein Beispiel für die primär anthropogen und sekundär geogen bedingte Versauerung. Die Seen entstanden durch die Gewinnung der Braunkohle und versauerten durch die Aufoxidation des in der Kohle enthaltenen Schwefels, worauf die sehr hohen Sulfatgehalte hinweisen. Ein ähnliches Beispiel bildet das Grubenwasser aus dem Silberberg bei Bodenmais.

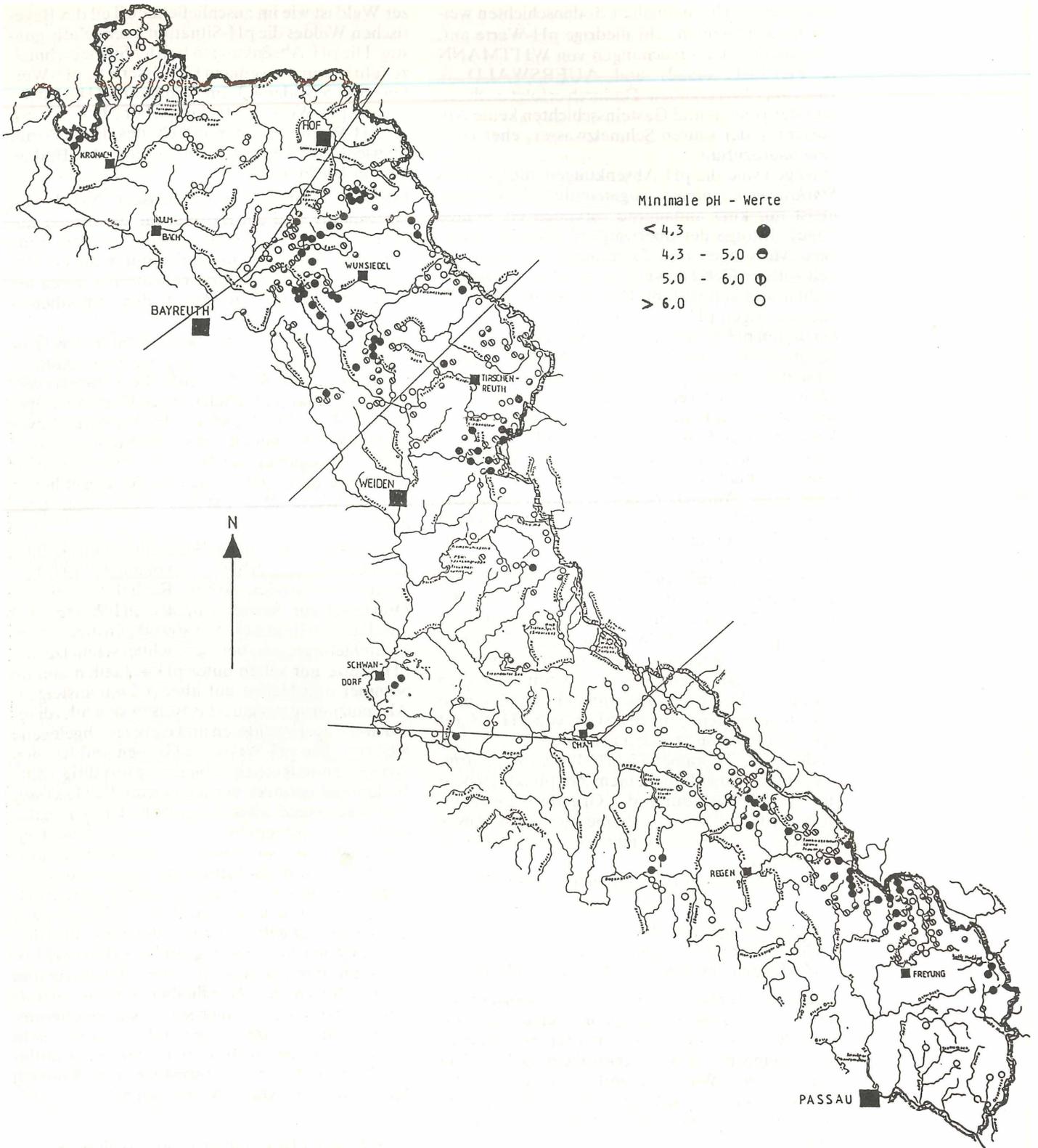
Im *Bayerischen Wald* betrifft die Gewässerversauerung im wesentlichen nur den Hinteren Bayerischen Wald. Die Gewässer des Vorderen Bayerischen Waldes weisen nur vereinzelt in den obersten Quellregionen zur Schneeschmelze niedrige pH-Werte unter pH 5,0 auf. In der Regel liegen die pH-Werte über pH 5,5, meist sogar über pH 6,0.

Im *Hinteren Bayerischen Wald* mit seinen Hochlagen über 800 m ü. NN weisen vor allem die Gebiete um den Großen Arber, Rachel, Lusen und Dreisessel zur Schneeschmelze pH-Werte < 4,3 auf. Die Situation ist hier insoweit günstiger als im Fichtelgebirge, als bei der Schneeschmelze die pH-Werte nur selten unter pH 4,0 fallen und im Sommer und Herbst auf über pH 6,0 ansteigen. Als ganzjährig versauert erweisen sich allerdings die drei Bayernwaldseen und einige hochgelegene Klauen. Die pH-Werte im Großen und Kleinen Arbersee und Rachelsee bleiben ganzjährig < 5,0. Bedeutend geringer versauert sind die Gewässer im *Frankenwald*. Eine wesentliche Ursache dafür dürfte im geologischen Untergrund (Schiefer), aber auch in der spezifischen Landschaftsstruktur mit ihren landwirtschaftlich genutzten und besiedelten Hochflächen, zu suchen sein. Niedrige pH-Werte < 5,0 finden sich nur dort, wo bituminöser Tonschiefer abgebaut wurde oder wird. Von dieser geogenen Versauerung sind vor allem die Loquitz und ihre Zuflüsse, die obere Ölschnitz und die Quellbäche des Nordhalbener Ködel betroffen. Hier treten z. T. auch sehr hohe Aluminiumkonzentrationen im Wasser auf. Auch in einem kleinen bewaldeten Buntsandsteingebiet (mittlerer Buntsandstein) nordwestlich von Kronach fanden sich sehr saure Wasser um pH 4,0.

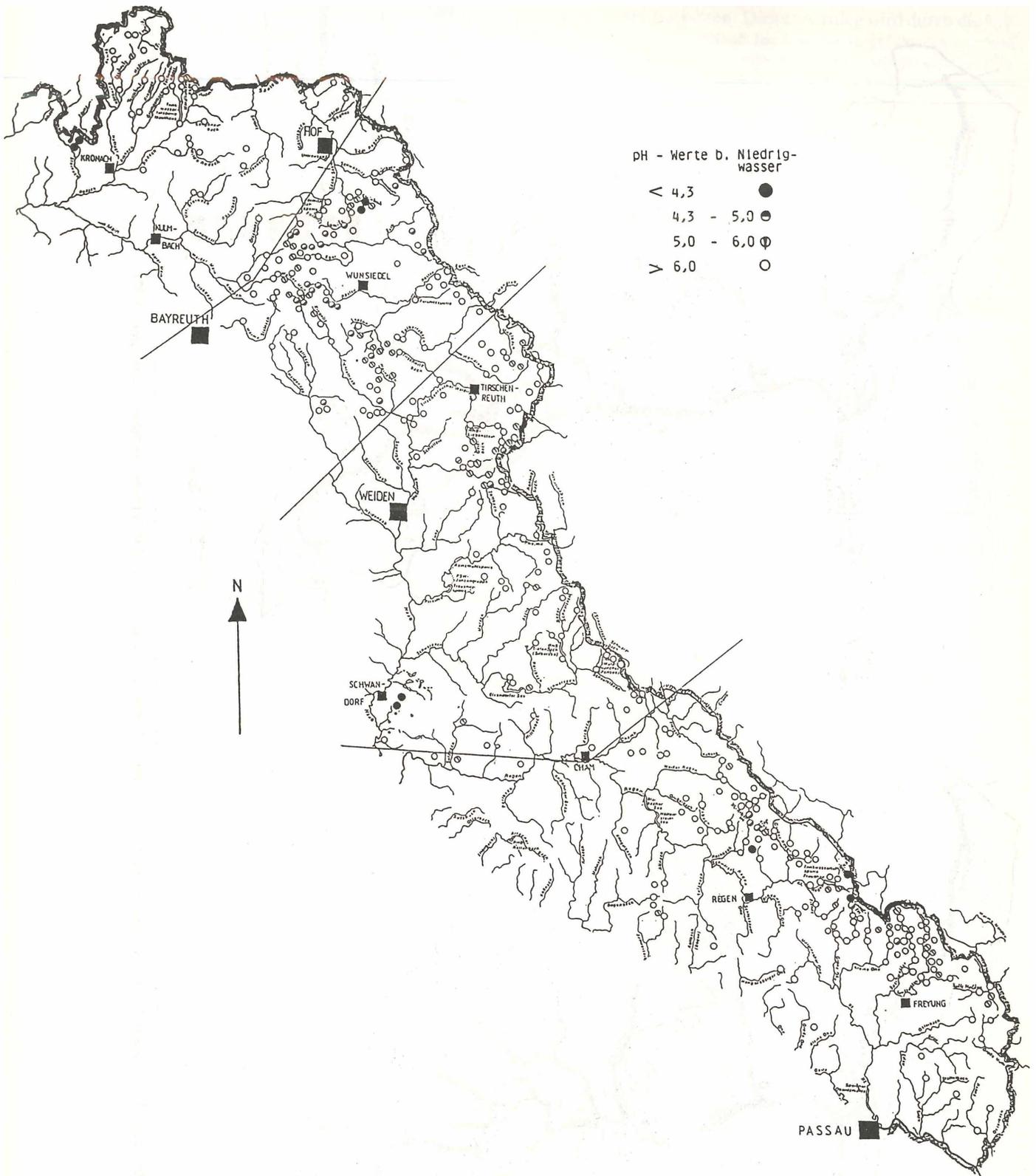
### 3.4 Die pH-Situation zu zwei typischen Abflußereignissen an der oberen Waldnaab (Oberpfälzer Wald)

Das Modellgebiet „Obere Waldnaab“ (Abb. 8), das an der Grenze zur Tschechoslowakei liegt, gehört nach MEYNEN et al. (1962) zwei Naturräumen, dem Hinteren Oberpfälzer Wald, von der Grenze bis kurz vor Bärnau, und dem Vorderen Oberpfälzer Wald an.

Auf die naturräumlichen und klimatischen Gegebenheiten sei auf BAUER et al. (1987) verwiesen. Insgesamt wurden von Spätherbst 1983 bis Oktober 1987 14 Bereisungen mit Untersuchun-



**Abbildung 6**  
**Minimale pH-Werte im nord- und nordostbayerischen Grundgebirge**



**Abbildung 7**  
**pH-Werte bei Niedrigwasser im nord- und nordostbayerischen Grundgebirge**



gen zur pH-Wert-Situation und der chemischen Charakteristik in der Waldnaab durchgeführt. Mit den beiden Darstellungen (Abb. 8) wird die sehr wechselhafte Ausbreitung der Gewässerversauerung an der oberen Waldnaab in Abhängigkeit von den geogenen Bedingungen, der Landnutzung und den jahreszeitlich sehr unterschiedlichen Abflußverhältnissen verdeutlicht.

Die chemischen und biologischen Untersuchungen an der oberen Waldnaab werden gegenwärtig noch im Rahmen des ECE-Monitoringprogrammes von der Bayerischen Landesanstalt für Wasserforschung weiter durchgeführt. In der Waldnaab-Quelle (Ust. 1) treten nur sehr geringe Schwankungen im pH auf. Die Werte liegen hier knapp unter pH 6,0 und sind durch die Konzentration an freier Kohlensäure bedingt, die mit 10,3-16,3 mg/l CO<sub>2</sub> ebenfalls recht konstant ist. An der Untersuchungsstelle 2, die die Gneis/Granit-Grenze markiert, zeigen sich schon größere pH-Schwankungen. Häufig erfährt bis dahin der pH-Wert sogar einen Anstieg, der mit dem Verlust an freier Kohlensäure auf der Fließstrecke zu erklären ist. Auch weiter bachabwärts bis Ust. 3 bleibt mit Ausnahme der Schneeschmelzphasen die Waldnaab noch in einem günstigen pH-Bereich, der auch dazu führt, daß hier ein isoliertes Fischvorkommen existiert (BAUER et al., 1987). Bei Schneeschmelze deutet sich aber bereits an Ust. 2 eine Versauerung an, indem z. B. 1987 die pH-Werte bis 5,7 bzw. 5,4 absanken. Dieser pH-Abfall wird bis Ust. 3 noch stärker, so daß zur Schneeschmelze ein pH-Wert von knapp über 4,0 gemessen wurde. Ab Ust. 3 fließen der Waldnaab einige sehr saure Nebenbäche und -gräben zu, unter denen besonders das wasserreiche Stieber Bächl hervorzuheben ist (Ust. 16). Diese Bäche stammen aus Fichtenwäldern der Granitgebiete. Es finden sich hier bei Schneeschmelze und bei Hochwasserabflüssen mehrfach pH-Werte  $\leq$  3,8. Diese sauren Nebenbäche führen dazu, daß die Waldnaab im Mittelteil (Ust. 5) nunmehr zeitweise wesentlich niedrigere pH-Werte aufweist als im oberen Bereich und nicht mehr von Fischen besiedelt wird.

Weiter unterhalb mündet der deutlich weniger saure Lichtenberger Bach (Ust. 17 a, 17) in die Waldnaab, der aus dem Gneisgebiet stammt und zumindest in seinem quellnahen Bereich ständig höhere pH-Werte aufweist. Der Lichtenberger Bach führt gelegentlich in einem kurzen Waldnaababschnitt zu einer leichten pH-Anhebung. Weiter bachabwärts kommt rechtsseitig wiederum der stark saure Totengräberbach (Ust. 18) hinzu.

Die Ust. 8 markiert den Punkt, an dem die Waldnaab das Waldgebiet verläßt. Betrachtet man für diese wichtige Untersuchungsstelle die zeitliche Entwicklung der pH-Wert-Situation von November 1983 bis Oktober 1987, so läßt sich infolge der großen jahreszeitlichen Schwankungen kein eindeutiger Entwicklungstrend ausmachen. Der niedrigste pH-Wert von 3,86 wurde zur Schneeschmelze 1986 gemessen.

Schon allein die Einflüsse der Fischteiche, einiger Wiesen und rechtsseitiger Acker- und Wegabschwemmungen zwischen Ust. 8 und 9 führen selbst bei extrem tiefen pH-Wert-Situationen der Schneeschmelze zu pH-Anhebungen bis zu 0,5

pH-Einheiten. Dieser Anstieg wird durch die Einflüsse von Naab bis Ust. 11 in größerem Umfang fortgeführt. Rechtsseitig tritt unterhalb der Ortschaft Naab der Göttlitzbach (Ust. 20) und später im Ortsbereich von Bärnau der Steinbach (Ust. 21) hinzu. Diese Bäche durchfließen landwirtschaftlich genutzte Gebiete mit Fischteichanlagen und haben stets pH-Werte  $>$  6,0, z. T.  $>$  7,0.

Spätestens ab der Einleitung der Kläranlage Bärnau ist die Abpufferung so groß, daß die Waldnaab nicht mehr sauer ist. Allerdings zeigt das Beispiel zur Schneeschmelze 1987, daß hohe Abflüsse mit großen Säuremengen durchaus in der Lage sind, die Ortseinflüsse von Naab unbeeinflußt zu überströmen, so daß bis oberhalb der Kläranlageneinmündung noch ein pH-Wert  $<$  6,0 vorlag.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, daß die Versauerungsabläufe in einem Fließgewässer einer hohen Dynamik unterliegen, die vom Pufferungsvermögen des Untergrundes, den Abflußverhältnissen (Schneeschmelze etc.) und der Landnutzung, einschließlich der Siedlungseinflüsse, gesteuert sind. Die im Granit entspringenden Bäche sind bereits in der Quellregion sehr sauer, die aus Gneis (Waldnaabquelle und der obere Lichtenberger Bach) jedoch nicht. Diese versauern erst beim Übertritt in den granitischen Bereich. Das spricht dafür, daß die Silikatverwitterung in den vom Gneis geprägten Gebieten noch genügend Basen liefert, um den Säureeintrag abzupuffern. Die Pufferkapazität ist, wie im Lichtenberger Bach beobachtet wurde, nur noch sehr gering. So sank im Frühsommer 1985 bei pH 6,7 nach einem kurzanhaltenden Starkregenereignis der pH-Wert kurzzeitig (Stunden) um fast 2 Einheiten auf pH 4,8 (Ust. 17 a) ab, ein typischer pH-Schock (LEHMANN et al., 1985). In der Waldnaab selbst (Ust. 3) wurde zur gleichen Zeit eine pH-Absenkung von pH 5,8 auf 4,9 gemessen. Diese sauren pH-Situationen bei Schneeschmelze oder Starkregenereignissen sind von einem Anstieg der Sulfat- und bestimmten Metallkonzentrationen begleitet und nicht geogenen Ursprungs.

Schließlich wird durch landwirtschaftliche Nutzung und Siedlungseinflüsse, u. a. auch durch die in den Fischteichanlagen vielfach betriebene Kalkung, eine Pufferkapazität bereitgestellt, die die Versauerung größtenteils aufhebt. Diese Einflüsse werden allerdings, wie z. B. an der Waldnaab, bei besonders sauren Schneeschmelzabflüssen mit ihren großen Wassermengen überwunden und gelangen ca. 7 km weiter bachabwärts als dies sonst der Fall ist.

#### 4. Schlußbemerkung

Eine Bekämpfung der Gewässerversauerung oder Sanierung bereits versauerter Gewässer hat mit Kalkungsmaßnahmen in den Waldgebieten oder den Gewässern selbst nur begrenzten Erfolg, der ökologisch wie ökonomisch nicht zu rechtfertigen ist.

Um das Übel an der Wurzel zu fassen, sind radikale Verminderungen von versauernd wirkenden Emissionen erforderlich.

## Literatur

- AUERSWALD, K. und BÖHM, A. (1988):  
pH-Werte von Böden in 3 Wassereinzugsgebieten Ostbayerns. In: Gewässerversauerung im nord- und nordostbayerischen Grundgebirgen; in: Berichte der Bayerischen Landesanstalt f. Wasserforschung, 253-280.
- BAUER, J.; SCHMITT, P.; LEHMANN, R. und FISCHER-SCHERL, Th. (1987):  
Untersuchungen zur Gewässerversauerung im Modellgebiet Obere Waldnaab (Oberpfälzer Wald, Nord-Ostbayern). – Berichte der ANL (Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, Laufen) 11, 139-17.
- BAUER, J.; LEHMANN, R. und HAMM, A. (1988):  
pH-Wert-Veränderungen an ungepufferten Seen und Fließgewässern durch saure Depositionen und ökologische Aspekte der Gewässerversauerung. Gewässerversauerung im nord- und nordostbayerischen Grundgebirgen; in: Berichte der Bayerischen Landesanstalt f. Wasserforschung, 1-250.
- BAUMGARTNER, A.:  
Das Wassereinzugsgebiet Große Ohe; Tagungsbericht Nationalpark Bayer. Wald 5/2, 405-422.
- HARTKE, W. und RUPPERT, K. (1959):  
Die ergiebigen Stark- und Dauerregen in Süddeutschland nördlich der Alpen; in: Forschungsarbeiten zur deutschen Landeskunde, Bd. 115.
- HÜSER, R. (1988):  
Stoffdeposition mit dem Freiland- und Bestandsniederschlag an elf Waldstandorten in Ostbayern; in: HÜSER, R. und REHFUESS, K. E.: Stoffdeposition durch Niederschlag in ost- und südbayer. Waldbeständen. Forst. Forschungsberichte München 86, 82-153.
- HÜTTER, L. A. (1984):  
Wasser und Wasseruntersuchungen; 2. Auflage, 344 S.
- JOHANNESSEN, M. und HENRIKSEN, A. (1978):  
Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting; in: Water Resources Research 14, 615-619.
- KELLER, R.; DE HAAR, U.; LIEBSCHER, H. J.; RICHTER, W. und SCHIRMER, H. (Hrsg.) (1978):  
Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland.
- KNOCH, K. (1952):  
Klima-Atlas von Bayern. 23 S.
- LEHMANN, R.; SCHMITT, P. und BAUER, J. (1985):  
Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland, ihre Verbreitung und Auswirkung. – Information zur Raumentwicklung. Bundesforsch. Anst. für Landeskunde und Raumordnung (Hrsg.), H. 10, 893-922.
- LEHMANN, R. und SCHMITT, P. (1987):  
Erläuterungen zur Kartierung; in: Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 22/87, 18-32.
- MEYNEN, E.; SCHMITHÜSEN, J. et al. (Hrsg.) (1962):  
Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands; Bd. II Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- OBERSTE BAUBEHÖRDE im Bayerischen Staatsministerium des Innern (1986):  
Gewässergütekarte Bayern 1 : 500 000.
- ROESCHMANN, G. (1978/79):  
Pedologie; in: Keller, R. et al.: Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland; 6. Karte.
- ULRICH, B. und BÜTTNER, G. (1985):  
Waldsterben – Konsequenzen für die forstliche und landwirtschaftliche Ertragskraft; In: Informationen zur Raumentwicklung – Waldsterben und Raumordnung, H. 10, 879-892.
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1984):  
Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. – Materialien 1/84, 462 S.
- UMWELTBUNDESAMT (1987):  
Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. – Texte 22/87, 118 S.
- WITTMANN, O. und FETZER, K. D. (1982):  
Aktuelle Bodenversauerung in Bayern; Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). – Materialien 20, 30 S.

### Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Geograph  
Reinhold Lehmann  
Bayerische Landesanstalt für Wasserforschung  
– Versuchsanlage Wielenbach –  
Demollstraße 31  
D–8121 Wielenbach

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1990

Band/Volume: [4\\_1990](#)

Autor(en)/Author(s): Lehmann Reinhold

Artikel/Article: [Geographisch-geologische Standortaspekte der Gewässerversauerung in Bayern 8-22](#)