

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser

Atmosphärische Deposition

Messung der Niederschlagsbeschaffenheit



LAWA - Grundsatzpapier

Bearbeiter: **Ad-hoc-Arbeitskreis
"Niederschlagsbeschaffenheitsmessung"**

Hölscher, J.	Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall
Dr. Kallweit, D.	Umweltbundesamt
Dr.sc. Meißner, R.	Institut für Gewässerforschung, Magdeburg
Merten, O.	Landesumweltamt Brandenburg
Dr. Meuser, A.	Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
Sager, H.	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Obmann)
Schulz, F.	Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein
Willibald, D.	Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Dr. Ziegler, G.	Thüringer Landesanstalt für Umwelt
Dr. Bittersohl, J.	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (als Gast)

VORWORT

In vielen Regionen der Erde, besonders ausgeprägt in Teilen Europas und Nordamerikas wird die Beschaffenheit der Niederschläge in erheblichem Ausmaß durch anthropogene Emissionen geprägt. Stoffeinträge aus der Atmosphäre verändern und beeinträchtigen nachweislich die Beschaffenheit von Fließgewässern, Seen und Grundwasservorkommen. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf für die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder, ausführliche Informationen über die Höhe der Schadstoffeinträge, die Gefährdungspotentiale von Schadstoffgruppen und die langfristige Entwicklung der Einträge zu gewinnen.

Mit diesem Hintergrund hat die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser durch den ad-hoc-Arbeitskreis "Niederschlagsbeschaffenheitsmessung" prüfen lassen, inwieweit und mit welchem Aufwand seitens der Wasserwirtschaftsverwaltungen Messungen der Niederschlagsbeschaffenheit, bzw. der atmosphärischen Deposition durchgeführt werden sollten.

Das hiermit vorgelegte Grundsatzpapier kommt zu dem Schluß, daß die Beschaffenheit der Niederschläge mit ihren Auswirkungen auf Sickerwasser, Grundwasser und oberirdische Gewässer in die ständige Überwachungstätigkeit einbezogen werden muß.

Innerhalb der Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder ist eine Überwachung nach gleichen Grundsätzen anzustreben. Diesem Ziel dient soll eine in einem weiteren Schritt zu erstellende und auf den vorliegenden Grundsätzen aufbauende Richtlinie dienen.

Helmut Sager

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

	EINFÜHRUNG	6
1	ATMOSPHERISCHE DEPOSITION	8
1.1	Emissionen	8
1.1.1	Emissionen aus natürlichen Quellen	8
1.1.2	Emissionen aus anthropogenen Quellen	9
1.2	Umwandlung und Transport von Luftschadstoffen in der Atmosphäre	10
1.3	Depositionen	11
1.3.1	Räumliche Verteilung	11
1.3.2	Depositionsmechanismen	12
1.3.3	Expositionsbedingungen	15
2	WIRKUNG DER ATMOSPHERISCHEN DEPOSITION AUF DIE GEWÄSSERSYSTEME	16
2.1	Bodenversauerung und Puffersystem	16
2.2	Auswirkungen von Säureeinträgen auf die Gewässer	18
2.2.1	Grundlagen	18
2.2.2	Sicker- und Grundwasser	20
2.2.3	Fließgewässer	20
2.2.4	Seen	21
2.3	Auswirkungen von Stickstoffeinträgen auf die Gewässer	21
2.4	Auswirkungen von organischen Luftverunrei- nungen und Schwermetallen auf die Gewässer	22
2.4.1	Wirkung organischer Luftverunreinigungen	22
2.4.2	Wirkung von Schwermetallen	23
2.5	Auswirkungen der Bodenversauerung und der Waldschäden auf das Abflußregime	23
2.6	Wasserwirtschaftliche Wertung des Stoffeintrages	24
2.6.1	Trinkwasseraufbereitung	24
2.6.2	Grundwasserschutz im Einzugsgebiet	25
2.6.3	Schutz von Fließgewässern und Seen	27
2.6.4	Emissionsminderung	27

3	DERZEITIGE SITUATION UND WEITERES VORGEHEN	28
3.1	Meßaufgaben der Wasserwirtschaftsverwaltung	28
3.1.1	Gefährdungspotential	28
3.1.2	Bestehende Meßprogramme	28
3.1.3	Gewässerkundliche Untersuchungsziele	29
3.2	Grundlagen für ein gewässerkundliches Depositionsmeßnetz	30
3.2.1	Stand der Gerätetechnik	30
3.2.2	Meßnetzplanung	31
3.2.3	Meßmethoden	32
3.2.4	Datenaufbereitung und -bereitstellung	33
3.2.5	Abstimmung der Fachbehörden	33
3.3	LAWA-Richtlinie	34
4	FAZIT	36
	LITERATUR	38

EINFÜHRUNG

Die Luftverschmutzung insbesondere durch Emission von Schwefel- und Stickstoffverbindungen führt zur Entstehung des sogenannten "sauren Regens". Der Begriff des "sauren Regens" umreißt nur einen Teil des Problems und ist deshalb durch den Begriff der "atmosphärischen Deposition" ersetzt worden.

Erste Erscheinungen der Gewässerversauerung durch ferntransportierte Stoffeinträge über den Luftpfad wurden in den sechziger Jahren in Skandinavien registriert. Heute sind sie in ganz Mitteleuropa und Nordamerika nachweisbar.

Eine wissenschaftliche Problemsichtung orientierte sich zunächst an der kausalen Bewertung von akuten Umweltschäden; insbesondere großflächige Waldschäden erforderten die Aufklärung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Die Auswirkungen atmosphärischer Depositionen auf die Wasserressourcen, insbesondere auf das Grundwasser, wurden bisher nur in Teilbereichen behandelt. Lange Zeit herrschte der Glaube vor, daß industrieferne und vor allem bewaldete Einzugsgebiete eine zuverlässige Garantie für dauerhaft geschützte Wasserressourcen sind. Das Phänomen "atmosphärische Deposition" hat bis heute nicht durchgängig als wasserwirtschaftlich relevante Frage Beachtung gefunden.

Die angestrebte Verringerung der Stoffeinträge über den Luftpfad in die Gewässer wird in absehbarer Zeit nicht zu erreichen sein. Vielmehr deuten zahlreiche Befunde darauf hin, daß trotz erheblicher Anstrengungen bei der Emissionsminderung die Depositionsraten zum Teil weiter ansteigen und neue Stoffe und Stoffgruppen mit Umweltschädigungspotential in die Atmosphäre gelangen. Ein augenfälliges Beispiel sind die Emissionen bei den Verbrennungsvorgängen, wo zwar der Schwefeldioxydausstoß vermindert werden konnte, die Stickstoffemissionen jedoch, europaweit betrachtet, weiter zunahmen. Neben diesen dauernden Belastungen bilden die über die Atmosphäre wirkenden Naturereignisse, Unfälle und technische Katastrophen, wie z.B. der Tschernobyl-Unfall, ein gesondertes, auch bei größter Anstrengung nicht zu beseitigendes Gefahrenpotential.

Die Produktion und Anwendung organischer Substanzen ist äußerst vielfältig und einem ständigen Wandel unterworfen. In vielen Fällen sind die Erkenntnisse über die Auswirkungen derartiger Stoffe auf die Gewässer wegen der oft unvorhersehbaren komplexen Reaktionen der Ökosysteme unzureichend. Selbst bei dem seit längerem bekannten Problem der Gewässerversauerung sind noch viele Fragen offen. Hinzu kommt, daß durch den Stoffeintrag Veränderungen der Vegetation und der Bodenbeschaffenheit auftreten, die ihrerseits wieder Reaktionen in den nachgeschalteten Ebenen des Wasserkreislaufes auslösen können. Ein Beispiel hierfür ist das Absterben der Bergwälder mit seinen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

1 ATMOSPHERISCHE DEPOSITION

Deposition ist ein Prozeß, der letztlich aus natürlichen und anthropogenen Emissionen resultiert und nach deren Umwandlung und Transport in der Atmosphäre über die Vegetation oder direkt auf die Böden und die Gewässer wirkt.

1.1 Emissionen

Emissionen treten als Aerosole, Rauch, Nebel, Staub, Ruß usw. in der Atmosphäre in Erscheinung. Gegenwärtig sind mehr als 300 Substanzen bekannt, die in nennenswerter Menge emittiert werden.

1.1.1 Emissionen aus natürlichen Quellen

Als wesentliche, für die atmosphärische Deposition bedeutsame, natürliche Emissionsquellen kommen in Betracht:

Quelle / Genese	emittierte Stoffe
- biogene Emissionen durch Reduktion von S-Verbindungen von Land und aus dem Meer	organische Sulfide, Schwefelwasserstoff
- Aerosole marinen Ursprungs Vulkanismus, geothermische Emissionen	Schwefeldioxid, Schwefeltrioxid, Schwefelwasserstoff, Schwefel, Sulfat, Chlorwasserstoff
- Freisetzungen aus dem Eiweißabbau	Ammoniak
- Denitrifizierung von N-Verbindungen in Böden und Gewässern	Stickstoff, Stickstoffmonoxid, Distickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid,
- atmosphärische Entladungen (Gewitter)	Stickoxide

Tab. 1: Wesentliche natürliche Emissionsquellen der Deposition

Schätzungen der Emissionsmassenströme aus natürlichen Quellen sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da eine direkte quantitative Ermittlung nicht möglich ist. Insbesondere bei Naturkatastrophen (Vulkanismus, Waldbrände) können erhebliche Mengen eines emittierten Stoffes in die Atmosphäre gelangen. So werden z.B. bei einem Vulkanausbruch bis zu 5 Mt Salzsäure (Chlorwasserstoff) pro Eruption abgegeben.

Zu den natürlichen Emissionen sind die anthropogenen hinzugekommen, die in der nördlichen Hemisphäre seit längerem eine ständige Belastung der unteren Atmosphärenschichten bewirken.

1.1.2 Emissionen aus anthropogenen Quellen

Tab. 2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten emittierten Stoffgruppen und deren anthropogene Quellen.

Stoff / Stoffgruppe	Herkunft	wasserwirtschaftlich relevante Wirkung
Schwefeldioxid	Verbrennung fossiler Rohstoffe, Verkehr, Rohölverarbeitung, Hütten-, Zellstoff-, Glas-, Keramik- und chemische Industrie, Müllverbrennung	- direkte Versauerungswirkung - phytotoxisch
Schwefeltrioxid, Schwefelwasserstoff	Schwefelsäureherstellung, Feuerungsanlagen, Zellstoffindustrie, Rohölverarbeitung	- direkte Versauerungswirkung (Schwefelwasserstoff nach Konversion)
Stickoxide,	Verkehr, Verbrennung fossiler Rohstoffe, Industrie	- direkte Versauerungswirkung - Nährstoffe, Eutrophierung - Bildung sekundärer Luftverunreinigungen (z.B. Ozon/Photooxidation)
Fluorwasserstoffsäure, Siliziumfluorid	Aluminium-, Glas-, Keramik-, Düngemittel- und chem. Industrie	- hochtoxisch - direkte Versauerungswirkung
Chlorwasserstoff, Chlor	Chemie und Kali-Industrie, Verzinkerei, Müllverbrennung	- direkte Versauerungswirkung - phytotoxisch
Ammoniak, Amine	Intensivlandwirtschaft und Tierhaltung, Düngemittel- und chem. Industrie	- Nährstoffe, Eutrophierung - indirekte Versauerungswirkung - phytotoxisch
organische Lösungsmittel, Kohlenwasserstoffe	chemische Industrie, Verkehr, Elektrotechnik, Elektronik	- Bildung sekundärer Luftverunreinigungen - teilweise phytotoxisch
Stäube (Asche, Kalk, Schwermetalle, Phosphate)	Verbrennung fossiler Rohstoffe, Metallurgie, Industrie, Landwirtschaft, Verkehr	- Bodenkontamination - basisch - teilw. eutrophierend
Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel	Land- und Forstwirtschaft (Emission durch Abdrift, Verdampfung, Gasaustausch Boden - Atmosphäre)	- toxisch - Bildung sekundärer Luftverunreinigungen

Den größten Anteil an emittierten Gasen haben Schwefeldioxid und Ammoniak, gefolgt von den Stickoxiden und den flüchtigen organischen Verbindungen. Eine größere Bedeutung als bisher angenommen besitzen wahrscheinlich die Fluorverbindungen. Die Rolle der Ammoniakausgasungen wurde in der Vergangenheit häufig unterschätzt. Bei den organischen Verbindungen bilden leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (Lösungsmittel) und monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Kraftfahrzeugtreibstoffe) wichtige Stoffgruppen.

Als hauptsächliche Emissionsquellen lassen sich zusammenfassen:

- Verbrennung fossiler Rohstoffe
- Verkehr
- industrielle Tätigkeit
- landwirtschaftliche Intensivproduktion

1.2 Umwandlung und Transport von Luftschadstoffen in der Atmosphäre

Die emittierten Stoffe erfahren in der Atmosphäre chemische Umwandlungen. Einflußfaktoren sind Wolken- und Nebelereignisse, Aerosole und Stäube sowie Sonnenenergie.

In der Troposphäre erfolgen die chemischen Umwandlungen überwiegend als photochemisch induzierte Radikalreaktionen in der Gasphase. Bei Vorhandensein der flüssigen Phase sind darüber hinaus Ionenreaktionen möglich.

Die Oxidationen von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid bzw. Schwefelsäure sowie von Stickstoffdioxid zu Salpetersäure erfolgen über eine Vielzahl von Einzelreaktionen und Intermediate, wobei für die Stickoxid- bzw. Schwefeldioxid-Konversion jeweils mehr als 20 Elementarreaktionen bekannt sind.

Ammoniak spielt in der Atmosphäre als basischer Reaktionspartner für die Bildung von Ammoniumsulfat-Aerosolen eine Rolle.

Kohlenwasserstoffe unterliegen oxidativen Abbaureaktionen. Halogenkohlenwasserstoffe sind wesentlich langlebiger. Die atmosphärischen Reaktionsprodukte können wegen der besseren Wasserlöslichkeit hohe Konzentrationen im Wolken- und Niederschlagswasser erreichen.

Die Luftschadstoffe und deren Reaktionsprodukte unterliegen verschiedenen Transportvorgängen. Maßgebend für die horizontale und vertikale Verfrachtung sind die Verhältnisse in der Troposphäre, vor allem in den unteren Luftschichten. Die Verweildauer von Substanzen in der Atmosphäre wird von deren "Reaktionsfreudigkeit", von der Höhe der Emissionsquelle sowie von der Wetterlage (Ausbildung von Inversionsschichten) bestimmt. Mit Ausnahme einiger Gase, die in höhere Atmosphärenschichten gelangen und dort verbleiben, werden die Luftschadstoffe durch unterschiedliche Vorgänge wieder auf der Erdoberfläche deponiert.

1.3 Deposition

Bei der Deposition wird unterschieden nach den Kriterien

- räumliche Verteilung in Bezug zur Emissionsquelle
- Depositionsmechanismen
- Expositionsbedingungen.

1.3.1 Räumliche Verteilung

Die unterschiedliche Verteilung deponierter Stoffe resultiert aus einer Vielzahl spezifischer Emissionsgrößen (Austrittshöhe, meteorologische Bedingungen, stoffliche Eigenschaften u.a). Im Prinzip kann in lokale, den Emittenten zuordenbare Depositionen und in Depositionen ferntransportierter Schadstoffe unterschieden werden.

Lokale Depositionen sind ihrer Menge nach deutlich höher. Die Entfernung zur Quelle beträgt einige hundert Meter bis mehrere Kilometer. Quellnah werden vor allem größere Partikel deponiert; ferner spielt hier die Diffusion von Gasen in der unteren Atmosphärenschicht eine erhebliche Rolle. Emittentennahe Depositionen sind in ihrer räumlichen und mengenmäßigen Verteilung stark von der aktuellen meteorologischen Situation abhängig. Einige stoffliche Umwandlungen, wie z.B. Photooxidation, laufen nicht oder nur eingeschränkt ab.

Der Ferntransport von Schadstoffen erfolgt überwiegend in höheren Atmosphärenschichten und dabei nicht selten über mehrere tausend Kilometer. Die Folge sind großflächige Schadstoffeinträge über lange Zeiträume. Einzelne Quellen sind nur bei bekannten stofflich signifikanten Ereignissen (z.B. Reaktorkatastrophen) und vorliegenden Windrichtungsmessungen bestimmbar.

1.3.2 Depositionsmechanismen

Die im Rahmen der Deposition auftretenden Stoffflüsse aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche erfolgen in der flüssigen (rain out), festen oder gasförmigen Phase. Partikel spielen als Kondensationskeime eine wesentliche Rolle, können aber auch unmittelbar deponiert werden (fall out). Gase und Partikel werden während eines Niederschlagsereignisses ausgewaschen (wash out). Ferner ist die Ablagerung von Luftinhaltsstoffen an Akzeptoroberflächen, vor allem an der Vegetation, ein wichtiger Prozeß.

Es kann generell in die nasse, trockene und feuchte Deposition unterschieden werden (Tab. 3). Die Akzeptorsysteme (Acker, Wiese, Wald, Gewässer) gewinnen in der Reihenfolge nasse Deposition - trockene (Aerosol-) Deposition - feuchte Deposition - trockene (Gas-) Deposition zunehmenden Einfluß auf den Depositionsprozess. Meist laufen mehrere Prozesse gleichzeitig ab.

Tab. 3: Charakterisierung der Gesamtprozesse der Deposition

Teilprozess	Erläuterung
Trockene Deposition	
von Aerosolen	Sedimentation, rainout und washout von Aerosolen
von Gasen	Transport von Gasen aus der Atmosphäre zur bodennahen Grenzschicht und Aufnahme durch Erdoberfläche (Boden, Schnee, Wasser, Vegetation) infolge molekularer Diffusion.
Nasse Deposition	Transport von gelösten und ungelösten Stoffen zur Erdoberfläche mit dem Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel). Zusätzlich wird nach in-cloud- und below cloud-scavenging unterschieden.
Feuchte Deposition	Entfernung von Stoffen aus der Atmosphäre durch Nebel, Rauheif, Tau (auch als occulte Deposition bezeichnet). Kennzeichnend sind hohe Stoffkonzentrationen.

Im Hinblick auf sammel- und meßtechnische Einrichtungen sowie die Interpretation der Daten wird jedoch häufig nach Niederschlags- und Interzeptionsdeposition unterschieden. Abb. 1 stellt die Bezüge der Depositionsprozesse zu den Gefäß - Sammelmethode her:

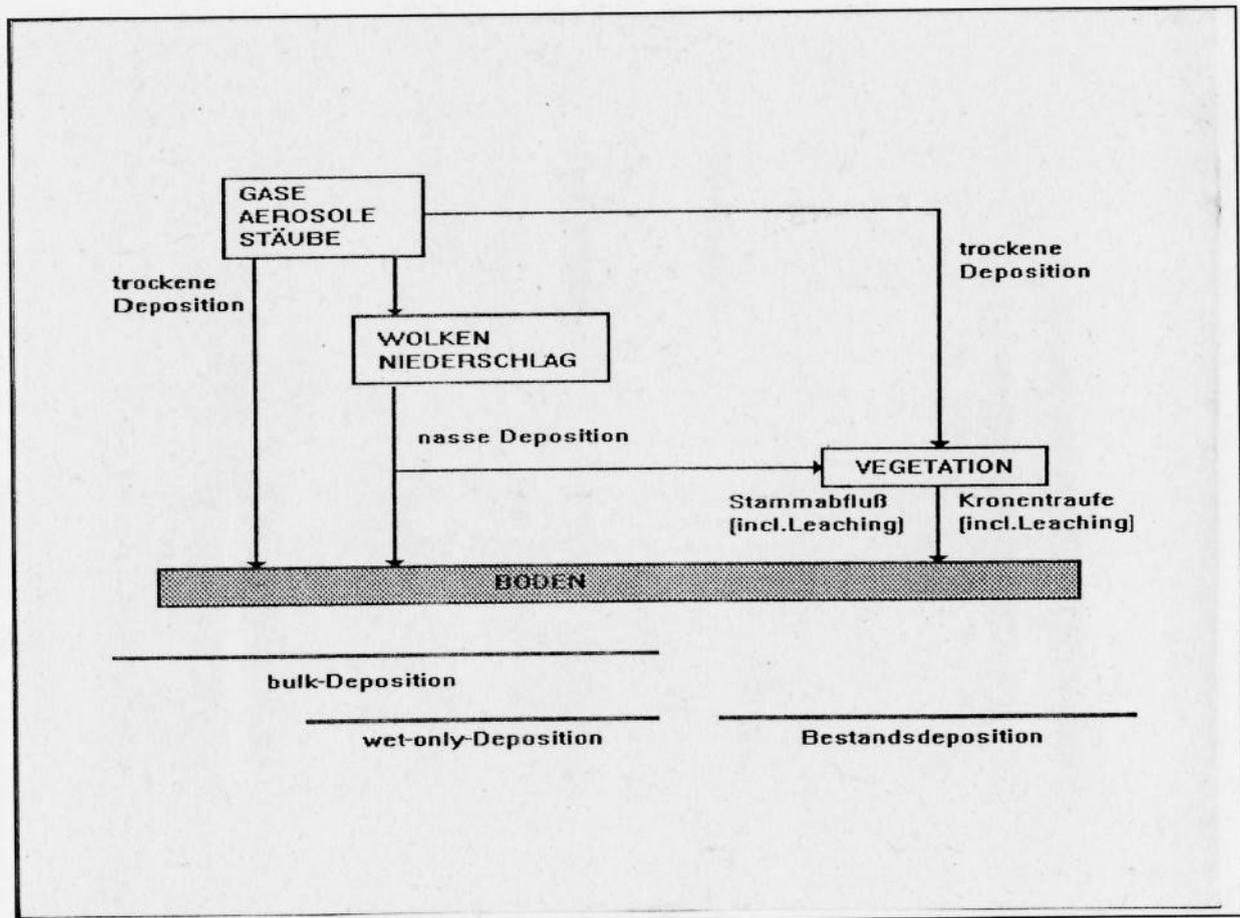


Abb. 1: Bezug der Depositionsprozesse zu Erfassungsmethoden

In grober Abschätzung beträgt das Verhältnis von trockener zu nasser Freiland-deposition bei Schwefel- und Stickstoff-Verbindungen in Emittenten-nähe ca. 10:1 und kann auf weniger als 1:1 in mehr als 300 km entfernten Gebieten abfallen (FOWLER, 1980). Topographische, meteorologische und Oberflächeneigenschaften eines Gebietes beeinflussen dieses Verhältnis erheblich.

Die trockene Deposition von Schwefeldioxid und Stickoxiden und Ammoniak wird von den Konzentrationen dieser Verbindungen in der bodennahen Luftschicht bestimmt, während die nasse Deposition von der Höhe und Intensität des Niederschlages sowie der Konzentrationsverteilung, insbesondere im Wolken-bereich abhängt.

1.3.3 Expositionsbedingungen

Als Expositionsbedingungen werden alle Einflußgrößen beschrieben, die lokal die Depositionsmenge beeinflussen. So können innerhalb relativ kleiner Areale Unterschiede in der Depositionsrate mehrere hundert Prozent betragen.

Folgende Einflußgrößen beschreiben die Expositionsbedingungen:

- **Geländerelief:**
Generelle Unterschiede der Depositionsraten bestehen zwischen Flachland, Gebirgsvorland und Gebirgsregionen, wobei sich örtlich Geländehöhe, Tallagen, Hang- oder Gipfellagen, Luv- und Leelagen sowie Waldrandeffekte auf die Deposition auswirken.
- **Geländeoberfläche:**
Rauhigkeit, Vegetationsdecke und Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen die Depositionsraten. An Forststandorten werden deshalb generell höhere Depositionsraten ermittelt ("Auskämmeffekt") als an vergleichbaren Freilandstandorten. Daneben ist, vor allem im Hinblick auf die Deposition von Stäuben, die Flächennutzung zu berücksichtigen (Sekundäremission durch Aufwirbelung).
- **Meteorologische Bedingungen:**
Diese beeinflussen vor allem das Transportverhalten von Luftschadstoffen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Großwetterlagen bzw. die Verteilung der Windrichtungen. Zusätzlich sind mikrometeorologische Bedingungen zu berücksichtigen, z.B. in austauscharmen Tallagen.
- **Lokale Emittenten:**
Nahemittenten (Industriestandorte, Landwirtschaft, Verkehrswege, Küstenregionen u.a.) müssen vor allem unter Berücksichtigung mikro-meteorologischer Faktoren einbezogen werden.

2 WIRKUNG DER ATMOSPHERISCHEN DEPOSITION AUF DIE GEWÄSSERSYSTEME

Für das Verständnis der Gewässerbelastung durch die "atmosphärische Deposition" müssen neben den Prozessen in der Atmosphäre und in der Vegetation die Wechselwirkungen von Boden, Gestein und Gewässer betrachtet werden.

2.1 Bodenversauerung und Puffersystem

In Böden und Gesteinen können eingetragene Säurebildner durch natürliche bodeninterne Pufferreaktionen gebunden werden. Das Puffervermögen von Böden und Gesteinen ist begrenzt. Bei Böden mit basenarmen Ausgangsgesteinen (Quarzit, Buntsandstein, Granit, Gabbro, Gneise, kalkarme Schiefer u.a.) ist die Pufferkapazität gegenüber dem anhaltenden Säureeintrag über den Luftpfad bereits vielfach überlastet. An der Bodenmatrix finden irreversible stoffliche Veränderungen statt. Dieser Prozeß dauert in der Regel über einen längeren Zeitraum an. Er ist meist an einem Absinken des pH-Wertes zu erkennen und wird daher als Versauerung bezeichnet.

Der pH-Wert ist damit ein wichtiges, aber nicht hinreichendes Kriterium, das auf Versauerung hinweisen kann. Mit Hilfe von Anionen-Kationen-Bilanzen, der Ermittlung der effektiven und totalen Austauschkapazität sowie der Bestimmung des Basen-Säuren-Zustandes (Alkalinität-Acidität) u.a. läßt sich der aktuelle Bodenzustand erfassen. Bereits abgelaufene Versauerungsschübe können erkannt werden, bevor pH-Wert-Änderungen eintreten.

Die Böden können nach Pufferbereichen klassifiziert werden. In den einzelnen Pufferbereichen tragen jeweils vorherrschende Reaktionen zur Pufferung eingetragener Säuren bei. Dabei bleiben die pH-Werte in den einzelnen Pufferbereichen relativ konstant.

- **Carbonatpufferbereich**

In kalkreichen Böden erfolgt die Abpufferung von Säuren im Carbonat- bzw. Kohlensäure-Hydrogencarbonat-Puffersystem (pH 8,6 - 6,2): Die Säuren werden durch basisch wirkende Carbonate neutralisiert. Dabei werden Calcium, Magnesium und Kohlensäure freigesetzt.

- **Silicatpufferbereich**

Im pH-Bereich 6,2 - 5,0 werden durch die Verwitterung von silicatischen Mineralen geringe Mengen an Protonen gebunden und basisch wirkende Kationen (Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium) freigesetzt.

- **Austauscher-Pufferbereich**

Im pH-Bereich 5,0 - 4,2 laufen vorwiegend Prozesse ab, die zu einem Verlust an Austauscherplätzen im Boden, zu einer hohen Sättigung der Austauscher mit Aluminium, zu einer starken Auswaschung von Calcium, Magnesium und Kalium und zu niedrigen Konzentrationen von Aluminium in der Bodenlösung führen.

- **Aluminiumpufferbereich**

Nach Auswaschung der Calcium- und Magnesiumvorräte erfolgt bei fortgesetzter Säurezufuhr ein weiteres Absinken des pH-Wertes im Boden. Im Aluminium- und Eisen-Pufferbereich (pH 4,2 - 2,4) setzt sich der säurebedingte Zerfall der Tonminerale fort. Charakteristisch ist die Auflösung von Aluminium- und Eisen-Oxiden bzw. -Hydroxiden. Mit fort-schreitender pH-Absenkung werden Aluminium und andere Spurenstoffe freigesetzt.

- **Eisen/Aluminiumpufferbereich**

Bei starker Versauerung (pH 3,8 - 2,4) werden Eisenionen aus Eisenoxiden in die Bodenlösung abgegeben.

Aus ökotoxikologischer Sicht haben Böden, die bis in den Bereich der Aluminiumpufferung versauert sind, einen kritischen Zustand erreicht. Alle typischen Eigenschaften der Böden erfahren starke Änderungen. Die Filter-funktion der Böden wird erheblich reduziert; die Böden selbst wirken zudem als Stoffquellen, indem sie vor allem Metalle freisetzen, die mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert werden.

Langjährige Untersuchungen an Waldböden und an Gewässern zeigen, daß in den letzten Jahren immissionsbedingte Boden- und Gewässerversauerungen an vielen Standorten in der Bundesrepublik eingetreten sind. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht muß eine besondere Beachtung dem Voranschreiten der Versauerung in größere Tiefen gewidmet werden. Besonders gefährdet sind immissionsbelastete Regionen mit basenarmen Böden und Grundwasserleitern, die sehr weiche Grundwässer aufweisen.

Die Versauerung des tieferen Untergrundes wird neben den wirksamen Pufferprozessen maßgeblich von der Fließdynamik des Sickerwassers bestimmt. Versauerungsfronten, die den Übergang vom Silicat- über den Austausch- zum Aluminiumpufferbereich markieren, lassen sich vor allem in Kluftgrundwasserleitern nicht eindeutig abgrenzen. Vielfach reicht die Geschwindigkeit der Pufferreaktion nicht aus, um zeitweilige Durchbrüche von Säure und Aluminium bei hoher Grundwasserneubildung zu verhindern. Grundsätzlich bleibt die hohe Pufferkapazität des nicht benetzten Boden- und Gesteinsmaterials ohne Wirkung, Daher treten in klüftigen Grundwasserleitern Säureschübe häufig als typische Erscheinung auf.

Abgesehen von irreversiblen Veränderungen des Bodenmaterials, besitzt der über mehr als hundert Jahre in den tieferen Untergrund eingetragene "Säurevorrat" eine äußerst langfristige Wirkung. Sie wird sich noch verstärken, solange die Säuredeposition das natürliche Freisetzungsvermögen basisch wirkender, also neutralisierender Substanzen übersteigt.

2.2 Auswirkungen von Säureeinträgen auf die Gewässer

2.2.1 Grundlagen

Immissionsbedingte Störungen des Basen-Säuren-Gleichgewichtszustandes in den Gewässern können durch Untersuchung und Bewertung der Anionen- und Kationengehalte rechtzeitig erkannt werden, bevor Absenkungen im pH-Wert eintreten (KRIETER, 1991).

Aus ökologischer Sicht können nach UHLMANN et al. (1992) drei Stadien der Gewässerversauerung unterschieden werden:

- I. Das Puffervermögen der Einzugsgebiete kompensiert die Säuredeposition zu jeder Zeit ohne wesentliche Auswirkungen auf die Grundwasser-beschaffenheit.
- II. Das Puffervermögen des Einzugsgebietes wird gelegentlich durch die Säuredeposition überschritten; dabei treten Versauerungsschübe auf.
- III. Die Säuredeposition überschreitet permanent das Puffervermögen des Einzugsgebietes. Der Zustand einer hochgradigen und progressiven Versauerung ist eingetreten.

Im Sickerwasser, Grundwasser sowie oberirdischen Gewässern aus Gebieten mit Carbonatgesteinen ist die stete Zunahme der Nichtcarbonathärte, die vornehmlich von Sulfaten aufgebaut wird, ein erstes Anzeichen für die Wirkung anthropogener Sulfateinträge.

Im weiteren Verlauf der Versauerung werden bei der Kalkauswaschung bzw. bei der Tonmineralverwitterung Alkalien und Erdalkalien freigesetzt, deren Gehalte im Sickerwasser ansteigen. Parallel dazu wird die Hydrogencarbonatbildung im Bodenwasser reduziert, so daß das ständige Absinken des Hydrogencarbonatgehaltes bei gleichzeitig ansteigenden Sulfatgehalten ein weiteres Indiz für eine Versauerung ist.

Beginnend bei einem pH-Wert von ca. 5 (Austauscherpufferbereich) und insbesondere ab einem pH-Wert 4,2 (Aluminiumpufferbereich) werden die Gewässer durch das beim Zerfall der Tonminerale freigesetzte Aluminium und durch weitere Metalle erheblich belastet. Vor allem der Grenzwert der Trinkwasserverordnung für Aluminium (0,2 mg/l) wird bereits heute in zahlreichen oberirdischen Gewässern und Grundwasservorkommen um ein Vielfaches überschritten.

2.2.2 Sicker- und Grundwasser

Bei Sickerwasseruntersuchungen in Flachstollen und Sickergalerien wurde ein deutliches Ansteigen der Sulfat- und Nitratgehalte gefunden, nachdem die Vorräte an austauschbaren Calcium- und Magnesiumanteilen erschöpft waren (KRIETER et al. 1984).

Erhöhte Aluminiumgehalte wurden in Sickerwasseruntersuchungen sowohl in Mittelgebirgsregionen als auch im norddeutschen Tiefland gefunden. Die Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen zeigen, daß die Versauerung der oberflächennahen Grundwasserleiter fortschreitet und in Einzelfällen bis in ca. 15 m Tiefe und mehr vorgedrungen ist. Es wurden Aluminiumgehalte bis über 10 mg/l nachgewiesen.

2.2.3 Fließgewässer

Chemische Veränderungen in Fließgewässern als Folge des Säureeintrages aus der Atmosphäre machen sich primär in weitgehend unbeeinflussten Gewässern in Waldgebieten bemerkbar. Abwasser und diffuse Einleitungen erhöhen das Puffervermögen der Gewässer und überdecken die Versauerungserscheinungen, heben ihre Wirkung aber nicht auf. Wichtigste Veränderungen im chemischen Gewässerzustand sind die Abnahme des Hydrogencarbonatgehaltes und die Zunahme der Metallgehalte bei pH-Absenkungen in den Fließgewässern.

Die Auswirkungen der Versauerung sind vom Niederschlags-Abfluß-Geschehen abhängig. Innerhalb weniger Stunden nach Einsetzen eines Regenereignisses oder nach der Schneeschmelze kann eine starke pH-Absenkung mit entsprechenden Konzentrationssprüngen (Aluminium, Sulfat, Nitrat etc.) erfolgen.

Durch die Verschiebungen in der chemischen Gewässerbeschaffenheit kommt es in den Bachläufen zu erhebliche Veränderungen in den Gewässerbiozöosen:

- Artenvielfalt und Artenzahl sind in versauerten Fließgewässern erheblich reduziert. Gerade die ökologisch wertvollen, unbelasteten Gewässeroberläufe reagieren empfindlich und können biologisch verarmen bzw. veröden. Diese Bereiche bilden das vorrangige biologische Reproduktionspotential für den gesamten Gewässerverlauf.

- Bei Fischen und anderen Lebewesen werden Wachstumsstörungen sichtbar.
- Säuretolerante Pflanzenarten, wie z.B. Sphagnum, dominieren im Gewässer.

2.2.4 Seen

Die hydrochemischen und biozönotischen Veränderungen in versauerten Seen sind ähnlich den Veränderungen in versauerten Fließgewässern. Zusätzlich bewirkt der Aluminiumeintrag eine Flockung und Fällung im Gewässer; versauerte Seen klären auf und die Sichttiefe nimmt zu. Im Sedimentaufbau auf dem Seegrund erfolgt eine Zunahme von photosynthetisch aktiven Organismen und der Metallkonzentrationen zur Oberfläche hin, die Erdalkali-Gehalte nehmen ab. Der zeitliche Verlauf der Gewässerversauerung in der Vergangenheit kann durch paläolimnologische Untersuchungen nachvollzogen werden.

2.3 Auswirkungen von Stickstoffeinträgen auf die Gewässer

Die Immission von Stickstoffverbindungen in Waldökosysteme bis 90 kg N/ha a ist um ein Mehrfaches höher als die Stickstoffaufnahme der Bäume, die max. 20 kg N/ha a betragen kann (MATZNER et. al 1990).

Im Zusammenhang mit dem Anstieg der Stickstoffdeposition ist auch eine Zunahme der Nitratkonzentrationen im waldbürtigen Grundwasser zu verzeichnen. Die meisten Waldökosysteme sind allerdings noch in der Lage, einen Teil der deponierten Stickstoffmengen aufzunehmen; die Stickstoffausträge sind in der Regel kleiner als die Einträge. Diese Schutzfunktion der Wälder für das Grundwasser ist nicht selbstverständlich. Da ihr Stickstoffspeichervermögen begrenzt ist, gelangen sie allmählich in einen Zustand der Stickstoffsättigung. Über den Bedarf und das Speichervermögen hinausgehende Stickstoffeinträge werden wieder aus dem Ökosystem entlassen. Das geschieht vor allem durch Auswaschung von Nitrat in die Gewässer.

In der Regel sind die Grundwässer aus bewaldeten Gebieten geringer mit Nitrat belastet als die Grundwässer aus landwirtschaftlich und urban genutzten Gebieten. Die zukünftigen Nitratreinträge in das Grundwasser unter Wald werden aber auch von der Höhe der Stickstoffimmissionen aus der Luft abhängen. Bei Neuaufforstung von Ackerflächen oder gedüngtem Grünland, die das Ziel verfolgt, die Schutzfunktion des Waldes für die Grundwasserbewirtschaftung auszunutzen, ist eine vorherige Stickstoffabmagerung der Standorte notwendig. Das heißt, die aus vorherigen Nutzungen stammenden Stickstoffvorräte müssen mit Hilfe einer geeigneten Fruchtfolge den Böden entzogen werden.

Die Nährstoffbelastung der Küstengewässer hat in den vergangenen Jahrzehnten erheblich zugenommen. Über Elbe, Weser und Ems werden beispielsweise pro Jahr etwa 250.000 t Stickstoff in die Nordsee transportiert. An den küstennahen Depositions-Meßstationen werden im Freiland Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre in Höhe von 10 - 15 kg N/ha·a (Nitrat-N plus Ammonium-N) gemessen. Die Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre sind deshalb bei Nährstoffbilanzen für die Küstengewässer zu berücksichtigen.

2.4 Auswirkungen von organischen Luftverunreinigungen und Schwermetallen auf die Gewässer

2.4.1 Wirkung organischer Luftverunreinigungen

Die Deposition organischer Schadstoffe ist in Waldgebieten, vergleichbar den Prozessen bei anorganischen Stoffen, gegenüber Freiland deutlich erhöht. Durch Adsorption und mikrobiellen Abbau wird ein Teil in der oberen Bodenschicht zurückgehalten. Geringe Adsorptionskapazität und biologische Aktivität, verbunden mit hoher Durchlässigkeit, begünstigen die Auswaschung. Persistenz der organischen Stoffe und Fließbedingungen im Grundwasserleiter bestimmen das Ausmaß der weiteren Belastung.

Die in der Größenordnung von 2,5 Mio Tonnen pro Jahr emittierten organischen Stoffe treten ubiquitär auf. Etliche Einzelsubstanzen mit atmosphärischer Herkunft wurden bislang im Sicker- und Grundwasser nachgewiesen, zum Teil mit Konzentrationen im Bereich der Trinkwasser-Grenzwerte. Der Gesamtumfang des Gefährdungspotentials und der beteiligten Stoffe ist nicht geklärt.

2.4.2 Wirkung von Schwermetallen

Die Deposition von Schwermetallen hat mit Einsatz moderner Filtertechniken und Einführung bleiarmer Kraftstoffe stark nachgelassen. Dennoch trägt sie zur weiteren Vermehrung des in den Böden seit Jahrzehnten angesammelten Schwermetallvorrats bei. Bei anthropogener Versauerung wird dieser Vorrat mobilisiert und zusammen mit freigesetzten Metallen aus dem Boden in Richtung Grundwasser verlagert. Wiederausfällung oder Weitertransport werden dann von den im tieferen Sickerraum und im Grundwasserkörper wirksamen Puffervorgängen gesteuert.

In versauerten Seen und Fließgewässern werden ausgefällte Schwermetalle im Sediment angereichert. Hier können sie bei saisonal auftretenden Versauerungsschüben remobilisiert werden und die Biozönosen gefährden. Versauerungsschübe führen in Sedimenten der Bachunterläufen zu einer Anreicherung labil gespeicherter Schwermetalle bis weit außerhalb der ständig versauerten Oberläufe.

2.5 Auswirkungen der Bodenversauerung und der Waldschäden auf das Abflußregime

Waldstandorte sind durch eine Mehrverdunstung gegenüber anderen Vegetationsarten gekennzeichnet. Wegen des großen Rückhaltevermögens von Vegetation und Waldboden haben sie eine Retentionsfunktion im Wasserhaushalt. Flächige Waldschäden und Veränderungen des Bodenzustandes bewirken eine Zunahme des Gesamtabflusses in den Einzugsgebieten.

Die Veränderung des Abflusses durch Waldschäden wird vor allem gesteuert durch:

- Abnahme der Interzeptionsverdunstung infolge Kronenverlichtung oder Baumverlust,
- Abnahme der Transpirationsverdunstung,
- Zunahme der Schneedeckenmächtigkeit und Veränderung des Auf- und Abbaus der Schneedecke.

An ebenen und flachgeneigten, gut durchlässigen Standorten kann die Grundwasserneubildung zunehmen. Stärkeres Geländere relief begünstigt den oberflächennahen Hangabfluß bzw. den Direktabfluß. Der Grundwasserabfluß ist in solchen Gebieten rückläufig. Veränderungen des Bodenprofils (z.B. durch Verdichtung oder Erosion) verstärken in der Regel diesen Effekt. Im Extremfall können die zunehmenden Hochwasserspitzen massive Erosionsschäden verursachen.

Fallstudien deuten an, daß in den Mittelgebirgen erst nach großflächigem Waldverlust stärkere Abflußänderungen mit erhöhten Hochwasserspitzen zu erwarten sind. Durch Erhalt der Bodenvegetation und des Waldbodens in seiner Rolle als tief durchwurzelter Wasserspeicher kann die Ausbildung von Hochwasserspitzen in Grenzen gehalten werden.

In Teilen des Alpenraumes wird bei einer starken Zunahme der Waldschäden der heutige Zustand in den Wildbacheinzugsgebieten mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln nicht aufrechtzuerhalten sein (ROSEMANN, 1989).

2.6 Wasserwirtschaftliche Wertung des Stoffeintrages

Wasserwirtschaftspolitik hat die Verbesserung und Sicherung der vom Wasser abhängigen oder beeinflussen Lebensbereiche zum Ziel. Zu den besonderen Aufgaben der Wasserwirtschaftsverwaltungen gehört deshalb der Schutz des Grundwassers und der oberirdischen Gewässer vor Schadstoffbelastungen, die Sicherstellung der Versorgung mit Trinkwasser in ausreichender Menge und Beschaffenheit und die Erhaltung "gesunder" aquatischer Lebensräume. Die dargestellte Gefährdung durch atmosphärische Depositionen und die eingetretenen Schäden erfordern entsprechende Maßnahmen.

2.6.1 Trinkwasseraufbereitung

Grenzwertüberschreitungen nach der Trinkwasserverordnung lassen sich zum Teil durch Optimierung der Trinkwasseraufbereitung verhindern. Die Aufbereitung versauerter Rohwässer ist vielfach bei kleinen Wasserversorgern technisch unzureichend und in der Anlagenbetreuung mangelhaft.

Hauptprobleme sind derzeit die Einstellung des pH-Wertes laut Trinkwasser-verordnung und die Elimination des Aluminiums. Eine praktikable Eliminationstechnik für Fluorid existiert noch nicht. Aufgabe der Wasserwirtschaftsverwaltungen ist es, technische Vorgaben zu erarbeiten und bei der Verbesserung von Altanlagen beratend mitzuwirken.

Die Versorgungssituation in den versauerungsgefährdeten Gebieten ist im Detail zu erfassen. Die Umstellung von Hausversorgungen ohne Aufbereitung muß gegebenenfalls sichergestellt werden, vor allem bei akuter Gefährdung durch Kupfer oder Blei aus Leitungen.

Nitrat wird an den meisten Aufbereitungsanlagen nicht eliminiert. Auch für die Entfernung organischer Mikroverunreinigungen fehlen in der Regel die technischen Voraussetzungen.

Durch gründliche trinkwassertechnische Voruntersuchungen lassen sich Kosten teilweise vermindern und Fehlentscheidungen vermeiden. Weiterhin sind langfristige Monitoring-programme der Deposition und ihrer Belastungspfade wichtige Instrumente der vorausschauenden Planung und Beratung.

2.6.2 Grundwasserschutz im Einzugsgebiet

Der Schutz des Grundwassers gegen Eintrag atmosphärischer Schadstoffe durch Maßnahmen in den Einzugsgebieten ist nicht generell möglich. Empfohlen und zum Teil durchgeführt werden:

- Kalkungen zur Kompensation des Säureeintrages,
- Waldwirtschaftliche Maßnahmen zur Minderung der Säurebelastung, zur qualitativen Verbesserung des Sickerwassers und zur Regelung des Abflußregimes.

Kalkungen sind langgeübte forstliche Praxis. Sie können von wasserwirtschaftlichem Nutzen sein, wenn sie dem Erhalt oder der Wiederbegründung von Wäldern mit Gewässerschutzfunktion dienen. Mäßig dosierte, zeitlich und flächig ausreichend gestaffelte Kalkungen mindern die für das Grundwasser nachteiligen Wirkungen. Als solche können auftreten:

- Zeitweilige, u.U. starke Zunahme des Nitrataustrags mit dem Sickerwasser, da die Humuszersetzung angeregt wird,
- dadurch Bildung von Salpetersäure und - im Gegensatz zum Oberboden - weitere Versauerung der tieferen Bodenschichten,
- Verdrängung und Verlagerung von Aluminium und Schwermetallen in Richtung Grundwasser.

Eine großflächige Alkalisierung (Entsäuerung) des Sicker- und Grundwassers ist - auch bei Inkaufnahme der Nachteile - nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand kaum möglich, denn

- der atmosphärische Säureeintrag wird unvollständig abgepuffert,
- das im tieferen Sickerraum angesammelte Säurepotential wird nicht neutralisiert und bleibt weiter wirksam,
- die zumindest für eine Entsäuerung der oberen Bodenschichten erforderliche Kalkmenge und ihre tiefe Einarbeitung ist ökonomisch nicht mehr vertretbar und ökologisch umstritten.

Waldbauliche Maßnahmen, wie Pflege standortgerechter, gesunder, langfristig verjüngter Laub- und Mischwälder tragen generell zur Stabilisierung der Grundwasserschutzfunktion des Waldes bei. Haupteffekte sind:

- Verminderung der Depositionsraten von Schadstoffen (gegenüber Nadelwald),
- Verbesserung der Filterfunktion des Bodens durch günstigen Substrataufbau und ausgeglichene Nährstoffverhältnisse,
- Verminderung massiver biotischer und abiotischer Waldschädigungen.

2.6.3 Schutz von Fließgewässern und Seen

Direkte Kalkung versauerter Gewässer wird zur Aufrechterhaltung der Fischereiwirtschaft betrieben. Es gibt Versuchsergebnisse, die eine Verbesserung der Gewässerqualität nach Kalkung des Einzugsgebietes nachweisen. Die neutralisierende Wirkung erfolgt dabei vorrangig über den bodennahen Grundwasserabfluß bzw. den oberflächennahen Bodenabfluß in Hanglagen. Die für Mittelgebirge typischen Versauerungsschübe (nach Schneeschmelze oder Starkregen) lassen sich in der Regel nicht abfangen.

Aus gewässerökologischen Gründen erhaltenswert ist der naturnahe, ursprünglich schwach saure Charakter der Gewässer in den kalkfreien Regionen. Beim Artenschutz (z. B. Erhalt der Flußperlmuschel) ist er dringend erforderlich. Es gibt Versuchsergebnisse, die eine Verbesserung der Gewässerqualität nach Kalkung des Einzugsgebietes nachweisen. Im Gegensatz zum Grundwasser trägt der Kalk seine alkalisierende Wirkung über den hangparallel oberflächennahen Bodenabfluß in das Gewässer. Eine allgemeine Voraussage der Wirkungen ist nicht möglich.

2.6.4 Emissionsminderung

Ihre Aufsichtspflicht über die Gewässer und den Erhalt der Trinkwasser-versorgung gebietet den Wasserwirtschaftsverwaltungen, vordringlich auf die Ursachen depositionsbedingter Schäden hinzuweisen. Dies geschieht durch:

- Nachweis der Ursache- Wirkungsbeziehungen
- Darstellung von Gefährdungspotentialen
- Darstellung des Aufwands und der Erfolgsaussichten von Symptombehandlungen
- fachpolitisches Hinwirken auf gesetzliche Maßnahmen zur Minimierung der Emission gewässerschädigender Stoffe.

Der allgemeine Schutz des Grundwassers, der Seen und Fließgewässer vor anthropogenen Schadstoffdepositionen ist langfristig nur über die konsequente Verminderung des Schadstoffausstoßes in die Atmosphäre möglich.

3 DERZEITIGE SITUATION UND WEITERES VORGEHEN

3.1 Meßaufgaben der Wasserwirtschaftsverwaltung

3.1.1 Gefährdungspotential

Durch ihre großräumig diffuse Erscheinungsform, die ein Abgrenzen auf Einzugsgebiete nicht zuläßt, unterscheiden sich depositionsbedingte Einflüsse grundsätzlich von unmittelbaren oder lokalen Einwirkungen auf das Gewässer. Die Reaktionszeiten bis zur Wirkung im Gewässer, insbesondere im Grundwasser, können sehr lang sein, entsprechend lang sind auch die Zeiten bis zur wirksamen Regeneration der Gewässer. Dadurch entziehen sich diese Vorgänge den üblichen Schutz- und Ordnungsmaßnahmen der Wasserwirtschaft und erfordern im besonderen Maße vorausschauende Überlegungen zur Erfassung und Bewertung des Schadstoffeintrages über den Luftpfad sowie der Transformationsprozesse durch die Vegetation und die das Grundwasser überlagernden Boden- bzw. Gesteinsschichten.

3.1.2 Bestehende Meßprogramme

Das UBA betreibt ein bundesweites Depositionsmeßnetz mit 30 Meßstellen zur Überwachung des großräumigen Schadstoffeintrags und der daraus resultierenden Wirkungen auf Ökosysteme, Böden und Gewässer.

Die meisten Depositionsmeßprogramme der Länder sind schwerpunktmäßig auf Wirkungsanalysen und immissionsökologische Schadensbewertungen ausgerichtet. Unter diesen dominieren die Meßprogramme der Forstbehörden (Waldklimastationen). Daneben existieren vereinzelte Immissions- und Depositionsmeßprogramme von Forschungsanstalten und Umweltdienststellen des Bundes und der Länder. Allein auf wasserwirtschaftliche Belange, vor allem auf den allgemeinen Grundwasserschutz ausgerichtete, landesweite Depositionsmeßprogramme wurden bislang nur in einigen Bundesländern (Niedersachsen, Schleswig - Holstein, Thüringen) verwirklicht. In anderen Bundesländern wird der Aufbau vorbereitet.

Weitere Meßprogramme, bei denen ursprünglich andere Belange im Vordergrund standen oder Auslöser waren, berühren auch gewässerkundliche Interessen (z.B. Bodenversauerung - Grundwasser) oder bedürfen wegen der Wechselwirkungen mit den Gewässern (z.B. Gewässerversauerung - Aquafauna) hydrologischer Beiträge. Beispiele für derartige fachübergreifende Arbeiten sind die Untersuchungen von Waldschäden - Bodenversauerung - Gewässerversauerung in Rheinland-Pfalz und die Depositionsmeßprogramme mit waldökologischer Wirkungskontrolle und begleitenden Zusatzuntersuchungen von Vegetation und Böden sowie Untersuchungen der Sickerwasserbeschaffenheit in Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen und Bayern, die von Landes- und Bundesbehörden durchgeführt werden. Ein Beispiel für eine Fallstudie der Wasserwirtschaft, bei der gewässerkundliche Fragen des Stoffumsatzes in Einzugsgebieten und der Grundwasserkontamination behandelt werden, ist das Entwicklungsvorhaben in Bayern "Auswirkungen des sauren Regens und des Waldsterbens auf das Grundwasser."

3.1.3 Gewässerkundliche Untersuchungsziele

Gewässerkundliche Depositionsmeßnetze sollen die ständige Erfassung und Prognose der Auswirkungen des atmosphärischen Stoffeintrages auf die Beschaffenheit der Gewässer ermöglichen. Folgende Aufgaben stehen im Vordergrund:

- Bewerten der Deposition bezüglich ihrer Auswirkungen auf Ausmaß, Dauer und Verlauf von Gewässerbelastungen,
- Vorsorgender Gewässerschutz im Hinblick auf das Gewässerschädigungspotential atmosphärischer Schadstoffe und Kontrolle wasserwirtschaftlicher Sanierungsmaßnahmen,
- Erarbeitung von kritischen Belastungsgrößen im Hinblick auf Gewässerschädigungen (critical loads) und Kontrolle wasserwirtschaftlicher Sanierungsmaßnahmen,
- Früherkennung von Belastungsspitzen und Gefahrenabwehr im Bereich der Gewässernutzung, z.B. der Trinkwassergewinnung,
- Bewertung von Schadstoffeigenschaften, Retentions- und Abbaupotentialen im Wasser- und Stoffkreislauf.

Im Rahmen der Niederschlagsuntersuchung sind vorrangig jene Stoffgruppen zu erfassen, die direkt oder durch Freisetzung anderer Stoffe über die Vegetation oder den Boden eine Veränderung der Wasserbeschaffenheit, der Gewässerökologie oder des gewässerbezogenen Stoffkreislaufes bewirken. Um derartige Zusammenhänge aufdecken zu können, sind entsprechende standort-bezogene Messungen auch in den der Deposition nachgeordneten Ebenen des Wasser- und Stoffkreislaufes, z.B. im Sickerraum, im Grundwasser oder in den oberirdischen Gewässern erforderlich. Sie werden nur zum Teil von den vorhandenen Meßnetzen abgedeckt.

3.2 Grundlagen für ein gewässerkundliches Depositionsmeßnetz

3.2.1 Stand der Gerätetechnik

Wasserwirtschaftlich relevante Grundlagen zur Ermittlung der Stoffdeposition sind im Entwurf des DVWK-Merkblattes "Grundsätze zur Ermittlung der Stoffdeposition" dargelegt. Meßnetze der staatlichen Wasserwirtschafts-verwaltung sollten, um vergleichbare Meßergebnisse zu erzielen, entsprechend diesen Grundsätzen betrieben werden. In diesem Merkblatt werden verschiedene, unterschiedlich aufwendige Meßverfahren vorgestellt. Die Spanne reicht von einfachen bulk-Meßmethoden bis zu aufwendigen Verfahren für Erfassung der nassen und trockenen Deposition. Die jeweilige Fragestellung sowie Kosten-Nutzenüberlegungen sind für die Auswahl des Verfahrens maßgebend:

- Mit Hilfe von bulk-Sammelverfahren werden die nasse Deposition und der sedimentierte Anteil der trockenen Deposition in festgelegten Sammelperioden erfaßt (Niederschlagsdeposition). Dieses Verfahren kann zur akzeptorunabhängigen Depositionsmessung im Freiland angewendet werden. Im Waldbestand werden die bulk-Sammler eingesetzt zur Erfassung der Kronentraufe. Zur Abschätzung der gesamten Bestandsdeposition ist zusätzlich der Stammablauf zu messen. Der Stand der Technik ist in der Regel leicht erreichbar. Das bulk-Sammelverfahren ist für Langzeituntersuchungen im Rahmen von Meßnetzen geeignet. Die zeitliche Auflösung der Messungen kann dem Bedarf angepaßt werden.

- Die Auftrennung der Niederschlagsdeposition in Naß- und Trockenanteile ist durch den Einsatz spezieller Gerätetypen möglich. Mit Wet-Only-Sammlern kann die nasse Deposition bestimmt werden. Geräte zur Erfassung der nassen Deposition sind u.a. beschrieben in WINKLER & JOBST 1989, WINKLER et al. 1993 und VDI-Richtlinie 3870.
- Die üblicherweise eingesetzten Kunststoffsammler sind im wesentlichen für die Untersuchung anorganischer Stoffe geeignet. Für organische Problemstoffe bedarf es anderer Gefäßmaterialien (Glas, Metall) und zum Teil aufwendiger Auffangtechniken (z.B. Kühlfallen), bei denen zum Teil noch ein Entwicklungsbedarf besteht.
- Die über den fallenden Niederschlag hinausgehende akzeptorabhängige Deposition (Nebel, Tau, Reif, Aerosole, ab- und adsorbierte Gase und haftengebliebene Stäube) lassen sich mit routinemäßig einsetzbaren Meßverfahren nicht erfassen.

Für die zur Ergänzung von Depositionsmessungen notwendigen gewässerkundlichen Messungen, wie z.B. zur Erfassung der Sickerwasserbeschaffenheit und der Sickerwassermenge, sind geeignete Methoden auszuwählen.

3.2.2 Meßnetzplanung

Das Meßnetz ist entsprechend den Zielsetzungen zu gestalten. Bei der Planung großräumiger Netze können zwei Grundansätze unterschieden werden:

- das Rasternetz nach geostatistischen Gesichtspunkten und
- das orographische Gegebenheiten und pragmatische sowie aufgabenbezogene Vorgaben berücksichtigende Netz.

In der Praxis werden beide Grundansätze zu berücksichtigen sein.

Das geostatistische Verfahren, wie es in den DVWK-Materialien 4/1992 beschrieben ist, stellt einen Zusammenhang zwischen der Gitterweite eines Meßrasters und der für ein flächenrepräsentatives Meßnetz geforderten räumlichen Auflösung der Meßdaten und der Zuverlässigkeit der Mittelwerte her. Das Verfahren wurde an methodisch uneinheitlich erhobenen bulk-Meßdaten erprobt. Weiterhin blieben die orographischen Gegebenheiten an den einzelnen Stationen (z.B. Luv- oder Lee-Lage, Höhenlage) unberücksichtigt.

Mit dem auf die örtlichen, orographischen Gegebenheiten eingehenden, methodisch einheitlichen Meßnetz werden dagegen Depositionsdaten ermittelt, die für bestimmte Gebiete, z.B. Luv- und Lee-Hänge, Einzugsgebiete, Grundwasserlandschaften oder wasserwirtschaftliche Problemzonen, repräsentativ sein sollen. Dabei müssen auch Waldbestände angemessen berücksichtigt werden. Zweckmäßig ist ein sukzessiver Aufbau eines großräumigen Grundmeßnetzes. Beim Aufbau können Verfahren optimiert und Betriebserfahrungen hinsichtlich der Eignung der Meßorte gesammelt werden.

Neben diesen großräumigen Netzen gibt es lokale Netze oder einzelne Meßstellen, die Untersuchungen an einem bestimmten Objekt dienen, z.B. Versauerung eines Sees, Beschaffenheit des Sickerwasser.

Um Einzelmeßstellen später in ein flächenrepräsentatives Meßnetz integrieren zu können, sollte - soweit dies der objektbezogene Meßzweck erlaubt - bei der Standortauswahl bereits die spätere Aufgabe der Meßstelle im Meßnetz berücksichtigt werden.

3.2.3 Meßmethoden

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit des Datenmaterials ist ein durchgängiges Qualitätssicherungssystem notwendig. Dies umfaßt den Bereich der Probennahme, den Probentransport und die Probenbehandlung sowie vergleichbare Analysenverfahren mit analytischer Qualitätssicherung.

3.2.4 Datenaufbereitung und -bereitstellung

Neben der Probennahme, der Probenbehandlung und der chemischen Analyse hat auch die Art der Datenaufbereitung Auswirkungen auf die weitere Bewertung. Es ist notwendig, Grundsätze der Plausibilitätsprüfung und der Auswertung zu erarbeiten, welche den speziellen Eigenschaften von Niederschlagsbeschaffenheitsdaten gerecht werden. Entsprechendes gilt auch für die Formen der Datendarstellung und Datenbereitstellung.

Beispielhaft seien folgende Punkte genannt:

- **Datenaufbereitung**

- . Plausibilitätsprüfung der Datensätze, Berücksichtigung von Datenlücken, Zuordnung von Meßintervallen für statistische Zwecke (z.B. Ermittlung von Monatssummen),
- . Berücksichtigung von Stoffkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze,
- . Eliminieren von Ausreißern (Definieren der Kriterien für verschiedene Parameter, Erkennen von Laborfehlern und nicht depositionsbedingte Ursachen wie z. B. Pollenblüte oder Vogelkot).

- **Datenbereitstellung**

- . Informationsgehalt eines Datensatzes,
- . Datenformat für den Datenaustausch,
- . Verfahren und Formen für die Darstellung der Meßergebnisse (Zeitreihen und flächenhafte Darstellung),
- . Formen der Publikation.

3.2.5 Abstimmung der Fachbehörden

Das Gesamtausmaß und die Wirkungszusammenhänge berühren die Interessen verschiedener Fachdisziplinen: Luft, Boden, Wasser, Forst. Es ist eine Koordination der Arbeiten zur Depositionserfassung und eine gemeinsame, interdisziplinäre Datenbewertung anzustreben.

3.3 LAWA-Richtlinie

Die Deposition von Stoffen aus der Atmosphäre ist ein Phänomen, das großräumig betrachtet werden muß. Es ist daher notwendig, Meßdaten zwischen den einzelnen Ländern auszutauschen und Meßdaten mehrerer Länder für großräumige, vergleich- und übertragbare Untersuchungen und Beurteilungen zu verwenden. Derartige Auswertungen sind jedoch nur mit homogenen Daten möglich. Es ist daher notwendig, für alle Schritte, von der Messung bis zur Datenaufbereitung, einheitliche Regelungen zu treffen. Dies könnten zweckmäßigerweise in einer LAWA-Richtlinie, vergleichbar z.B. der Grundwasser - Richtlinie, erfolgen. Diese Richtlinie sollte mit den Stellen außerhalb der Wasserwirtschaftsverwaltung, die sich ebenfalls mit Niederschlagsbeschaffenheitsmessungen beschäftigen, abgestimmt sein.

Sie sollte auf folgende Punkte eingehen:

- **Grundlagen**
 - Begriffsdefinitionen, Stoffeigenschaften, Transportvorgänge, Reaktionen, gewässerkundliche Auswirkungen,

- **Meßnetz**
 - Ziele, Anforderung, Einrichtung, Abstimmung mit anderen Sachbehörden, Kombination mit anderen Meßnetzen,

- **Meßstellen**
 - Anforderungen an den Aufstellungsort, Standard-Meßgeräte und Sonder-Meßgeräte, Art der Geräteaufstellung, Kombination mit Messungen im Sickerwasser und in Gewässern, Erheben lokaler Zustandsdaten,

- **Geräte, Unterhaltung und Wartung**

- **Probennahme und Probenbehandlung**
 - Sammeltechnik, Sammelperioden, Probenstabilisierung, Probenversand, für Probensammlung und -versand zulässige Materialien, Qualitätssicherung,

- **Laboranalyse**
 - Verfahren der Probenaufbereitung, Analyseverfahren, Qualitäts-sicherung,
- **Parameterkatalog**
- **Prüfen und Aufbereiten der Daten**
 - Plausibilitätskontrollen, statistische Prüfverfahren, graphische Darstellungen zur optischen Datenkontrolle,
- **Auswertung und Publikation**
 - Statistische Auswertungen, flächenhafte Darstellungen, graphische und tabellarische Darstellung von Zeitreihen, Formen der Publikation, Regelungen für den Datenaustausch.

4 FAZIT

- **Atmosphärische Deposition ist ein emissionsbedingter Prozeß.** Es besteht de facto ein Bilanzgleichgewicht zwischen Emission und Deposition. Die Stoffeinträge weisen ein anhaltend hohes Niveau auf. Die Wirkungen sind weiträumig und lang andauernd. Emissionsferne Standorte sind gleichermaßen betroffen.

- **Atmosphärische Depositionen führen zu einem wasserwirtschaftlich bedeutsamen Eintrag von**
 - Säurebildnern
 - Nährstoffen
 - toxikologisch relevanten Stoffen.Sie sind maßgeblich an der ubiquitären Verbreitung bestimmter Schadstoffe beteiligt.

- **Potentielle Schädigungsmechanismen wirken über die wäßrige Phase auf den Wasser- und Stoffkreislauf.**

- **Säureeinträge führen zu irreversiblen Schädigungen** der Puffereigenschaften von Böden. Die Schädigung schreitet zur Tiefe fort. Beschaffenheitsänderungen der Gewässer insbesondere des Grundwassers werden beobachtet. Damit verbundene Schädigungen sind dauerhaft, im Trend ansteigend und nachhaltig.

- **Atmosphärische Deposition führt ferner zu Veränderungen terrestrischer und aquatischer Biozöosen und mittelbar zur Beeinflussung des Wasserhaushalts.**

- Die Beschaffenheit der Niederschläge ist eine treibende Kraft für die Veränderungen, die in allen gefährdeten Gewässersystemen erfolgen. **Zur Klärung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen muß die Wasserwirtschaftsverwaltung die Beschaffenheit der Niederschläge mit ihren Auswirkungen auf Sickerwasser, Grundwasser und oberirdische Gewässer in ihre Überwachungstätigkeit einbeziehen.**
In Deutschland gibt es bislang noch kein großräumig und langfristig bestehendes Meßnetz, das die Belange der Wasserwirtschaft ausreichend berücksichtigt.

Ziel dieser Überwachung muß sein:

- Bewerten der Deposition bezüglich ihrer Auswirkungen auf Ausmaß, Dauer und Verlauf von Gewässerbelastungen,
 - vorsorgender Gewässerschutz im Hinblick auf das Gewässerschädigungspotential atmosphärischer Schadstoffe und Kontrolle wasserwirtschaftlicher Sanierungsmaßnahmen,
 - Erarbeitung von kritischen Belastungsgrößen im Hinblick auf Gewässerschädigungen,
 - Früherkennung von Belastungsspitzen und Gefahrenabwehr im Bereich der Gewässernutzung, z.B. der Trinkwassergewinnung,
 - Bewertung von Schadstoffeigenschaften, Retentions- und Abbaupotentialen im Wasser- und Stoffkreislauf.
- Die enge Verknüpfung der für die Wasserwirtschaftsverwaltung bedeutsamen Niederschlags-Problematik mit den anderen Bereichen der Umweltüberwachung macht eine **enge Zusammenarbeit mit den betroffenen Fachdisziplinen** notwendig und erfordert eine Vergleichbarkeit der Überwachungsergebnisse.
 - Innerhalb der Wasserwirtschaft der Länder ist **eine länderübergreifende Überwachung nach gleichen Grundsätzen anzustreben.**
 - **Als Grundlage hierfür wird vorgeschlagen, eine der Grundwasser-Richtlinie vergleichbare Regelung zu erarbeiten.**

Literatur

BARTH, H. (1986): Reversibility of Acidification, Proceedings of workshop by the N.T.N.F., CEC Notway

BAY. LA. F. WASSERFORSCHUNG (1988): Gewässerversauerung im nord- und nordost-bayerischen Grundgebirge. Bericht der Bayerischen Landesanstalt für Wasser-forschung, 295 S., München.

BAY. LA. F. WASSERWIRTSCHAFT (1992): Nitrateintrag in das Grundwasser unter Waldgebieten in Bayern. Informationsberichte des Bayer. Landesamtes für Wasserwirtschaft Heft 6/92.

BEESE, F. (1989): Schadensbegrenzung durch Bodenschutzkalkung. In: Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer? DVWK-Mitt. 17, S. 453-464.

COX, R.A. & PENKETT, S.A. (1983): Formation of atmospheric acidity. In: Beilke, S./Elshout, A.J., S. 56-81.

DÄSSLER, H.-G. (1991): Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Vegetation, Gustav Fischer Verlag, Jena.

DICKSON, W. (1985): Acid rain in Sweden: effects on lake systems. In: Lakes pollution and recovery, International Congress, Rome, 15.-18.04.85, Proceedings-Reprints.

DVWK (1993): Merkblatt: Inhaltsstoffe des Niederschlags

FABIAN, P. (1990): Atmosphäre und Umwelt, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York,

FLÜGGE, G. (1987): Eutrophierung der Nordsee. In: Umweltvorsorge Nordsee - Belastungen, Gütesituation, Maßnahmen. Der Niedersächsische Umweltminister (Hrsg.), Hannover.

FOWLER, D. (1980): Removal of sulfur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and dry deposition. In: Drablos, D./Tollan, A., S. 22-32.

HÖLSCHER, J. & WALTHER (1986): Belastung von Wasser und Boden in der Bundesrepublik Deutschland durch Luftverunreinigungen - Literaturstudie Stand 1985. In: Mitteilungen aus dem Niedersächsischen Landesamt für Wasserwirtschaft, Heft 2.

KRIETER, M. (1984): Ökosystemare Untersuchungen zur Versauerung der Hydrosphäre im südlichen Taunus und Hunsrück. In: UBA (1984).

KRIETER, M. (1991): Wasserkreislauf und Saure Niederschläge. In: Geographische Rundschau, GR 43, H. 6, S. 326-333.

KRIETER, M. & K. HABERER (1985): Gefährdung des Grundwassers durch saure Niederschläge. In: Vom Wasser 64.

LAHL, U. & A. LÜKEWILLE (1990): Betroffenheit von Trinkwasservorkommen in Ost-Westfalen durch Luftverschmutzung. In: gwf-wasser-abwasser 131, Nr. 2, S. 74-78.

LAMMEL, G. (1991): Wolke und Nebel aus luftchemischer und ökotoxikologischer Sicht, UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 3 (4), Seite 242-251.

LANDESAMT FÜR WASSERHAUSHALT UND KÜSTEN SCHLESWIG - HOLSTEIN (1988): Untersuchung der Niederschlagsmenge und der Niederschlagsbeschaffenheit für 1985 - 1987 in Schleswig - Holstein, 41 s., Kiel.

LENHARDT, B., STEINBERG, CHR. (1984): Limnochemische und limnobiologische Auswirkungen der Versauerung von kalkarmen Oberflächengewässern. In: Informationsberichte Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 4/84.

LFW-RHEINLAND PFALZ (1991): Grundwasserversauerung in Rheinland-Pfalz - Literaturstudie über Stand und Entwicklung. Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit P. Benecke, 57 S., Mainz.

MATTHIAS, U. (1983): Zur Problematik der Gütebeurteilung von sauren Fließgewässern. In: z. Wasser Abwasser Forsch. (16) Nr. 3, S. 107-110.

MATZNER, E. & K.J. MEIWES (1990): Deposition von Stoffen, speziell Stickstoff in Waldökosystemen. In: Veröffentl. Inst. für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, 48, S. 225-242.

MATZNER, E. (1984): Die Wirkung saurer Niederschläge auf den Boden und über die Rhizosphäre auf die Waldbestände. In: Wissenschaft und Umwelt 2/84, S. 72-77.

Neutze, A., Pohlmann, H. (1993): Empfehlungen zur Planung eines flächenrepräsentativen Meßnetzes für Niederschlagsdepositionen, DVWK-Materialien

NLÖ (1993): Gewässergüteüberwachung Niedersachsen - Grundwasserbericht 1991/ 1992. In Vorbereitung, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim.

NORTON, S.A., LINDENBERG, S.E. & PAGE, A.L. (1990): Acidic Precipitation.

PLATE, E.A., PFAND, A. & PASCHKE, G. (1986): Auswirkungen der Waldschäden auf die Wasserwirtschaft aus quantitativer Sicht. - Literaturstudie. Mitt. Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft TH Karlsruhe.

ROSEMANN, H.-J. (1989): Auswirkungen der neuartigen Waldschäden auf das Abflußgeschehen bei Hochwasser. Wasser + Boden 8/1989, S. 480-482.

SAGER, H., BITTERSÖHL, J., HAARHOFF, T., HABERGER, I. & MORITZ, K. (1990): Fate of atmospheric deposition in small forested catchments depending on lokal factors. International Conference on Water Resources in Mountains Regions IAH/IAHS, 733-739, Lausanne.

SAUTER, U. & K.J. MEIWES (1990): Auswirkung der Kalkung auf den Stoffaustrag aus Waldökosystemen mit dem Sickerwasser. In: Forst- und Holzwirt 45, H. 20, S. 605-610.

SCHLEYER, R., RENNER, J. & MÜHLHAUSEN, D. (1991): Beeinflussung der Grundwasser-qualität durch luftgetragene organische Schadstoffe. WaBoLu-Heft 5/1991, S. 96, Berlin.

SCHOEN, R., WRIGHT, R. & KRIETER, M. (1984): Gewässerversauerung in der Bundes-republik Deutschland - erster regionaler Überblick. In Naturwissenschaften 71, S. 95-97.

SCHULZ; F. (1991): Erfassung der Niederschlagsbeschaffenheit durch das Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig - Holstein, In: Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette, Interne Mitt. aus dem Forschungsvorhaben, 4, 1-4.

STEINBERG, CHR. (1985): Versauerungsnachweis für ausgewählte Seen mittels biologischer pH-Meter. Vortrag vom 10.05.1985, 121 FGU-Seminar, Berlin.

STREBEL, O., BÖTTCHER, J. & RENGER, M. (1984): Einfluß von Boden und Bodennutzung auf die Stoffanlieferung an das Grundwasser. In: Recent investigations in the Zone of Aeration, Vol. 2, Proceedings of the Int. Symp. Munich, Oct. 1984, Department of Hydrogeologie and Hydrochemistry.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (1993): Braunschweiger Grundwasserkolloquium, Grundwasserkontamination durch diffuse Stoffeinträge, Braunschweig.

UBA (1984): Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Materialien des Umweltbundesamtes, UBA 1/84, Berlin.

UHLMANN W. (1989): Die Wirkungen saurer atmosphärischer Depositionen auf Boden und Grundwasser - eine Abschätzung auf der Basis hydrogeochemischer Modelle. Diss., TU Dresden.

UHLMANN, W., GRÜNEWALD, U. (1992): Auswirkungen des sauren Regens auf die Wasserressourcen, DVGW-Schriftenreihe Wasser nr. 72, Eschborn.

ULRICH, B. (1981): Die Rolle der Wälder für die Wassergüte unter dem Einfluß des sauren Niederschlags. In: Agrarspektrum 1/81, S. 212-231.

ULRICH, B. (1982): An ecosystem oriented hypothesis on the effect of air pollution on forest ecosystems. Background paper for expert meeting on effects of acid deposition. Stockholm.

VDI, RDL: Säurehaltige Niederschläge - Entstehung und Wirkungen auf terrestrische Ökosysteme.

VDI (1983): Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf.

VDI-Richtlinien: Messen von Regeninhaltsstoffen;
Kriterien für Aufbau, Aufstellung und Betrieb von Regensammlern;
VDI 3870

WARNECKE, G. (1991): Meteorologie und Umwelt, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

ZAHN, M.T., BITTERSOHL, J., LECHLER, H.H. & SAGER, H. (1992): Atmosphärische Deposition als Faktor der Gewässerbelastung, XVI Konferenz der Donauländer über "Hydrologische Vorhersagen und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Grundlagen", Kehlheim.

ZIEGLER, G., GABRIEL, B., JACOBS, S., VORBACH, E. & SCHULTZE, M. (1992): Langfristige Auswirkungen des Stoffeintrages durch atmosphärische Depositionen auf die Grundwasserbeschaffenheit im Festgesteinsbereich der neuen Bundesländer. Thüringer Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.), 122 S.