

# Belastung sächsischer Wälder durch Bodenversauerung und Schadstoffeinträge

## Einleitung

Seit etwa 150 Jahren sind die sächsischen Wälder durch erhebliche Fremd- und Schadstoffeinträge betroffen - anfangs punktuell im Nahbereich der jeweiligen Emittenten, seit etwa 40 Jahren auch großflächig durch Ferntransport. Für den sächsischen Mittelgebirgsraum waren und sind auch noch gegenwärtig Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) sowie deren Reaktionsprodukte die dominierenden Schadstoffgruppen. Schwefeldioxide und Stickoxide entstehen vor allem bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas. Immissionsquellen sind Kraftwerke, Industrieanlagen, Kraftfahrzeuge und - in geringerem Umfang - Kleinverbraucher wie Haushalte und Gewerbe. Auf dem Lufttransport wandeln sich die Gase teilweise chemisch um: Schwefeldioxid hauptsächlich zu Schwefelsäure und Sulfaten, Stickoxide hauptsächlich zu Salpetersäure und Nitraten. Zudem sind Stickoxide die wichtigsten Vorläuferstoffe für Photooxidanten.

Die pflanzenphysiologische Wirkung der deponierten Schadstoffe wird durch die Standortsfaktoren Klima und Boden modifiziert und durch die Säureeinträge in die Waldökosysteme verschärft. Im Gefolge der Schadstoffbelastungen kam es im Erzgebirge bereits in den sechziger Jahren zu flächigem Waldsterben, das sich in den 70er und 80er Jahren zu den bekannten riesigen Kahlflecken ausweitete.

## Bodenversauerung

Der Boden stellt gewissermaßen das Reaktionsgefäß des Ökosystems dar. In ihm werden die von den grünen Pflanzen mit Hilfe der Sonnenenergie produzierten Stoffe wieder in ihre Ausgangsstoffe zerlegt und als Nährelemente in Ionenform in die Bodenlösung freigesetzt. Dieser Prozeß wird als Mineralisierung bezeichnet und unter günstigen bodenchemischen Verhältnissen weitgehend von Mikroorganismen durchgeführt, wobei Temperatur und Feuchte ebenfalls einen entscheidenden Einfluß auf die Mineralisierungsrate haben. Danach stehen die Ionen für eine erneute Pflanzenaufnahme zur Verfügung und der **Stoffkreislauf** ist geschlossen.

Auf Grund einer hohen Basensättigung (= Anteil von Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an den im Boden austauschbar an die Bodenkolloide gebundenen Kationen) kann zudem die aus den hohen Stickstoffgehalten der Pflanzen im Rahmen der Mineralisierung freigesetzte Salpetersäure durch Austausch mit diesen basischen Kationen abgepuffert und neutralisiert werden. In bewirtschafteten Wäldern wird vielfach bereits die maximal mögliche Basennachlieferung aus der Silikatverwitterung beansprucht. (Die Silikate wie z.B. die Glimmer und Feldspäte gehören zu den

wichtigsten „primären“ Mineralen des Bodens. Ihre kontinuierliche Verwitterung zu „sekundären“ Tonmineralen führt insbesondere zur Freisetzung von  $\text{K}^+$ -,  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen und kennzeichnet die „nachschaffende Kraft des Bodens“.) Eine darüber hinausgehende, **langfristige Entkopplung des Nährstoffkreislaufs** durch eine jahrhundertlange Übernutzung und Ausplünderung der Wälder oder durch die großflächige Fichtenreinbestandswirtschaft hat auch in Sachsen die „natürliche“ Bodenversauerung entsprechend gefördert.

Der zunehmende Säureeintrag in Waldökosysteme in Verbindung mit der Industrialisierung seit dem letzten Jahrhundert („**Saurer Regen**“) hat diesen Prozeß durch die andauernde Überforderung der Puffertfähigkeit der Böden bei gleichzeitigem, unwiederbringlichem Verlust von „basischen“ Kationen mit dem Sickerwasser noch um Größenordnungen beschleunigt. Die Protonen ( $\text{H}^+$ ) der abgepufferten Säuren (Kohlensäure, organische Säuren, Salpetersäure und Schwefelsäure) bleiben im Boden zurück, während die Basen vorwiegend als Calciumnitrat oder Calciumsulfat mit dem Sickerwasser abgeführt werden. Fällt der pH-Wert des Bodens unter 5,0, steigt die Gefahr von Säuretoxizität für die Bodenorganismen.

Da die Leistungsfähigkeit des Puffersystems im pH-Bereich zwischen 5,0 - 4,2 (Austauscher-Pufferbereich) im Verhältnis zur Höhe der Belastung jedoch nur begrenzt ist, liegt in den meisten europäischen Waldböden bereits vorherrschend der **Aluminium-Pufferbereich** vor (**pH 3,8 - 4,2**). Damit ist die Verdrängung der Kationbasen (K, Ca und Mg) durch Kationsäuren (H, Al, Mn, Fe) von der Austauscheroberfläche des Bodens weit fortgeschritten und die Puffertfähigkeit der Böden gegenüber dem Säureeintrag weitgehend erschöpft: die Böden sind an den Elementen Calcium und Magnesium sehr verarmt. Die Basensättigung sinkt unter 15% und es kommt vor allem zur Reaktion mit den an den Ionenaustauscher (Bodenkolloide) gebundenen Aluminiumionen und deren Übertritt in die Bodenlösung.

Damit wird der Lebensraum Boden zunehmend von lebensfeindlichen Ionen ohne Nährstoffbedeutung beherrscht. Dies kann bei den relativ säuretoleranten einheimischen Baumarten wie Buche, Eiche, Tanne, Fichte und Kiefer zu **Säurestreß** und zu einer **Einschränkung der Nährstoffaufnahme** führen, während gleichzeitig eine biologische Verödung des Bodens zu verzeichnen ist. Die Bäume reagieren mit Wurzelschäden auf Grund von Calciummangel oder zeigen Blattverfärbungen, die durch Magnesium-, Kalium- und Spurennährstoffmangel bedingt sein können. Wegen des sauren Sickerwassers sind auch die **Untergrund- und Oberflächen-gewässer im Wald versauert** und die Qualität des Trinkwassers ist entsprechend gefährdet.



Abb. 1: Verteilung der forstlichen Intensivmeßflächen (Stoffbilanzstationen = Level II) der LAF in Sachsen und Überblick zum geologischen Ausgangsmaterial

## Ergebnisse der kontinuierlichen Überwachung von sächsischen Waldökosystemen

Die Überwachung des Bodens und der Stoffbelastung in den sächsischen Wäldern durch die Sächsische Landesanstalt für Forsten (LAF) erfolgt auf der Grundlage forstlicher **Dauerbeobachtungsflächen unterschiedlicher Intensitätsstufen**. Die chemisch-physikalische Beschaffenheit des Bodens wird landesweit durch eine **periodische Bodenzustandserhebung (BZE = Level I)** an Rasterpunkten kontrolliert, die zudem Aufnahmepunkte der jährlichen Kronenbonitur der Waldschadensansprache sind. (Zur Verbesserung der Aussagekraft wird die BZE von bisher 68 Punkten im 8x8km-Netz auf ca. 280 Punkte eines 4x4km-Rasters erweitert.)

In 6 großflächig repräsentativen Waldökosystemen (Abbildung 1) erfolgen umfangreiche **kontinuierliche Erhebungen (Stoffbilanzstationen = Level II)** zum Depositionsgeschehen bzw. zu den Stoffflüssen im Freiland- und Bestandesniederschlag, zur Meteorologie, zur raumzeitlichen Entwicklung ökochemischer Parameter in der Bodenlösung sowie zu den Stoffbilanzen (Vergleich von Elementeninträgen mit dem Niederschlag und Elementausträgen mit dem Sickerwasser). Die Meßflächen sind in das Untersuchungsprogramm der LAF zum Aufbau artenreicher Mischbestände (Waldumbau) integriert.

### Säuregrad der Waldböden

Den aktuellen Säurezustand der sächsischen Waldböden spiegeln die **pH(H<sub>2</sub>O)-Werte** der Bodenzustandserhebung wider (Abbildung 2). Sie verweisen auf die großflächige Bedeutung der Bodenversauerung in Sachsen und verdeut-

lichen durch die zu den Minimal-Werten hin orientierte Verteilung der mittleren pH-Werte, daß in den Forstböden der **Aluminium (Al)- und der Aluminium/Eisen (Al/Fe)-Pufferbereich (pH: 3,8 - 4,2 bzw. 3,0 - 3,8)** dominieren. (Die breite pH-Spanne und teilweise hohe Werte im Oberboden gehen auf Böden in Nordsachsen zurück, die durch umfangreiche basische Staubeinträge der Vergangenheit beeinflusst sind.)

Im Aluminium-Pufferbereich werden die auf der Oberfläche der Bodenkolloide angelagerten Al-Hydroxide (der Austauscher kann bis zu 95% mit Al belegt sein) verstärkt in die Pufferprozesse einbezogen und Al<sup>3+</sup>-Ionen in die Bodenlösung abgegeben. Sie erreichen dort Konzentrationen, die auch für säuretolerante Vegetationsformen (u.a. Nadelholzbestockungen) ökophysiologisch wirksam bis toxisch sind. Im Eisen-Pufferbereich werden Säuren über die Auflösung von Eisenoxiden gepuffert, wobei es ferner

zur Verlagerung von Eisen mit den markanten Farbänderungen im Oberboden kommt, die als Podsolierung bekannt sind.

### Basensättigung und Nährstoffvorräte der Böden

Mit dem hohen Säuregrad der Böden korrespondiert zwangsläufig auf der überwiegenden Anzahl der untersuchten Standorte eine nur noch **geringe Basensättigung (BS%; s.o.)**, die für die Elastizität des Bodens gegenüber Säureinträgen bzw. Säuretoxizität und die Nährstoffversorgung der Bestände von maßgeblicher Bedeutung ist.

Nach den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen (Level I und II) ist davon auszugehen, daß bei **Waldböden über den großflächig bedeutenden Ausgangssubstraten Gneis, Phyllit, Schiefer, Granit und Sandstein nur noch eine Basensättigung von etwa 10% oder weniger** anzutreffen ist. Typisch für die Kationenzusammensetzung in diesen versauerten Waldböden ist, daß bis zu 90% der Austauschplätze des Bodens von Aluminium eingenommen werden. Nur ausnahmsweise werden im Oberboden bzw. im Unterboden ab 60 cm Tiefe bessere Basensättigungsgrade erreicht. Eine generell hohe Basenbelegung (bis über 80%) weisen die Unterböden der Lößstandorte in den Unteren Berglagen und im Hügelland auf, die damit in diesen Tiefenbereichen elastisch auf Säuretoxizität reagieren können.

Für die Mehrzahl der waldtragenden Mittelgebirgsstandorte kann danach von einer **Nivellierung** und drastischen Degradation ihres **bodenchemischen Zustandes** ausgegangen werden, die nahezu unabhängig vom Grundgestein bzw. Substrat ist.

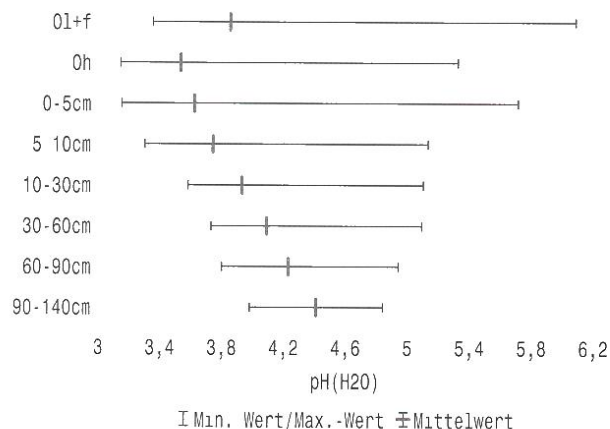


Abbildung 2 Min - Werte, Max - Werte und Mittel Werte von  $pH(H_2O)$  in der Humusauflage (Ol+f und Oh) und den Tiefenstufen des Mineralbodens der BZE-Profile Sachsens (67 Punkte, ohne Bodenprofil auf Basalt)

Die in den Böden austauschbar gespeicherten **Vorräte an den Nährelementen** Calcium, Kalium und Magnesium sind **gering**. Nur in etwa 30% der Fälle sind Bodenvorräte von weit über den für den Aufbau eines Altbestandes als notwendig anzuschenden etwa 400 bzw. 60 kg/ha Ca bzw. Mg anzutreffen. Demnach ist von einer **Nährstoffarmut** der weit überwiegende Teil der Forststandorte betroffen, und es zeigt sich, daß die Nährstoffversorgung bzw. der Aufbau einer neuen Bestandesgeneration aus den im Boden derzeit austauschbar gebundenen Nährelementvorräten gefährdet ist, wenn diese nicht aus der Silikatverwitterung und Humusmineralisierung bzw. durch Stoffeinträge (Deposition, Kalkung) verbessert werden. Diese Feststellung wird verschärft durch die Tatsache, daß vielfach nicht mehr von einer tiefreichenden Durchwurzelung

der Böden ausgegangen werden kann; damit besteht häufig nur eine eingeschränkte Zugriffsmöglichkeit der Bestände auf das in den Unterböden vorhandene Nährstoffkapital. Es sind zudem **relativ hohe Nährstoffvorräte in mehr oder weniger mächtigen Humusaufgaben** gespeichert. Sie sind vorwiegend Folge einer unzureichenden mikrobiellen Zersetzung und Mineralisierung der Laub- und Nadelstreu aufgrund des chemisch ungünstigen Oberbodenmilieus. Die Humusaufgaben stellen somit den Entzug von Nährstoffen aus dem Elementkreislauf dar und induzieren zusätzlichen Versauerungsdruck. Ihre Nährstoffvorräte erreichen vielfach höhere Werte als im Mineralboden. Von dieser Umverteilung der Elementvorräte ist Magnesium bevorzugt betroffen, was entsprechend negative Auswirkungen auf die Mg-Ernährung der Bestände hat und häufig durch die bekannten Mangelsymptome (Nadelvergilbungen) dokumentiert wird.

### Depositionen

Zwischen der Niederschlagsdeposition auf freier Fläche (Freiland) und der Deposition unter dem Kronendach am Waldboden (Bestandes-Niederschlag) bestehen erhebliche Unterschiede. Das Kronendach wirkt wie ein Filter. Trockene gas- und staubförmige Luftinhaltsstoffe sowie im Regen gelöste Elemente werden an den Blattorganen zeitweilig angelagert, teilweise aufgenommen (besonders Stickstoff und Schwefeldioxid) bzw. chemisch umgewandelt, und mit dem Regen wieder abgewaschen. Zudem werden besonders Kalium, Calcium, Stickstoff und Magnesium unterschiedlich stark aus den Nadeln ausgewaschen.

Der Säuregrad nicht belasteter Niederschläge im Gleichgewicht mit dem  $CO_2$ -Partialdruck der Luft beträgt pH 5,6. Die pH-Werte im Niederschlag liegen besonders unterhalb der Baumkronen meist erheblich tiefer (Abbildung 3). Sie weisen

damit auf **Fremd- bzw. Schadstoffeinträge** hin, die sich **regional unterschiedlich** ausprägen. So zeigt der Vergleich der zwei Stationen mit den längsten Meßreihen, daß sowohl der Freiland- als auch der Bestandes-Niederschlag in einem Fichtenaltbestand des Elbsandsteingebirges (Cunnersdorf) meist deutlich saurer sind als in dem Vergleichsbestand des oberen Westerzgebirges (Klingenthal). Ursache sind die Dominanz und unterschiedlich hohe Konzentrationen von  $SO_4$ -S und  $NO_3$ -N im Niederschlag. Sulfat-S weist dabei eine deutliche Jahresrhythmik auf. Die Schwefelgehalte im Bestandes-Niederschlag können im Herbst und in den Wintermonaten auf das 3-10fache der übrigen Jahreszeit ansteigen. Das führt zu drastischen pH-Einbrüchen bis



Untersuchungsstation der Landesanstalt für Forsten in Klingenthal

## pH-Werte im Bestandes-Niederschlag

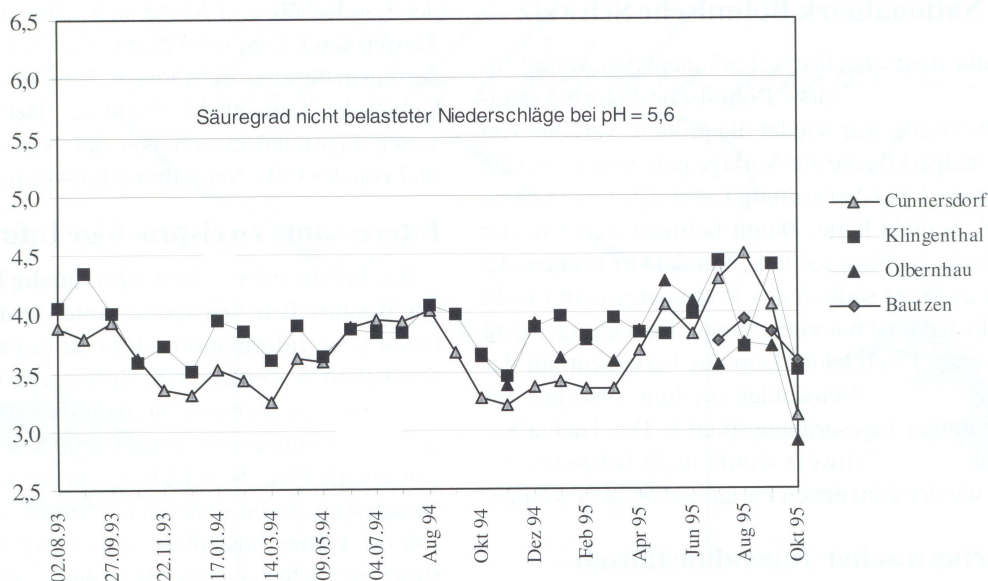


Abb. 3: Entwicklung der pH-Werte im Bestandes-Niederschlag der forstl. Stoffbilanzstationen (Level II; Monatsmittelwerte aus 3 Wdh.)

etwa 3,0 (Cunnersdorf und Olbernhau). Diese Entwicklung beruht jeweils auf dem Beginn der Heizperiode und zunehmenden Nebeltagen mit stark erhöhten Auskämrraten von Schadstoffen durch die Fichtenkronen besonders in Verbindung mit stark belasteten Niederschlägen aus überwiegend südöstlichen Richtungen.

### Kalkulation der jährlichen Ein- und Austragsraten (Elementbilanz)

Die Belastung durch Schwefeleinträge, die unter hiesigen natürlichen Bedingungen keine Bedeutung hat, ist im mittleren Erzgebirge (Olbernhau) mit 63 kg pro ha und Jahr am höchsten und mit 46 kg ebenfalls in Cunnersdorf (Elbsandsteingebirge) erheblich. Das westliche Erzgebirge (36 kg in Klingenthal) und besonders die Station Laußnitz (22 kg) sind geringeren Schwefel-Belastungen ausgesetzt. Der S - Eintrag im Waldbestand ist etwa 2,5 mal so hoch wie im Freiland. Der jährliche Stickstoffeintrag ist auf sämtlichen Stationen relativ hoch und liegt zwischen 18 (Laußnitz) bzw. 27 bis 29 kg/ha der anderen Meßflächen. Er setzt sich etwa hälftig aus  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  zusammen. Kronenraumbilanzen verweisen für die Fläche Klingenthal zudem auf bedeutende N-Aufnahmeraten im Kronenraum, so daß der tatsächliche N-Eintrag in zahlreichen Waldbeständen noch beträchtlich höher ist. Insgesamt befinden sich die **Schwefel- und Stickstoffeinträge**, trotz einer ungefähren Halbierung beim Schwefel seit 1988, weiterhin **auf einem für Wald-ökosysteme zu hohem Niveau**.

Die Sulfatausträge mit dem Sickerwasser in 100 cm Tiefe betragen im Meßfeld Cunnersdorf jährlich etwa 200 kg/ha (pH-Werte: zwischen 4,4 und 3,9), in Klingenthal etwa 90 kg/

ha (pH: 4,7 - 4,2). Damit übertreffen die S-Austräge die S-Einträge um ein Vielfaches. Besonders in Cunnersdorf ist von einem Effekt verstärkter S-Mobilisierung über die Auflösung vormals im Boden in Form von Al-Sulfaten gespeicherter Schwefelvorräte auszugehen. Entsprechend ausgeprägte Korrelationen bestehen zwischen den hohen S- und Al-Konzentrationen im Sickerwasser, die in Cunnersdorf mit 25 bis 40 mg/l S bzw. 10 bis 15 mg/l Al etwa das 3fache der Werte in Klingenthal betragen. Zur Wahrung der Elektroneutralität sind auch die Austragsraten von Ca, K und Mg in Bodenlösung und Sickerwasser entsprechend hoch.

### Chemische Parameter in Waldquellen

Auf der Mehrzahl sämtlicher Meßflächen ist folglich der Boden über die im Rahmen einer Profilbeprobung erfaßte Tiefe hinaus versauert und von den **hohen Säureausträgen** des Bodens ist vielfach bereits der Grundwasserleiter betroffen. So sind die Wässer von 3 Waldquellen im Einzugsgebiet der Meßstation Klingenthal (westl. Erzgebirge) gekennzeichnet durch einen ebenfalls hohen Versauerungsgrad infolge niedriger pH-Werte sowie hohen Sulfat- und Aluminium-Gehalten. Die entsprechenden Trinkwasser-Grenzwerte (pH: 6,5 - 9,5; 0,2 mg Al/l) werden bei pH-Werten zwischen 4,0 und 4,8 weit unter- bzw. hinsichtlich der Al-Konzentrationen mit 0,8 bis 3,8 mg/l weit überschritten. Das verdeutlicht die Dringlichkeit von Maßnahmen, die im weitesten Sinne für den **Schutz und die Sanierung der Waldböden** sowie für die Sicherstellung der Trinkwasserqualität aus Waldgebieten getroffen werden müssen!

**Dr. Gerhard Raben**  
Sächsische Landesanstalt für Forsten (LAF), Graupa