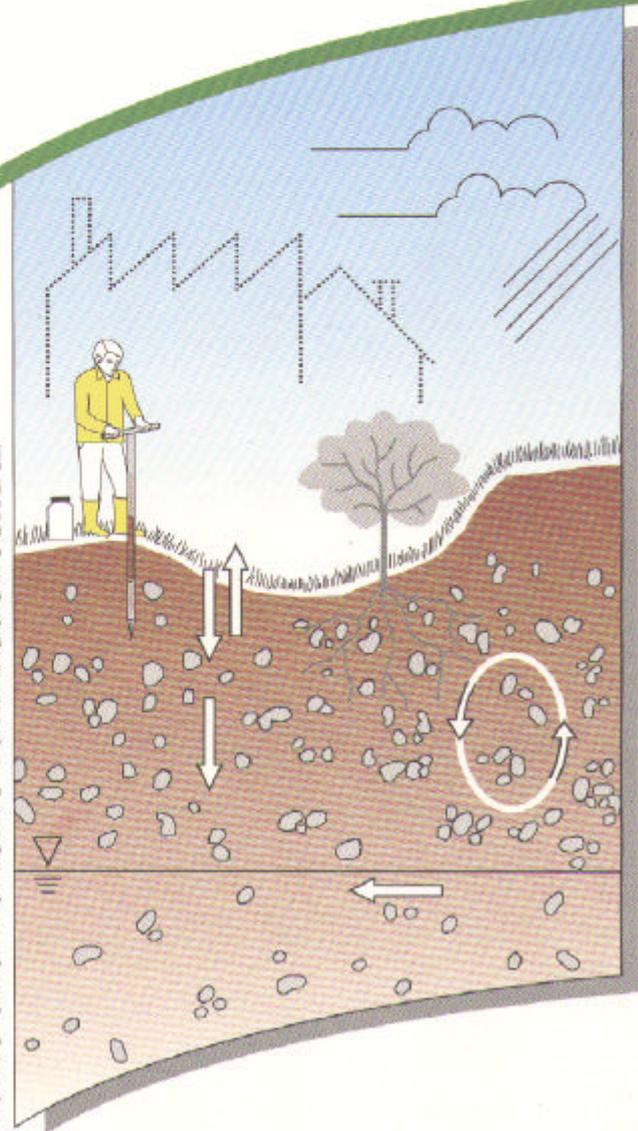


Handbuch Boden

Bodenversauerung

- Ursachen, Auswirkungen,
Maßnahmen
Kurzfassung einer Literaturstudie

Texte und Berichte zum Bodenschutz





Bodenschutzfachinformation im WWW

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage.
Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt.
Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind - auch auszugsweise- nur für
eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

Bodenversauerung

- **Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen**
Kurzfassung einer Literaturstudie

Landesanstalt für Umweltschutz

Anmerkungen des Herausgebers

Die Reihe „**Texte und Berichte zum Bodenschutz**“ ergänzt die Veröffentlichungsreihe „**Materialien zum Bodenschutz**“. Sie dient der zeitnahen Weitergabe von Informationen und Arbeitshilfen, die von der Landesanstalt für Umweltschutz selbst oder in ihrem Auftrag durch Dritte erstellt werden.

In den „**Materialien zum Bodenschutz**“ werden grundlegende Aspekte des Bodenschutzes systematisch und umfassend aufgearbeitet und dargestellt. Die Materialien sollen als Arbeits- und Handlungsgrundlage im Bereich Bodenschutz dienen.

Dem gegenüber behandeln die Veröffentlichungen in der Reihe „**Texte und Berichte zum Bodenschutz**“ zumeist nur Teilaspekte von bodenschutzrelevanten Fragestellungen oder dokumentieren einen Zwischenstand zu einem bestimmten Themen- oder Untersuchungsbereich.

Impressum

Herausgeber Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

ISSN 0941-780 X (Zentraler Fachdienst Wasser, Boden, Abfall, Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg).
0946-9032 Texte und Berichte zum Bodenschutz

Bearbeitung Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung 5 - Boden, Abfall, Altlasten
Ref. 51 - Bodenschutz, Dr. V. Schweikle

gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier, 80 g
Umschlagkarton aus 100 % Altpapier, 250 g

Bezug Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Referat 15 - Bibliothek
Postfach 21 07 52; 76157 Karlsruhe
Telefax 0721 / 983-1456

Preis 15,00 DM

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Karlsruhe 1997

Berichtsnummer 3a/96	
Titel des Berichts: Bodenversauerung - Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen Kurzfassung einer Literaturstudie	
Seitenzahl 27	Preis 15,00 DM
Schlagwörter Bodenversauerung, Bodenkunde	
Kurzfassung Ausgewertet wurden Arbeiten über Bodenversauerung, die sich befassen mit dem Begriff der Menge und Art des Protoneneintrags und Basenaustrags und deren Summenwirkung auf Gesteine (d.h. letztlich der Bodenbildung), Bodeneigenschaften, Vegetation und Gewässer. Maßnahmen gegen die Bodenversauerung werden vorgeschlagen.	
Autor: Dr. Schweikle, Volker*	Redaktion
Durchführende Institution Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Griesbachstr.1 76185 Karlsruhe	Herausgeber Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Griesbachstr. 1 76185 Karlsruhe

* nach einem Entwurf von R. Gryschko und D. Horlacher

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	1
2. DEFINITION DES BEGRIFFS "BODENVERSAUERUNG"	1
3. MINERALBESTAND IN BÖDEN	1
4. SÄUREIMPORTE UND -BILDUNG IN BÖDEN.....	2
4.1 SÄUREIMPORTE.....	2
4.2 SÄUREBILDUNG DURCH STOFFUMSATZ.....	2
5. PUFFERUNG VON SÄUREN IN BÖDEN	3
6. EXPORTE VON SÄURENEUTRALISATIONSKAPAZITÄT	9
6.1 AUSWASCHUNG.....	9
6.2 ERNTEENTZÜGE.....	9
6.3 VERGLEICH VON ATMOGENER UND ANTHROPOGENER VERSAUERUNG.....	9
6.4 EROSION.....	13
7. WIRKUNG DER VERSAUERUNG IN LANDSCHAFTEN UND BÖDEN	14
7.1 BODENMUSTER.....	14
7.2 BÖDEN MIT KARBONAT-PUFFER.....	16
7.3 BÖDEN MIT SILIKAT-PUFFER.....	17
7.4 NÄHRSTOFFMANGEL UNTER FICHTE NACH NADELANALYSEN.....	17
7.5 ZERSETZUNGSHEMMUNG DER ORGANISCHEN SUBSTANZ.....	17
7.6 GEWÄSSER.....	17
7.6.1 Grundwasser.....	18
7.6.2 Fließgewässer.....	19
7.6.3 Seen.....	19
8. MAßNAHMEN GEGEN BODENVERSAUERUNG.....	21
9. LITERATUR.....	22
INDEXVERZEICHNIS	23
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	23

1. Einleitung

Bodenversauerung ist in Böden unter humidem Klima ein natürlicher Prozeß der Verwitterung von Mineralen durch Säureangriff und Austrag von basenbildenden Kationen aus Böden. Die Verbrennung fossiler Energieträger in Heizungen, Motoren und Kraftwerken hat den Säureangriff auf Böden erheblich verstärkt. Um den Stand des Wissens zu erkunden, wurde eine Literaturlauswertung in Auftrag gegeben, deren Ergebnisse (Mai 1994) in dieser Kurzfassung gebündelt sind. Im einzelnen werden der Begriff, die Puffereigenschaften von Böden und Gesteinen SW-Deutschlands, die Art und Herkunft von Säuren, die Auswirkungen auf den Nähr- und Schadstoffhaushalt, das Pflanzenwachstum und die Streuqualität, die Folgen für Grund- und Oberflächenwässer und die Maßnahmen gegen die Bodenversauerung dargestellt.

2. Definition des Begriffs "Bodenversauerung"

Säure in Böden wird als Aktivität von Wasserstoff-Ionen (Protonen) mit dem pH-Wert beschrieben. Je niedriger der pH-Wert, um so saurer ein Milieu. Versauerung von Böden meint einen Prozeß, bei dem säurebildende Stoffe (Protonendonatoren, bzw. Elektronenakzeptoren) zugeführt und basenbildende Stoffe (Protonenakzeptoren, bzw. Elektronendonatoren) aus dem Boden entfernt werden.

Die Fähigkeit von Böden, Säureeinträge zu puffern, ist abhängig von Art und Menge seines (lithogenen) Mineralbestands und wird Säurepufferungsvermögen, bzw. Säure-Neutralisations-Kapazität (SNK) genannt.

3. Mineralbestand in Böden

Die Genese von Gesteinen bestimmt deren Mineralbestand und die Genese von Böden Ausmaß und Art der Zerstörung, Umwandlung oder Neubildung von Mineralen.

Die wichtigsten Minerale sind Silikate (Gerüstsilikate wie z. B. Quarz und Feldspäte, Blattsilikate wie z. B. Glimmer und Tonminerale, Kettensilikate wie z. B. Augit und Hornblende, Inselsilikate wie z. B. Olivin), Karbonate, Oxide, Sulfate, Chloride und Sulfide.

4. Säureimporte und -bildung in Böden

4.1 Säureimporte

Wasser löst Chloride und Sulfate, die mit dem Sickerwasser ausgetragen werden und hydrolysiert z. B. Kalifeldspat zu Al-Hydroxid und Tonmineralen mit Auswaschung von Kalium (d. h. ein Basenbildner wird aus dem Boden entfernt; die Säureneutralisationskapazität = die SNK sinkt).

Sauerstoff oxidiert Sulfide z. B. Eisensulfid zu Schwefelsäure und Eisenoxid-Hydrat. Das Eisenoxid-Hydrat fällt aus und färbt Boden braun; Schwefelsäure reagiert mit den Mineralen. Sauerstoff oxidiert auch Ammonium und bildet Salpetersäure.

Säureradikale, wie CO_3^{2-} , SO_x^{n-} und Cl, aus Vulkanen, aus elektrischen Entladungen bei Gewittern und aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Heizanlagen und Motoren erreichen mit dem Niederschlag Böden (Abb. 1 und 2).

Die atmosphärischen Säureeinträge hängen ab von der topo- und geographischen Lage und der Oberfläche von Vegetationsbeständen. Sie nehmen mit zunehmender Höhe zu, sind im Luv von Hängen höher als im Lee und im Wald höher als im Freiland (bei Nadelbäumen höher als bei Laubbäumen und in Altbeständen höher als in Jungbeständen). Hohe direkte H^+ -Einträge gibt es in Ballungszentren (Industrie, Verkehr), während hohe NH_4^+ -Einträge in landwirtschaftlich genutzten Gebieten mit hohem Tierbesatz vorkommen.

Mineraldünger dissoziieren in der Bodenlösung, wobei das basenbildende Kation von Pflanzen aufgenommen und gegen H^+ eingetauscht wird. Nitrate wirken allerdings nur versauernd, wenn sie nicht von Pflanzen aufgenommen werden, also während der Vegetationsruhe oder bei Vegetationsfreiheit.

4.2 Säurebildung durch Stoffumsatz

Die Vegetation bildet aus CO_2 und H_2O mit Nährelementen und Sonnenenergie organische Substanz, die beim Abbau oxidiert wird. Dabei entstehen kurzkettige organische Säuren (z. B. Essigsäure, Milchsäure, Propionsäure u. a.) die mit Mineralen reagieren. Bei weiterer Oxydation entstehen CO_3^{2-} , SO_x^{n-} und NO_x^- , die ebenfalls mit Mineralen reagieren.

Fe/Al-Organate, deren organischer Teil im Unterboden mineralisiert wird, liefern ebenfalls H^+ z. B. $\text{Fe/Al-R} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$.

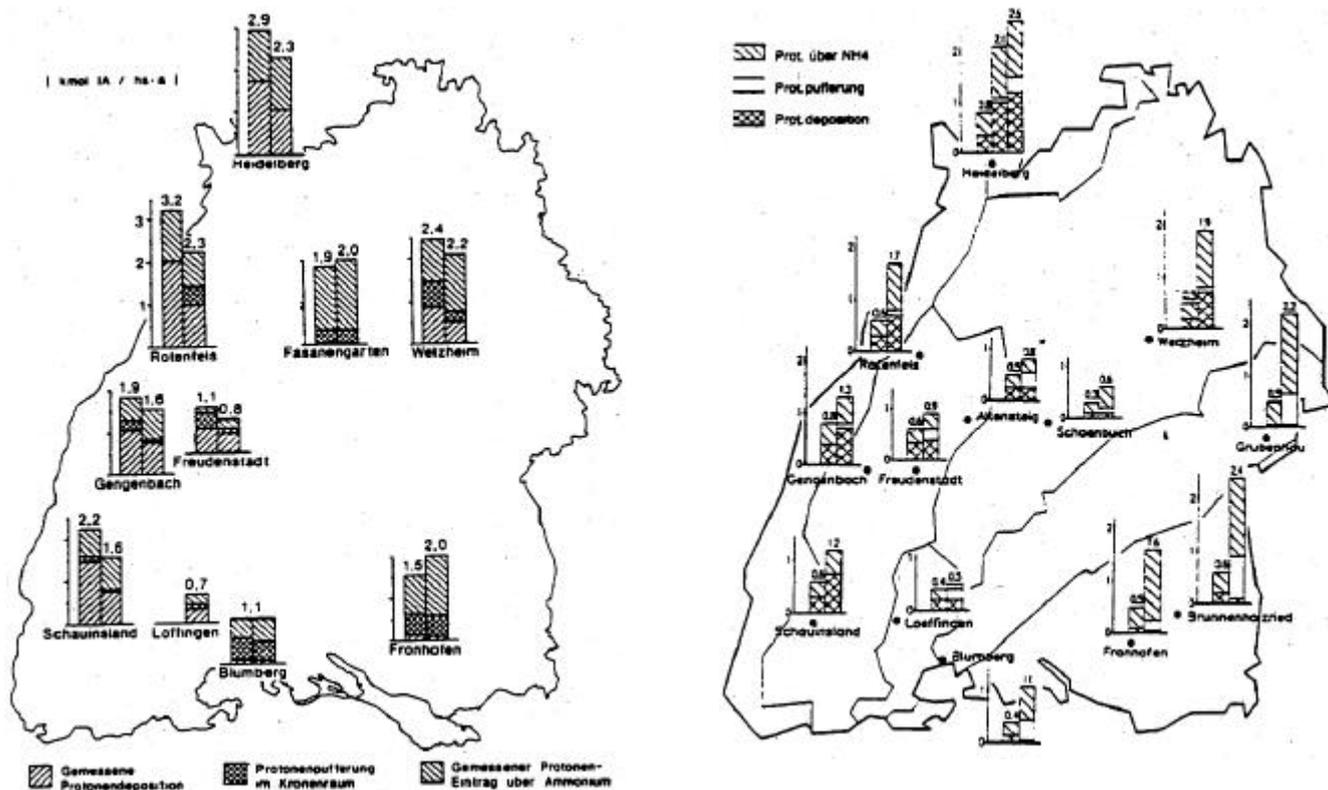


Abb. 1: Gesamtsäurebelastung unter Fichte in den hydrologischen Jahren 1988/89 und 1989/90 (obere Grafik) sowie im hydrologischen Jahr 1992 unter Freiland- und Fichte (untere Grafik) (HOCHSTEIN & HILDEBRAND 1992; HEPP & HILDEBRAND, 1993)

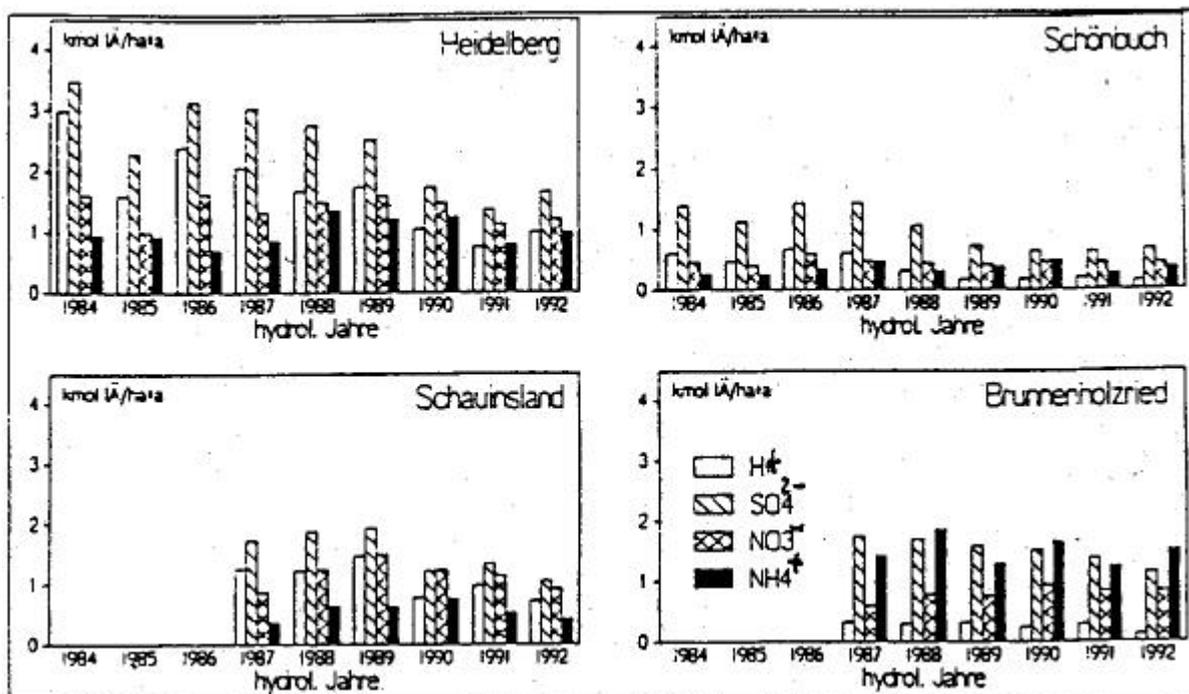


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der Gesamtsäureeinträge an ausgewählten Meßorten in Baden-Württemberg (HEPP & HILDEBRAND, 1993):

5. Pufferung von Säuren in Böden

In Böden eingetragene und dort gebildete H^+ -Ionen reagieren mit Mineralen oder organischer Substanz; d. h. sie werden gepuffert (Tab. 1).

Die SNK ist also abhängig vom Gehalt an Ca, Mg, K, Na und Al und Mineralen in Böden, aber auch von der Aggressivität der Säuren. H_2CO_3 ist z. B. unter pH 5 nicht mehr dissoziiert und somit für die Silikatverwitterung weitgehend wirkungslos (Tab. 2). Pufferkapazitäten von Mineralen sind in Tab. 3 aufgelistet.

Die Silikatvorräte der Böden in SW-Deutschland sind durch die glazialen Prozesse der Eiszeiten erneuert worden, da ältere Böden abgetragen und chemisch unverwitterte, aber physikalisch zerkleinerte Gesteine (Geschiebemergel, Sander, Löß) abgelagert wurden. Im Periglazialgebiet vermengte sich oberflächlich aufgetauter Boden, sofern er nicht völlig erodiert und weggeführt wurde, mit frischem Gestein (z.B. Löß, Hangschutt).

Die Silikatverwitterungsraten sind bei Gesteinen/Böden mit leicht verwitterbaren Silikaten (z. B. Basalt, Gabbro) hoch und bei Gesteinen mit schwer verwitterbaren Mineralen (z. B. Granit und Quarz) gering. Die natürlichen Einträge starker Säuren werden durch die Silikatverwitterung nicht vollständig abgepuffert, so daß schon der Al- und Fe-Puffer in Anspruch genommen wurde.

Da Säureeinträge in den obersten Schichten von Böden am intensivsten wirken, würden dieselben am stärksten verwittern, wenn nicht tiefwurzelnde Vegetation basenbildende Kationen an die Bodenoberfläche pumpten und Bodentiere verwitterbare Minerale an die Bodenoberfläche transportierten. Wenn in Böden die Pumpwirkung der Vegetation und die Bioturbation ausfallen, sinkt die SNK in Oberböden auch auf Gesteinen mit sehr hoher SNK rasch ab (z. B. saure Böden auf Kalkstein unter Fichte).

Tab. 1: Puffersysteme mit pH-Bereich und Reaktionsprodukten

Puffer	pH (H ₂ O)	Reaktionsprodukt	Verwitterungsprozeß
Carbonat CaCO ₃	8,6-8,2	Ca(HCO ₃) [*] , Ca(NO ₃) ₂ [*] , CaCl ₂ [*] CaSO ₄ [*] , <u>R-CO₂Ca[*]</u>	Entkalkung
Silikate; Insel-, Band-, Blatt-, Gerüst-Silikate ohne Tetra-/Oktaederabbau	7-5 (-<3,2)	Pedogene Tonminerale und Oxide Erhöhung der Kationenaustausch- kapazität) Alkali- und Erdalkalisalze* (Na-, K-, Mg-, Ca-)(-No _x , -So _x , -Cl,- HCO ₃ , -OC-R)	Verlehmung und Verbraunung
Austauscher Tonminerale, Hydroxide organische Substanz Mn-Oxide	5-4,5 (4,2)	s. Silikate, z.T. Mn-Salze, Mn ^{2+*} oder ^{***} , austauschbares AlOH ²⁺ oder ^{***} , Al ^{3+*} oder Al-Hydroxo- sulfate, (Akkumulation von Säure bei Belastung mit H ₂ SO ₄)	Basenverarmung
Organische Substanz		NO ₃ => N ₂ ^{**} +CO ₂ [*] oder ^{**} So _x => S ^{***} + CO ₂ [*] oder ^{**} bei niederem Redoxpotential!)	Oxidation, Alkalisierung
Al Zwischenschichtaluminium, Aluminiumhydroxosulfate	<4,2	Al ³⁺ in Lösung (*oder, Reduktion der permanenten Ladung), SO ₄ [*] Silikatumbau, jedoch überwiegend Abbau	Podsolierung und Tonabbau
Al/Fe Al (s. oben) und Fe(OH) ₃	< 3,8	Organische Fe-Komplexe*	
Eisen Ferrihydrit	< 3,2	Fe ^{3+*}	

*Auswaschung, **Ausgasung, Fällung, ***Einbau in Minerale, => wird zu

Tab. 2: Berechnete theoretische Versauerungsraten in Abhängigkeit vom pH-Wert der Bodenlösung, dem CO₂-Gehalt der Bodenluft und der Sickerwasserrate (berechnet für T = 15 °C)

CO ₂ -Gehalt der Bodenluft (Vol.-%)	pH (Boden)	HCO ₃ ⁻ (mmol/l)	Versauerungsrate bei Sickeraten von		
			100 mm	200 mm	400 mm
			(kmol ha ⁻¹ a ⁻¹)		
0,50	5,00	0,01	0,01	0,02	0,04
1,00		0,02	0,02	0,04	0,07
2,00		0,04	0,04	0,07	0,15
0,50	6,5	0,27	0,27	0,54	1,07
1,00		0,54	0,54	1,07	2,15
2,00		1,07	1,07	2,15	4,30
0,50	7,50	2,94	2,94	5,89	11,78
1,00		5,89	5,89	11,78	23,55
2,00		11,78	11,78	23,55	47,11

CO₂ der Atmosphäre 0,03 %.

Tab. 3a): Pufferkapazität von Gesteinen in kmol ha^{-1}

Gestein	Charakteristische Minerale	Jährliche Pufferung $\text{kmol ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	Äquivalenter S-Eintrag $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Granit Quarzit	Quarz K-Feldspat	< 0,2	< 3
Granit Gneis	Muskovit Plagioklas Biotit (< 5 %)	0,2 - 0,5	3 - 8
Granodiorit Grauwacke Gabbro	Biotit Amphibole (< 5 %)	0,5 - 1,0	8 - 16
Gabbro Basalt	Pyroxen Epidot Olivin (< 5 %)	1,0 - 2,0	16 - 32
Kalkstein	Carbonat	> 2,0	> 32

Tab. 3b): Pufferkapazität von Mineralien in kmol ha^{-1} (Raumgewicht $1,5 \text{ g/m}^3$, Bodentiefe 0-50 m)

Puffersubstanz	gesamte Pufferkapazität kmol ha^{-1}	Pufferkapazität schnell wirksamer Puffersubstanzen $\text{kmol ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
1 % CaCO_3	1500	1500
Silikatpufferkapazität (1 % Silikat):		
Silikate mit leicht verwitterbaren Mineralen (Olivin, Augit, Hornblende, Biotit)	750 - 1000	0,5 - 2
Silikate mit schwerer verwitterbaren Mineralen (Muskovit, Feldspat ³⁾)	150 - 350	< 0,2 - 0,5
Quarz	0	
Tonminerale ¹⁾ je 1 % Ton:		austauschbare Kationen bei 100 % Basensättigung
Kaolinit 0 < Smectit < Illit	0 – 500	0 – 40
primärer Chlorit, Vermiculit	450 - 1000	50 - 150
Mn-Oxide (0 - 1g/kg)	0 - < 546 ⁵⁾	0 - < 546
Al-Pufferkapazität je 1 % Silikat:		0,8 - 3 g/kg oxalatlösliches Al ⁴⁾
Silikate mit leicht verwitterbaren Al-armen Mineralen (Olivin, Augit, Biotit)	0 - 500	
Silikate mit schwerer verwitterbaren Mineralen (Muskovit, Feldspat) außerdem Hornblende und die meisten Tonminerale	750 - 1750	220 - 850

¹⁾ Die Pufferkapazität von Tonmineralen ist vor allem von der Schichtladung und der Mg-Belegung der Oktaeder abhängig, so daß die für die Dreischichtmineralen angegebenen Pufferkapazitäten nur Orientierungswerte darstellen. Mit abnehmenden pH-Wert des Bodens nimmt die Pufferkapazität von Tonmineralen ab.³ Ca-Feldspat $500-600 \text{ kmol ha}^{-1}$

⁴⁾ oxalatlösliches Al enthält die Al-Fractionen aus organischen Komplexen, nichtkristallinen Oxiden und Allophanen, bei der Berechnung der Pufferkapazität wurde davon ausgegangen, daß Al als $\text{Al}(\text{OH})_3$ vorliegt. Bei stark sauren Böden verringert sich die Pufferkapazität bei teilweiser Protonierung von $\text{Al}(\text{OH})_3$ bei gleichen oxalatlöslichen Al-Gehalten.

⁵⁾ Mn-Oxide können Mn in 2-, 3- und 4-wertiger Form enthalten. Bei der Berechnung der Pufferkapazität wurde davon ausgegangen, daß die Mn-Oxide in der vierwertigen Form vorliegen.

6. Exporte von Säureneutralisationskapazität

6.1 Auswaschung

Die Auswaschung ist gebunden an die Sickerung zum Zeitpunkt des Vorkommens auswaschbarer Reaktionsprodukte aus der Protonen-Pufferung und des Anfalls von Protonen. Die Pflanzenaufnahme wirkt der Auswaschung entgegen (Tab. 4).

6.2 Ernteentzüge

Da Pflanzen mehr metallische Kationen als Anionen starker Säuren aufnehmen und im Auflagehumus ein Kationenüberschuß enthalten ist, der dem Mineralboden entzogen wurde, führt dies zu einer Versauerung in der Höhe des in der Pflanzensubstanz und im Auflagehumus enthaltenen Kationenüberschusses von Böden. Der Kationenüberschuß hängt von Pflanzenart, Pflanzenertrag und der Form der N-Ernährung (der Kationenüberschuß ist bei Nitraternahrung höher als bei Ammoniumernährung) ab. Größenordnungen des Kationenüberschusses verschiedener Pflanzenarten sind in Tab. 5 dargestellt.

6.3 Vergleich von atmogener und anthropogener Versauerung

Die geschätzte anthropogene Versauerung seit dem Neolithikum ist mit 500 bis 700 kmol ha⁻¹ im Vergleich zur gesamten Bodenversauerung im Holozän bei Böden mit großem Silikat- und Karbonatpuffer zwar gering, nicht jedoch bei pufferarmen Böden aus Sand (siehe Tab. 6), wo die anthropogenen Säureinträge (500 bis 700 kmol ha⁻¹) zu einer Versauerung bis in den Al/Fe- und Fe-Pufferbereich geführt haben. Die Wirkung einer nutzungsbedingten Versauerung durch Kationüberschußentnahme liegt in einer Nährstoffverarmung und Förderung der Podsolierung, bei der die Versauerung auf den Oberboden beschränkt bleibt.

Die anthropogene Bodenversauerung durch Kationüberschußentnahme wurde für zwei Waldbestände des Südschwarzwaldes bei vorsichtiger Schätzung seit dem 14. Jahrhundert auf 480 und seit dem 17. Jahrhundert auf 200 kmol ha⁻¹ geschätzt, was einer jährlichen Versauerungsrate von 0,8 kmol ha⁻¹ entspricht und für weite Gebiete Mitteleuropas typisch sein dürfte.

Tab. 4: Geschätzte Pufferkapazität, Entkalkung und Abnahme der Silikatpufferkapazität seit Beginn des Holozän (ca. 10000 Jahre) bei physikalisch vorverwittertem Gestein für eine Tiefe von 0-50 cm und einer Trockenraumdichte von 1,5 g/cm³ für typische Bodenlandschaften Baden-Württembergs.

Gestein / Region	Einheiten	Bundsandstein / Nordschwarzwald	Granit / Südschwarzwald	Kalkstein / Schwäbische Alb	Geschiebemergel/ Oberschwaben (Würm)	Löß / Kraichgau	Basalt / Vorderland der Schwäbischen Alb
Niederschlag	mm	90-2000	1200-2000	750-850	700-1200	700-750	750-850
Potentielle Verdunstung	mm	450-650	400-500	500	500-550	600-650	500
Klimatische Wasserbilanz	mm	450-1550	700-1400	250-350	200-650	50-150	250-350
Steingehalt	(Vol.-%)	40	50	20	35	0	0
Humusgehalt	(%)	2	2	3	2	2	2
Bodenart		us - IS	IS	1T	sL-uL	uL	tL
KAK _{pot} ^a	mmol/kg	45-80	80	300	150-215	215	245
Carbonatgehalt	(Gew.-%)	0	0	95	30	20	0
Pufferkapazität des Feinbodens							
Carbonatpuffer	kmol·ha ⁻¹	0	0	140000	30000	30000	0
Silikatpuffer ^b	kmol·ha ⁻¹	6500	10000	65000	7000	> 10000c	60000
A1-Pufferbereich	kmol·ha ⁻¹	24000	30000	40000	23000	41000	60000
austauschbare Basen ^d	kmol·ha ⁻¹	120-220	180	1100	440-630	970	1100
geschätzte jährl. HCO ₃ -Auswaschung u. Silikatpufferung (natürliche Säurebelastung durch atmogene Einträge u. NO ₃ -Auswaschung beträgt 0,2 - 0,33 kmol ha ⁻¹ ·a ⁻¹ ^e)							
theoretische HCO ₃	pH 5,0	0,07-0,23	0,11-0,21	0,04-0,05	0,03-1	0,01-0,02	0,03-0,05
Auswaschung Gehalt bei der Bodenluft	pH 6,0	1,8-6,3	2,8-5,7	1,0-1,4	0,8-2,6	0,2-0,4	1,0-1,4
Gehalt bei der Bodenluft 0,5-1% CO ₂	pH 7,0	6,3-21,6	9,8-19,5	3,5-4,9	2,8-9,0	0,7-1,4	3,5-4,9
	pH 7,5	---	---	11-13,2	8,8-28,7	2,2-6,6	---
Silikatpufferraten	Kmol·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	0,2-0,4	0,2-0,5	0,5-2?	0,2-0,5	0,2-0,6	1-2
theoretische Abnahme der Pufferkapazität seit dem Holozän (10000 Jahre)							
theoret. Entkalkung	kmol·ha ⁻¹	---	---	110000-132000	9000-30000	11000-30000	---
Entkalkungsdauer	Jahre	---	---	>10000	1000-3400	4500- > 10000	---
Silikatverwitterung= (Basenverluste)	kmol·ha ⁻¹	2000-4000	2000-5000	---	2000-5000	2000-6000	10000-20000

a berechnete KAK für Böden südwestdeutschlands in Abhängigkeit von Bodenart, Ausgangsgestein und Humusgehalt (Praktikumsanleitung Universität Stuttgart)

b Berechnung aufgrund typischer Gesteinszusammensetzung nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1989).

c die Na-Gehalte des Lößgesteins sind bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da sie nicht bestimmt werden.

d Bei pH = 4,5, was in etwa einer Basensättigung von 60 % bei Erreichen des Austauscherpufferbereichs entspricht.

e Bei der HCO₃ Versäuerungsrate wird ein mittlerer jährlicher CO₂-Gehalt der Bodenluft von 0,5 bis 1,0 % angenommen

f Die Sickerwasserraten, berechnet nach rezenten Klimadaten, sind wahrscheinlich zu niedrig.

Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen werden hohe Versauerungsraten durch Ernteentzug und physiologisch saure Dünger erzielt (z.B. entsprechen 200 kg NH₄-N, als Ammonsulfat gedüngt, 28 kmol H⁺).

Eine Aufstellung der unterschiedlichen Protonenbelastung nach Herkunft (Importe, Exporte) siehe Tab. 6.

Die geschätzte Gesamtbelastung durch anthropogene Säureeinträge seit Beginn der Industrialisierung (Jahr 1870) ist mit etwa 20 - 200 kmolha⁻¹ im Vergleich zur nutzungsbedingten historischen Versauerung relativ gering. Die derzeitige Säurebelastung durch atmogene Einträge liegt in Baden-Württemberg unter Fichte mit 0,5 bis 3 kmolha⁻¹a⁻¹ in der Regel deutlich über der nutzungsbedingten Versauerung vergangener Jahrhunderte.

Der atmogene Eintrag insgesamt von mobilen anorganischen Anionen führt zu einer sehr tiefgründigen Bodenversauerung und stellt eine besondere Gefährdung von Grund- und Oberflächengewässern dar.

Tab. 5: mittlerer jährlicher Kationenüberschuß im Erntegut verschiedener Pflanzen.

Pflanzenart	Pflanzenteil	Ertrag	Kationenüberschuß kmol ha ⁻¹ a ⁻¹
Wintergetreide	Korn	50	0,05 - 0,2
	Stroh	50	1,8 - 2,3
Zuckerrüben	Rüben	100	3,0
	Blatt	70	15,0
Wiese 1. Schnitt		30	2,3
Rotklee		60	7,80
Buche	gesamte Biomasse		0,2 - 0,7
	Holz und Rinde		0,1 - 0,3
Fichte	gesamte Biomasse		0,4 - 1,3
	Holz und Rinde		0,2 - 0,5
Jungbestand	gesamte Biomasse		5
Fi/Bu			

Tab. 6: Abschätzung der durchschnittlichen jährlichen Protonenbelastung in kmol ha⁻¹ a⁻¹ der natürlichen und anthropogenen Protonenquellen in Böden:

a: Raten natürlicher Bodenversauerung:

H ⁺ -Quelle	Wald pH > 4,5	Wald pH 4,5 - 7,0	Wald pH 7,0 - 8,2	Landwirtschaftliche Nutzfläche pH 4,5 - 7,0	Landwirtschaftliche Nutzfläche pH 7,0 - 8,2
atmogene Einträge	0.15 - 0,2	0.15 - 0,2	0.15 - 0,2	0.15 - 0,2	0.15 - 0,2
HCO ₃ ⁻	0	0 - 4	2 - 20	0 - 4	2 - 20
Nitrat	0,07-0,14 ¹⁾	0,07-0,14 ¹⁾	0,07-0,14 ¹⁾	0,07-0,14 ¹⁾	0,07-0,14 ¹⁾
organische Anionen	0 - 0,7 ²⁾	0	0	0	0
Auflagehumus	0 - 100 kmol ha ^{-1 3)}	0 - 100 kmol ha ^{-1 3)}			
Biomasse ⁶⁾	50 - 200 kmol ha ^{-1 3)}	50 - 200 kmol ha ^{-1 3)}			

b: Raten anthropogener Bodenversauerung:

H ⁺ -Quelle	Wald pH > 4,5	Wald pH 4,5 - 7,0	Wald pH 7,0 - 8,2	Landwirtschaftliche Nutzfläche pH 4,5 - 7,0	Landwirtschaftliche Nutzfläche pH 7,0 - 8,2
atmogene Einträge ⁵⁾	0,3 - 2,8 (4)4	0,3 - 2,8 (4)4	0,3 - 2,8 (4)4	> 0,2 - 0,6 (-28)4	> 0,2 - 0,6 (-28)4
Nitrat	0 - 44)	0 - 44)	0 - 44)	0 - 28	0 - 28
organische Anionen	0 - 0,72)	0 - 0,72)	0 - 0,72)		
Ernteabfuhr	0,15 - 1,3	0,15 - 1,3	0,15 - 1,3	0 - 20	0 - 20

¹⁾ bei N₂-Fixierern, wie z. B. Erlen bis 4 kmol ha⁻¹ a⁻¹, wobei bei Standorten mit hohen pH-Werten und hohen verfügbaren N-Gehalten vermutlich auch natürlicherweise eine höhere Nitratauswäscherung stattfindet.

²⁾ im Oberboden 0->2 kmol ha⁻¹ a⁻¹

³⁾ gesamter Kationenüberschuß (kmol/ha) im Auflagehumus bei Zersetzungshemmung vor allem bei stark sauren Böden (pH<4,5) bzw. in der Biomasse.

⁴⁾ Nitrat meist zwischen ca. 0-1,5 kmol ha⁻¹, wobei auf Standorten mit hohem pH-Wert und hohen verfügbaren N-Gehalten im allgemeinen höhere Nitratausträge als bei stark sauren Böden mit meist geringen verfügbaren N-Gehalten auftreten.

⁵⁾ da die Nitratauswascherung bei dieser Berechnung schätzungsweise mit erfaßt wird, ergeben sich bei Mitberücksichtigung der Nitratauswascherung insgesamt zu hohe Werte für die Versauerung.

⁶⁾ Entzüge von SNK durch Speicherung

6.4 Erosion

Erosion erneuert die SNK in der Regel, sofern nicht Böden mit hoher SNK (z. B. gemergelte/gekalkte Böden auf Ton/Sandsteinen des Buntsandstein u. ä.) über Gestein mit geringer SNK liegen.

7. Wirkung der Versauerung in Landschaften und Böden

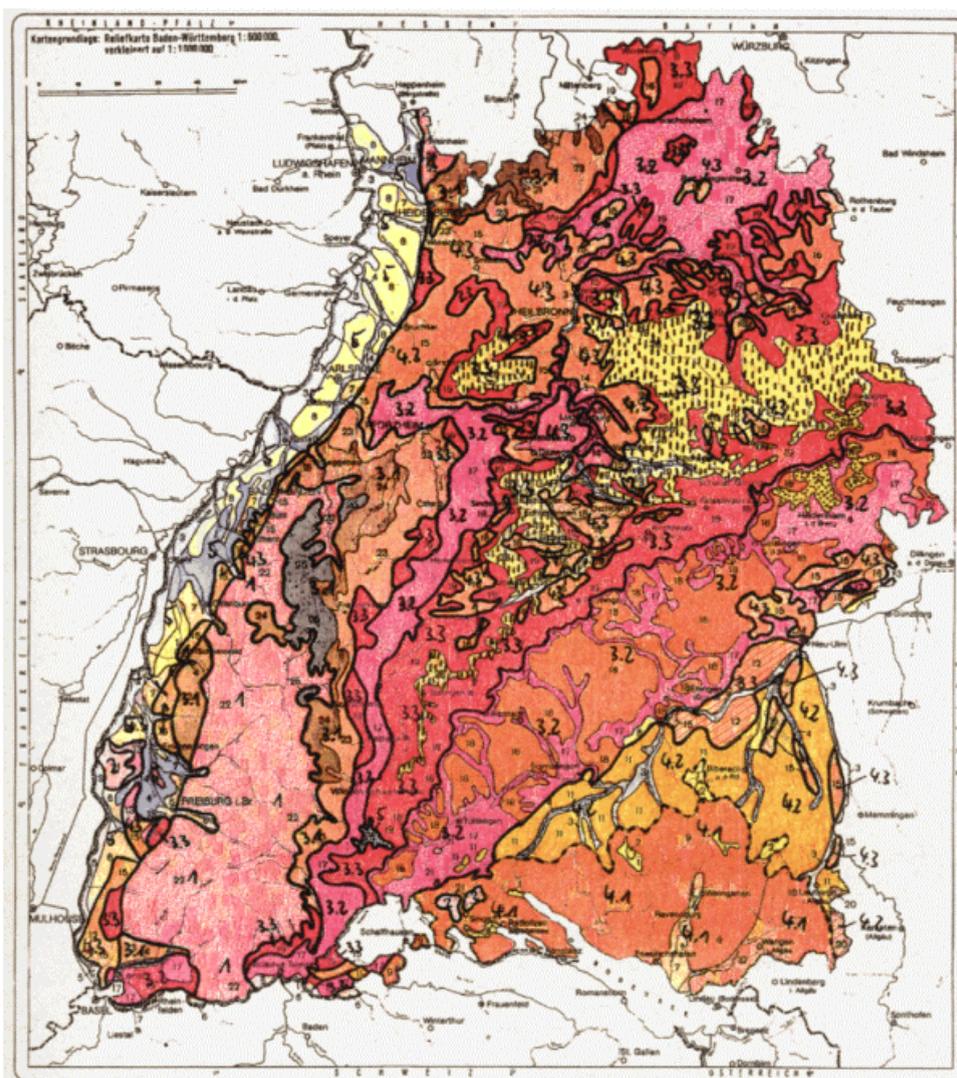
7.1 Bodenmuster

Böden entstehen aus Gesteinen durch den Einfluß des Klimas (und mit diesem verknüpft der Vegetation und des Menschen). Je nach Niederschlägen, Nutzung und lithogenen Puffersystemen entwickelten sich die Böden in den letzten 15 000 Jahren (Abb. 3).

Böden sind um so stärker versauert

- je quarzreicher sie sind z. B. Granit und Gneis des Grundgebirges von Odenwald und Schwarzwald und Sandsteine des mittleren Buntsandsteins und Keupers.
- je höher die Niederschläge sind, z. B. im Hochschwarzwald und Voralpenbereich.
- je älter sie sind, z. B. Böden auf Terrassen der Günz stärker als die der Würmeiszeit, umgelagerte Rot- und Feuersteinlehme der Kreide bzw. des Tertiärs auf der Ostalb und verwitterte Löss (lehmige Albüberdeckung) auf der schwäbischen Alb. (Siehe hierzu auch pH-Werte von Böden unter Fichte in Baden-Württemberg in Abb. 4.)
- Der Verlust an Säureneutralisationskapazität reicht um so tiefer je grobporenreicher der Boden ist (bzw. je besser die vertikale Sickerung ist).

Auf quarzreichen Böden mit geringen Silikatverwitterungsraten kann die schnell wirksame Pufferkapazität des Austausch-Pufferbereichs und damit die verfügbaren Nährstoffreserven (austauschbare Kationen) bereits durch die Kationenüberschußakkumulation in der Biomasse der Vegetation so stark beansprucht sein, daß sich bereits zu Beginn der Bodenbildung schwer zersetzbare Streu liefernde Pioniergesellschaften ansiedeln. Die durch Nährstoffarmut und/oder ungünstige klimatische Verhältnisse bedingte Zersetzungshemmung der Streu wird verstärkt, wobei Moder- und Rohhumusformen entstehen, aus denen leicht lösliche stark saure organische Säuren ausgewaschen werden, die natürlicherweise zu einer sehr starken Oberbodenversauerung führen.



Bodenschichten Baden-Württembergs

	Plateau	Kuppe	Steilhang	Flachhang	Senke/Aue	Säureneutralisationskapazität
1. Grundgebirge Schwarzwald und Odenwald	Braunerde Podsol	Braunerde	Ranker	Braunerde, Gley, Pseudogley	Gley, Kolluvium	mittel
2. Magmatite Kaiserstuhl und Hegau	-	Braunerde	Ranker	Pseudogley, Braunerde	Gley, Kolluvium	hoch
3. Schichtstufen 3.1 Sand-(Tan-)Steine des Buntsandsteins Schwarzwald und Odenwald	Bändchen-Podsol bis Moor Stagnogley bis Anmoor	Podsol podsolige Braunerde	Ranker, Podsol Braunerde, Ranker	Pseudogley-Braunerde Pseudogley-Braunerde	Regosol, Gley Gley, Niedermoor	bei Tonstein hoch bei Sandstein gering
3.2 Kalk des Muschelkalk und Jura Aib, Neckarland und Heftenhohle	Braunerde, Terra fusca	Rendzina	Rendzina	braune Rendzina Kolluvium	Kolluvium Kalkteile	hoch
3.3 Tone und Mergel der Trias, des Jura und der Molasse Neckarland, Albvorland, Keuperberg- land in engen Wechsel mit Sandstein	Peliosol-Pseudogley bis Stagnogley mit Podsolen	Mergel- rendzina mit Rankern	Peliosol mit Braunerde	Peliosol-Pseudogley mit Braunerde- Pseudogley	Auenboden, Kolluvium, Gley z. T. Niedermoor	hoch bei Sandstein gering
4. Eiszeitliche Sedimente 4.1 Altmoräne nördliches Oberschwaben	Pseudogley	Parabraunerde (leifgründig)	Pararendzina	Parabraunerde- Pseudogley	Kolluvium, Gley, Hochmoor	mittel Hochmoor sehr gering
4.2 Jungmoräne südliches Oberschwaben	Pseudogley- Parabraunerde	Parabraunerde (flachgründig)	Pararendzina	Parabraunerde- Pseudogley	Gley, Niedermoor	hoch
4.3 Löss mittlerer Neckar, Kraichgau, Hohenlohe, Vorberg des Schwarz- waldes, Lutherische Berge	Pseudogley- Parabraunerde	Parabraunerde	Pararendzina	Parabraunerde- Pseudogley	Kolluvium, Auenböden, Gley	hoch
5. Breite Flusstäler Rhein, Iller, nördliche Donau	Niederrasse Parabraunerden	Aue: Niedermoor, Gley, Patemia, Ranker Aue (bedeicht): Niedermoor, Gley, Pararendzina	1 3 4 5			4

Abb. 3 Böden Baden-Württembergs (nach geol. Landesamt Freiburg; verändert)

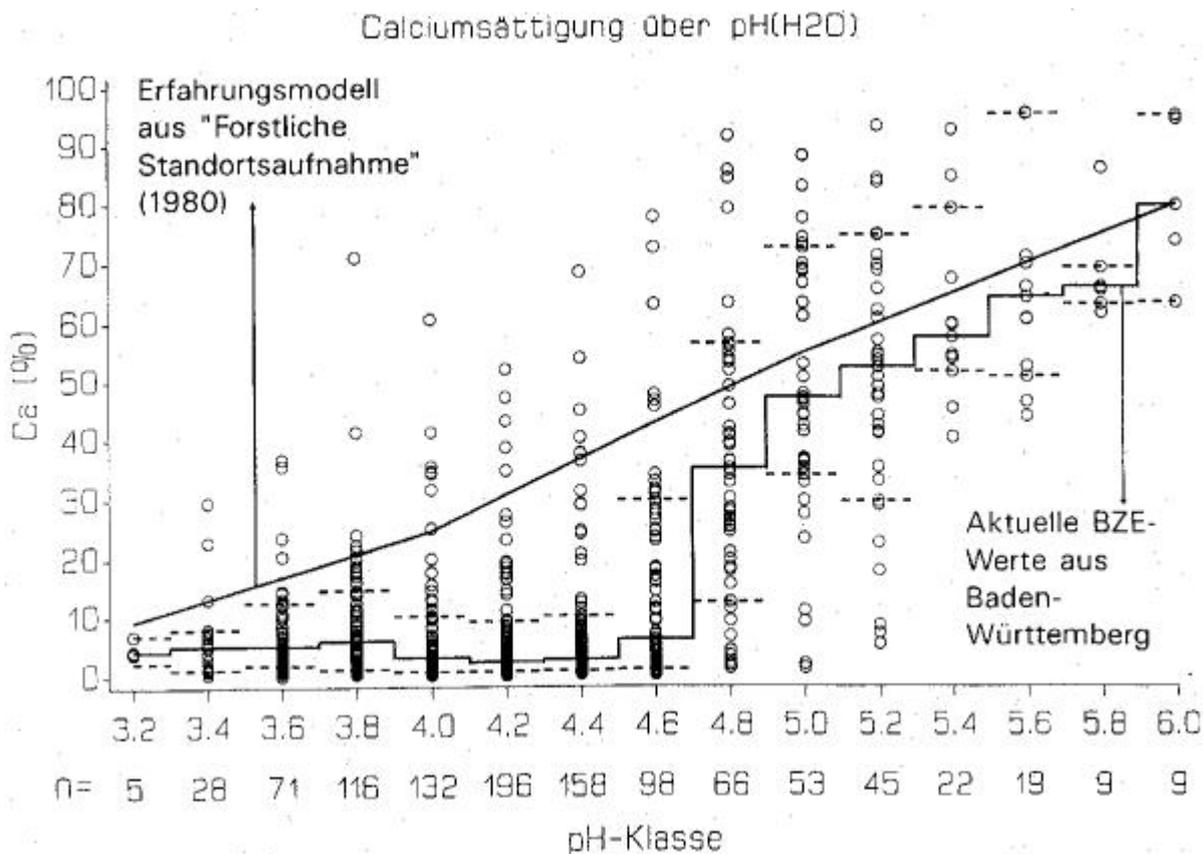


Abb. 4 Beziehung zwischen Bodenreaktion (pH H₂O) und Calciumsättigung in Nadelholzbeständen Baden-Württembergs (Medianwerte mit 13. und 87. Perzentil) und als Schätzfunktion (Forstliche Standortaufnahme, 1980, und Hildebrand, E.E. 1996).

7.2 Böden mit Karbonat-Puffer

Auf Kalkstein der Schwäbischen Alb wurden im Holozän etwa 40 bis 50 cm gelöst. Bei einem Lösungsrückstand des Kalksteins von 5 % wurden dabei etwa 1-2 cm Boden gebildet.

Es wird viel Ca (und Mg) gelöst, welche an Pflanzenwurzeln die K-Aufnahme durch Ionenkonkurrenz vermindern, mit der Folge hoher notwendiger K-Düngung (und entsprechend hoher K-Auswaschung).

Silikate (von Insel- und Bandsilikaten abgesehen) verwittern nicht, mit der Folge von Spurenelement-Mangel (Fe, Mn u. a.), geringer K-Mobilität und geringer Tonmineralneubildung (Verlehmung), die in sandig-schluffigem Ausgangsmaterial die nutzbare Feldkapazität und das Speichervermögen für K (über die Kationenaustauschkapazität) erhöhen würde.

Phosphate werden nur in geringen Mengen freigesetzt.

Der Abbau eines Karbonatpuffers erhöht in der Regel die Ausnutzung von K-Düngern, die verfügbaren Mengen an P, K und Spurenelementen, die nutzbare Feldkapazität und die Speicherkapazität für Kalium.

7.3 Böden mit Silikat-Puffer

Bei kalkfreien bzw. entkalkten Böden sinkt der pH-Wert schnell auf den Wert, bei dem die Basenauswaschung durch Kohlensäuredissoziation der Basennachlieferung aus der Silikatverwitterung entspricht. Auf Basalt und bei tonreichem Kalklösungsrückstand mit hohem Vorrat an leicht verwitterbaren Silikaten stellt sich bei geringen Sickerwassermengen ein pH von etwa 6 ein, während basenarme Böden mit geringen Silikatverwitterungsraten schnell bis pH 5 versauern. Da die Kohlensäure unterhalb von pH 5 kaum noch versauernd wirkt, reicht die Silikatverwitterungsrate der meisten Böden dann aus um die natürlichen Einträge starker Säuren und die Versauerung durch die natürliche Nitratauswaschung abzapuffern ($0,2-0,33 \text{ kmol ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Alkali- und Erdalkali-Elemente, Spurenelemente und Phosphor werden mobiler und von Pflanzen aufgenommen (verbessern also deren Wachstum), aber auch mit dem Sickerwasser ausgewaschen oder in festere Bindungen (z. B. Mo und P) überführt. Aluminiumionen werden freigesetzt und behindern Pflanzenwachstum durch Toxizität.

Langfristig nehmen also die Vorräte an Alkali- und Erdalkali-Elementen (sofern sie nicht schon lithogen gering waren) und, bei sehr niederem pH, auch an Spurenelementen ab.

7.4 Nährstoffmangel unter Fichte nach Nadelanalysen

Ca ist im Odenwald, Schwarzwald und in sauren Böden des Alpenvorlandes gering, aber noch nicht im Mangel.

Mg ist in den obigen Gebieten schon überall im Mangel.

K ist im Mangel auf sauren Böden des Alpenvorlandes und auf Kalkstein von Muschelkalk und Jura; jedoch noch nicht im Mangel in Odenwald und Schwarzwald wegen des kaliumreichen Mineralbestandes.

Die Höhe der Nährstoffvorräte und deren Mobilität hängt im wesentlichen vom Mineralbestand, dessen Verwitterungsgrad und von der Umsetzungsgeschwindigkeit der organischen Substanz ab.

7.5 Zersetzungshemmung der organischen Substanz

Nährstoffarmut von Böden fördert Flachwurzler mit hoher Feinwurzelmasse und schlecht abbaubarer Streu in (Rohwurzelmasse) und auf Böden. Ob toxische Aluminiumionen oder Nährstoffarmut in Mineralboden den Wurzeltiefgang behindern, ist umstritten; sicher ist die hohe Anfälligkeit auf Trockenheit wegen des geringen durchwurzelten Bodenvolumens. Die Hemmung der Zersetzung von organischer Substanz führt zu Humusformen wie Moder und Rohhumus mit weitem C/N-Verhältnis, die nur alle paar Jahre bei günstigen Bedingungen abgebaut werden können. Dementsprechend werden die knappen Nährstoffe in der Streu nur langsam nachgeliefert.

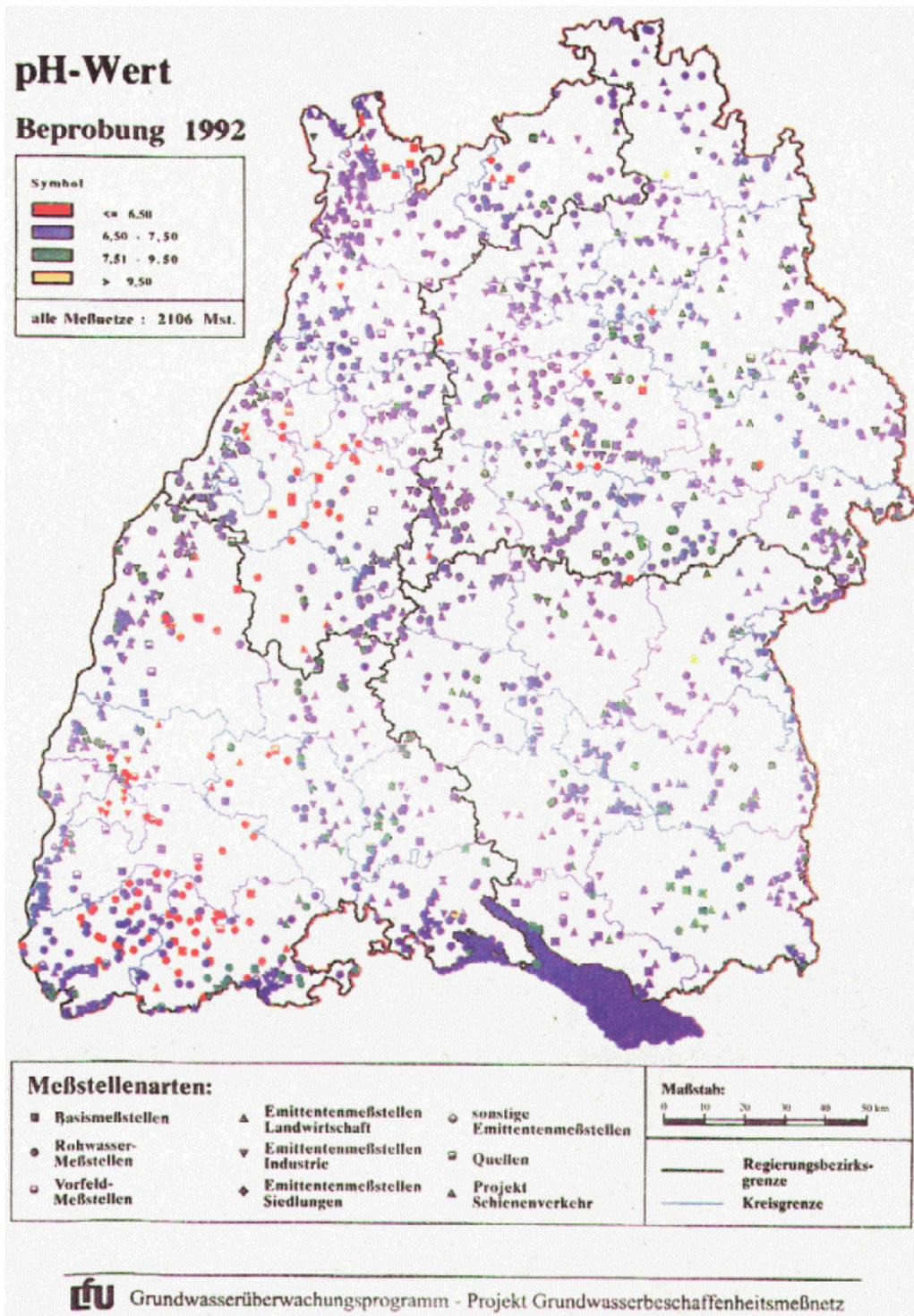
7.6 Gewässer

Sofern das Gestein den H^+ -Import aus Böden nicht puffert, werden H^+ - und Al^{3+} -Ionen in Grund- und Oberflächenwasser eingetragen, bzw. Säure-Anionen, wie organische Säuren (aus Hochmoor und Podsollandschaften) und anorganische Säuren (SO_4^{2-} aus atmogenem Eintrag).

7.6.1 Grundwasser

Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (pH 6,5) wird großräumig im Schwarzwald und im Odenwald auf Mittlerem und Unterem Buntsandstein und im Kristallin unterschritten. Niedrige pH-Werte treten auch bei oberflächennahen Quellen des Stubensandstein und im Lias/Keuperbergland auf (Abb. 5).

Abb. 5: pH-Wert Grundwasser, Beprobung 1992



Besonders betroffen von der Grundwasserversauerung sind vor allem flache Deckschichtenquellen mit bewaldetem Einzugsgebiet. Jedoch auch Kluftaquifere des Mittleren und Unteren Buntsandsteins weisen pH-Werte um 4 bis 4,5 auf, was bedingt ist durch die schnelle Sickerung und Basenarmut des Gesteins. Im Oberen Buntsandstein gibt es Wässer mit pH-Werten um 5 nur bei episodisch schütten-den Quellen mit oberflächennahem Einzugsgebiet. Ansonsten haben die Wässer des Oberen Bunt-sandstein meist neutrale pH-Werte.

Im Grundwassermeßnetz der LfU traten bei üblicherweise stark sauren Grundwässern des Mittleren Buntsandsteins besonders nach Starkniederschlägen und in der Schneeschmelze häufig huminstoff-haltige und saure Wässer auf, bei denen teilweise die Al-Gehalte die Grenzwerte der Trinkwasserver-ordnung deutlich überschritten und erhöhte Mn-, Ni- und Cd-Gehalte gemessen wurden. Die Nitrat- und Sulfat-Konzentrationen der Quell- und Grundwässer haben eine ähnliche Verteilung (räumlich wie zeit-lich) wie die Depositionen.

7.6.2 Fließgewässer

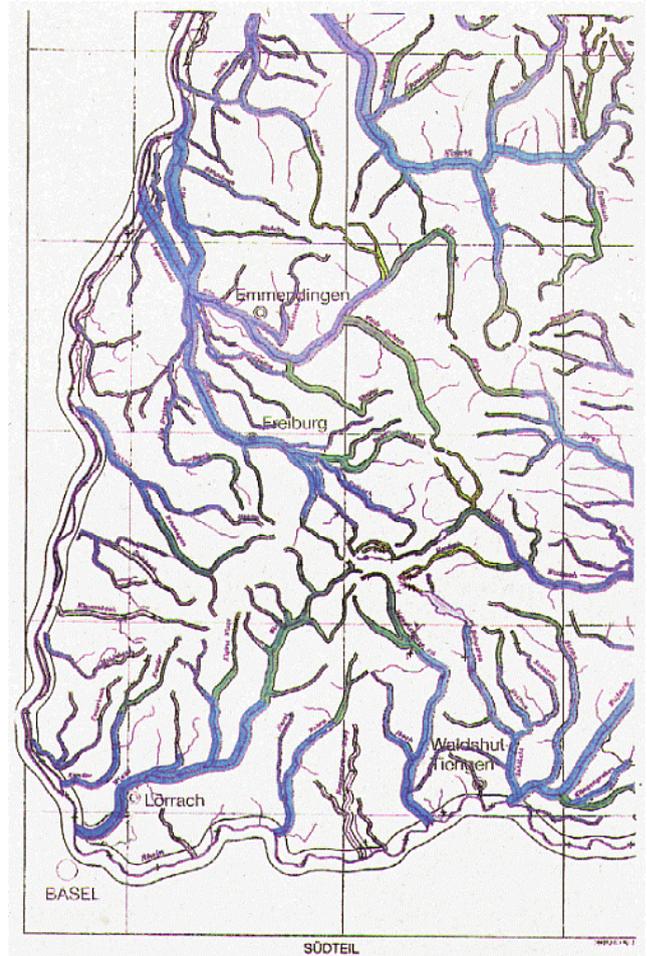
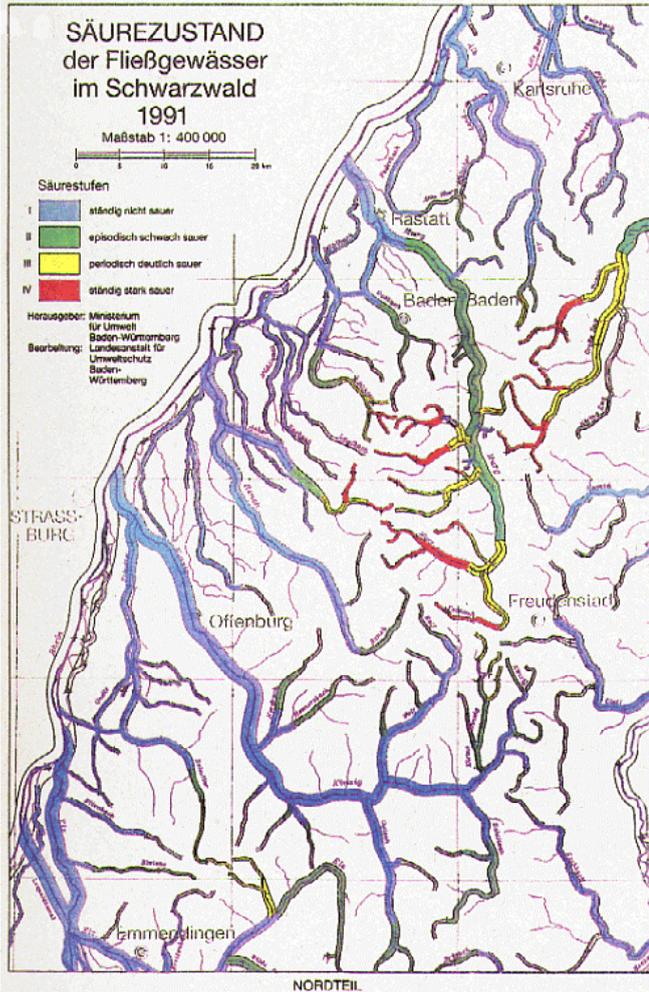
Die Versauerung von Fließgewässern des Schwarzwaldes und Odenwaldes wurde 1990-1991 mit Bio-Indikatoren kartiert (Abb. 6). Mit zunehmendem Säuregrad nimmt die Besiedlungsdichte und Artenviel-falt der wirbellosen Kleintiere und der Fischfauna ab. Schnelle pH-Absenkungen können bei gleichzeiti-ger Erhöhung der Al-Konzentration z. B. nach Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen zu akuten Fischsterben führen. Besonders stark versauert sind die Oberläufe von Murg und Enz im Nord-schwarzwald, deren Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet des mittleren Buntsandstein stammen. Perma-nent sauer sind nur einige Bachoberläufe in granitischen Einzugsgebieten, während im etwas puffer-stärkeren Gneisgebiet mit höherem Mischwaldanteil nur einige wenige Bäche episodisch sauer sind.

7.6.3 Seen

1985 bis 1992 wurden in 44 Seen Baden-Württembergs pH-Werte von Wasser und Sedimenten ge-messen. Besonders stark versauert sind die kleinen eiszeitlichen Seen in den Hochlagen der Bunt-sandsteingebiete des Nordschwarzwaldes (Herrenwieser See, Schurmsee, Buhlbachsee, Huzenba-cher See und Mummelsee) mit pH-Werten zwischen 4,3 und 5,3 und toxischen Al-Gehalten für Was-serorganismen. Geringe Pufferkapazität mit pH-Werten zwischen 6,3 und 7,8 weisen die Seen im Südschwarzwald auf, während die Seen in Oberschwaben eine hohe Pufferkapazität und pH- Werte zwischen 7,6 und 8,3 besitzen.

Beim dystrophen (sauer, nährstoffarm, durch Huminstoffe braun gefärbt) Herrenwieser See und Wild-see im Mittleren Buntsandstein des Nordschwarzwaldes konnte mit Hilfe von paläolimnologischen Un-tersuchungen der Einfluß der Nutzungsgeschichte auf den Säuregrad der Seen gezeigt werden. Beide Seen weisen wahrscheinlich bereits von Natur aus pH-Werte zwischen 4,5 und 5 auf. Beim Herren-wieser See ist seit Mitte des 18. Jahrhunderts eine deutliche pH-Abnahme festzustellen, die mit der Zunahme der Fichten- und Kiefernbestockung übereinstimmt und in den letzten Jahrzehnten vermut-lich durch anthropogene Säureinträge verstärkt wurde, während beim Wildsee in den letzten Jahr-zehnten eine pH-Zunahme beobachtet wurde, die wahrscheinlich durch die Aufforstung der stark vernässten Weiden und des dadurch verringerten lateralen Abflusses verursacht ist.

Abb. 6 Säurezustand der Fließgewässer im Schwarzwald 1991



8. Maßnahmen gegen Bodenversauerung

Der Versauerung kann, je nach Nutzungsziel einer Fläche, begegnet werden durch Anpassung von Pflanzen an den Standort durch Züchtung oder durch Anpassung des Standorts an Pflanzen durch Melioration. Sinnvoll wäre Vermeidung der anthropogenen Bodenversauerung durch Verminderung der Emission von starken Säuren aus der Verbrennung und der Ersatz des Kationenentzugs durch Ernten und Auswaschung durch Düngung mit Kationen.

Vorliegende starke Bodenversauerung kann nur noch durch Melioration beseitigt werden und zwar durch Tiefpflügen (Zufuhr von Säureneutralisationskapazität aus dem Untergrund), durch Kalkung mit Düngung auf sandigen Lehm- bis Tonböden unter Berücksichtigung der Nitratfreisetzung aus dem Streuabbau und durch Zufuhr leicht verwitterbarer Silikate (z. B. Basaltmehl oder Tonschluffmergel) auf sandigen Böden, um auch die Wasserspeicherleistung zu erhöhen (ggfs. kann auch Bodenaushub bodenverbessernd eingesetzt werden.)

9. Literatur

- /1/ GRYSCHKO, R. & D. HORLACHER, 1996: Bodenversauerung - Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen - Literaturstudie -. LfU, Texte und Berichte zum Bodenschutz Bd 3b/96. Karlsruhe.
- /2/ EVERS F. H. & W. SCHÖPFER, 1988: Ergebnisse der Belastungsinventur Baden-Württemberg 1983 - Dokumentationsband -, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, S. 166.
- /3/ HEPP R. & E. E. HILDEBRAND, 1993: Stoffdeposition in Waldbeständen Baden-Württembergs, AFZ, S. 1139-1142.
- /4/ HOCHSTEIN E. & E. E. HILDEBRAND, 1992: Stand und Entwicklung der Stoffeinträge in Waldbestände von Baden-Württemberg., Allg. Forst- u. J.-Ztg., 163, S. 21-27.
- /5/ LfU BADEN-WÜRTTEMBERG, 1992 c: Gütezustand der Gewässer in Baden-Württemberg 7, Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 27.
- /6/ LfU BADEN-WÜRTTEMBERG, 1992 d: Grundwasserüberwachungsprogramm - Ergebnisse der Beprobung 1991.
- /7/ HILDEBRAND, E. E., v. WILPERT, K. und BUBERL, H. G. (1996): Erkenntnismöglichkeiten an Waldökosystemen im Spannungsfeld zwischen großräumiger Mustererkennung und dem "eisernen Gesetz des Örtlichen". Allg. Forst- u. J. Ztg., im Druck
- /8/ Arbeitskreis Standortkartierung in der AG Forsteinrichtung (1980): Forstliche Standortaufnahme. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 188 S.

Indexverzeichnis

Auswaschung	9	Pufferung	
Böden		von Säuren in Böden	3
Mineralbestand	1	Säurebildung	
mit Karbonat-Puffer	16	in Böden	2
mit Silikat-Puffer	17	Säureeintrag	
Säurebildung	2	in Böden	2
Säureeintrag	2	in Gewässer	17
Versauerung	14	Säurepufferung	
Bodenversauerung		in Böden	3
Definition	1	Seen	
Fließgewässer		Versauerung	19
Säureeintrag	19	Silikat-Puffer	17
Grundwasser		Versauerung	
Säureeintrag	18	anthropogene	9
Karbonat-Puffer	16	Böden	14
Mineralbestand		durch Ernteentzüge	9
von Böden	1	Maßnahmen	21
Nährstoffarmut	17	Wirkung der Erosion auf	13
Nährstoffmangel		Zersetzungshemmung	
unter Fichte	17	von organischer Substanz	17

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Gesamtsäurebelastung unter Fichte in den hydrologischen Jahren 1988/89 und 1989/90 (obere Grafik) sowie im hydrologischen Jahr 1992 unter Freiland- und Fichte (untere Grafik) (HOCHSTEIN & HILDEBRAND 1992; HEPP & HILDEBRAND, 1993)	3
Abb. 2:	Zeitliche Entwicklung der Gesamtsäureeinträge an ausgewählten Meßorten in Baden-Württemberg (HEPP & HILDEBRAND, 1993):.....	3
Abb. 3	Böden Baden-Württembergs (nach geol. Landesamt Freiburg; verändert)	15
Abb. 4	Beziehung zwischen Bodenreaktion (pH H ₂ O) und Calciumsättigung in Nadelholzbeständen Baden-Württembergs (Medianwerte mit 13. und 87. Perzentil) und als Schätzfunktion (Forstliche Standortaufnahme, 1980, und Hildebrand, E.E. 1996.....	16