



## **Trendanalyse: Stark saure Waldböden und ihre Entwicklung im Kanton Zürich**

**Ermittelt an Standorten der Zürcher Kantonalen Bodendauerüberwachung**

### **Kurzfassung**

Wir haben die Waldbodenversauerung anhand des Bodensäuregrades pH in den beiden Zeitabschnitten 1995-1999 (I) sowie 2000-2004 (II; „Überwachungsperioden“) beurteilt. Die Erhebung fand auf 179 Standorten für die Bodentiefe 0-60 cm statt.

Der Bodensäuregrad pH der Waldstandorte und dessen Veränderung zwischen den Überwachungsperioden ist in Abb. 1 dargestellt. Auf bereits sehr stark versauerten Standorte (n= 27, pH-Bereich  $\leq 3.80$ ) verminderte sich das pH im Mittel um 0.10 Einheiten. Die pH-Absenkung war vor allem im Tiefenbereich 40-60 cm festzustellen. Die Versauerung erfolgt somit auf schon sehr stark versauerten Standorten in beschleunigter Weise, im Gegensatz zu den anderen Standorten.

Massnahmen werden vorgeschlagen, um den vom Menschen verursachten Anteil der Versauerung zu stoppen:

Kritische Gebiete und deren Bestockung sind regional zu erheben. Technische und finanzielle Ansätze zur Bekämpfung der Waldbodenversauerung sowie die Gefährdung des Grundwassers durch ausgewaschene Schadstoffe müssen geprüft werden. Das Naturgefahrenpotential von Gebieten mit stark versauerten Waldböden ist zu ermitteln.

### **Einleitung**

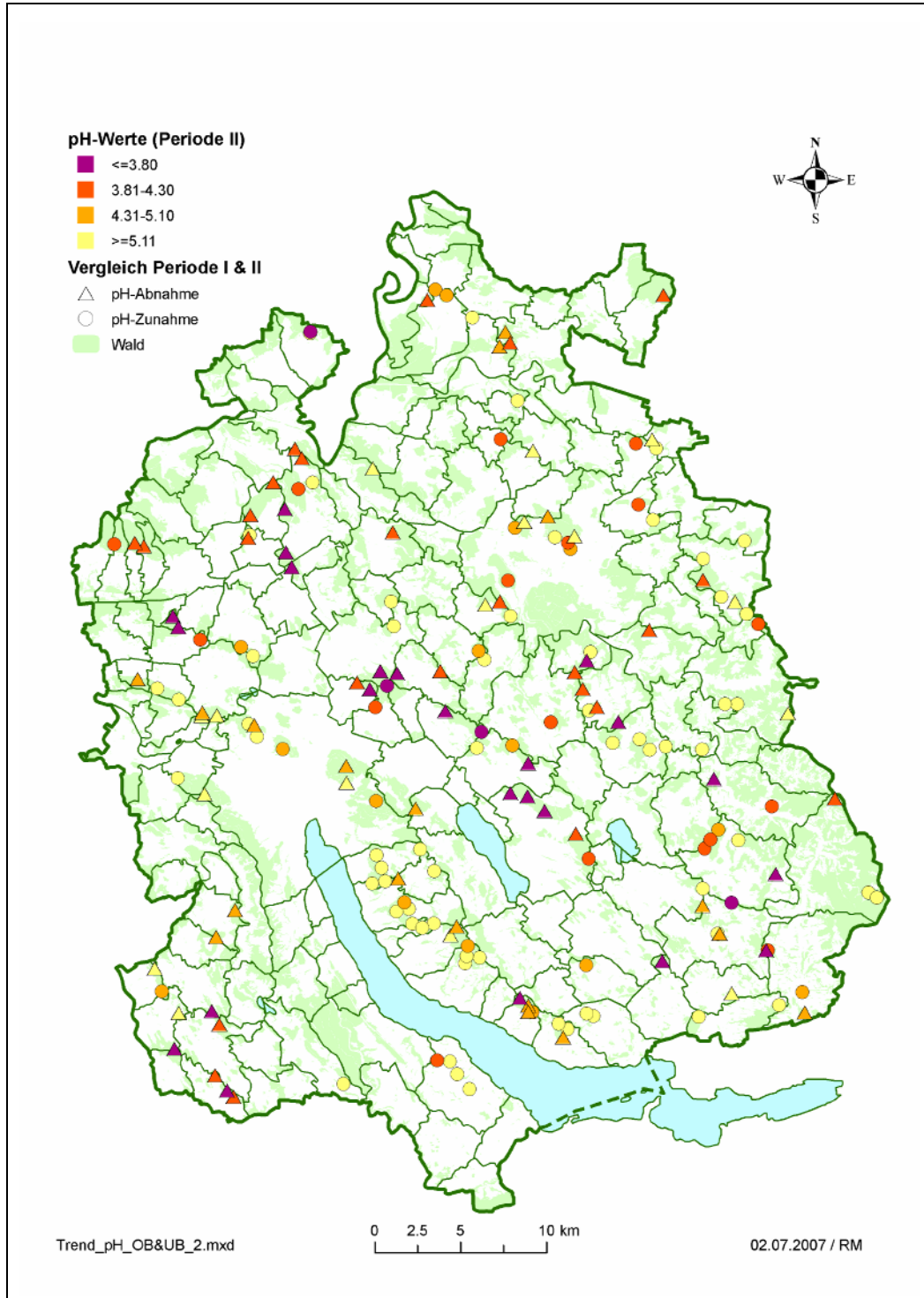
Die Versauerung von Waldböden ist ein wichtiges Problem des Bodenschutzes in der Schweiz. Betroffen sind laut Angaben des Bundesamtes für Umwelt (BAFU 2002) mehrere Tausend Quadratkilometer Bodenfläche. Der Eintrag von erhöhten Stickstoffmengen aus Landwirtschaft und Verkehr ist eine zentrale Ursache für die Säurezunahme in Schweizer Waldböden (BAFU 2005).

Die Versauerung der Böden beruht teilweise auf natürlichen Vorgängen wie der Bodenatmung. Stickstoffhaltige Luftschadstoffe sowie Streu von gepflanzten Nadelbäumen bringen zusätzlich Säure menschlicher Herkunft in die Böden. Mit zunehmender Bodensäure werden überproportional hohe Schwermetallmengen aus den Böden gelöst. Cadmium, Nickel sowie Zink überschreiten dabei oft die eidgenössischen Richtwerte und können mit dem Sicker- auch ins Grundwasser gelangen.

Die freie Säure im Boden zerstört feine Bodenpartikel, setzt saure Aluminium-Ionen frei und vermindert dessen Speicherfähigkeit. Diese Ionen wirken als Wurzelgift und verdrängen Nährstoffe wie Kalzium von den noch vorhandenen Speicherplätzen. Die Nährstoffe gehen dem Waldboden verloren, was

mit der Zeit zu einer Mangelernährung des Waldes führt. Die Fruchtbarkeit vieler Waldböden ist somit langfristig nicht gewährleistet.

Die Fachstelle Bodenschutz (FaBo 2003) legte bereits vor einigen Jahren dar, dass auch im Kanton Zürich verbreitet Waldböden versauert sind. Die vorliegende Arbeit untersuchte die aktuelle Entwicklung der Bodenversauerung im Kanton Zürich.



**Abb. 1** pH- und pH-Veränderung im Hauptwurzelraum (0-60 cm) von 179 Waldstandorten, dargestellt für die Überwachungsperioden I und II

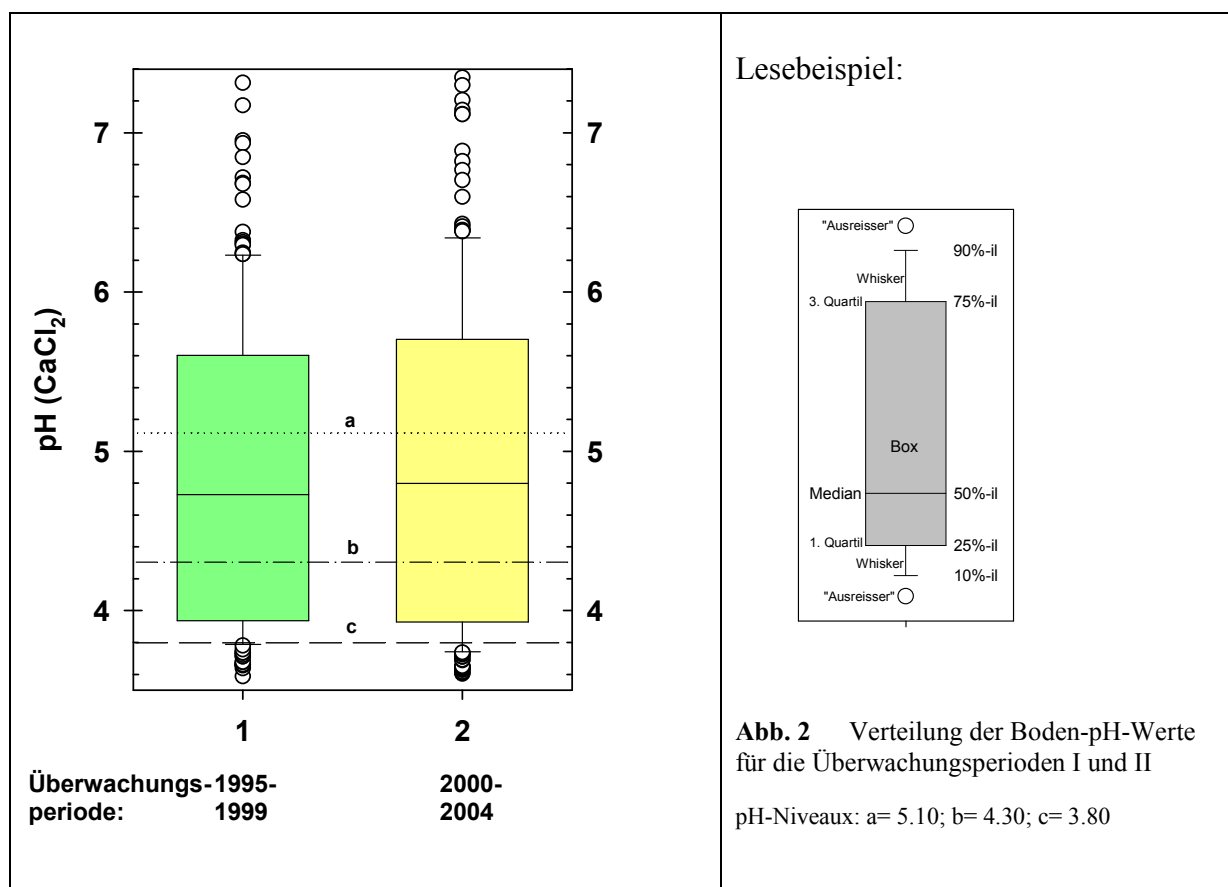
## Bodenversauerung im Bodentiefenbereich 0-60 cm

### Methoden

Die Bodenproben wurden am Standort auf einer quadratischen Fläche von 400 m<sup>2</sup> entnommen. Je Probe wurde 25 Mal mit Hohlmeissel gebohrt und die Bohrkern zu einer Mischprobe vereinigt, die anschliessend aufbereitet und archiviert wurde. Das pH wurde von Archivproben in Calciumchlorid-Lösung bestimmt. Dabei wurden pro Standort Proben der Bodentiefen 0-20 cm (Oberboden) sowie 40-60 cm (Unterboden) untersucht und die Ergebnisse zu einem Wert für 0-60 cm gemittelt<sup>1</sup>. Betrachtet wurden die Überwachungsperioden I (1995-1999) und II (2000-2004) für 179 Standorte. Auf 16 dieser Standorte wurden in der Überwachungsperiode I an Profilen neben dem pH auch die Kalkgrenze und teilweise die Mineralogie bestimmt. Ein pH von unter 4.30 wird als „stark sauer“ bezeichnet, ein solches von unter 3.80 als „sehr stark sauer“. Mittelwerte sind, falls nichts Anderes vermerkt ist, Mediane. Anlässlich der Bodenprobenahmen wurde auch der Windwurf erhoben.

### Bodensäuregrad pH

Im Mittel betrug das pH in der Überwachungsperiode I 4.73 und in der Überwachungsperiode II 4.80 (Abb. 2). Auf 81 der 179 Standorte nahm das pH mit der Zeit ab, auf 98 Standorte zu (Abb. 5). Die Anzahl der Zu- und Abnahmen unterscheidet sich nicht signifikant (Vorzeichentest, 5% Niveau).

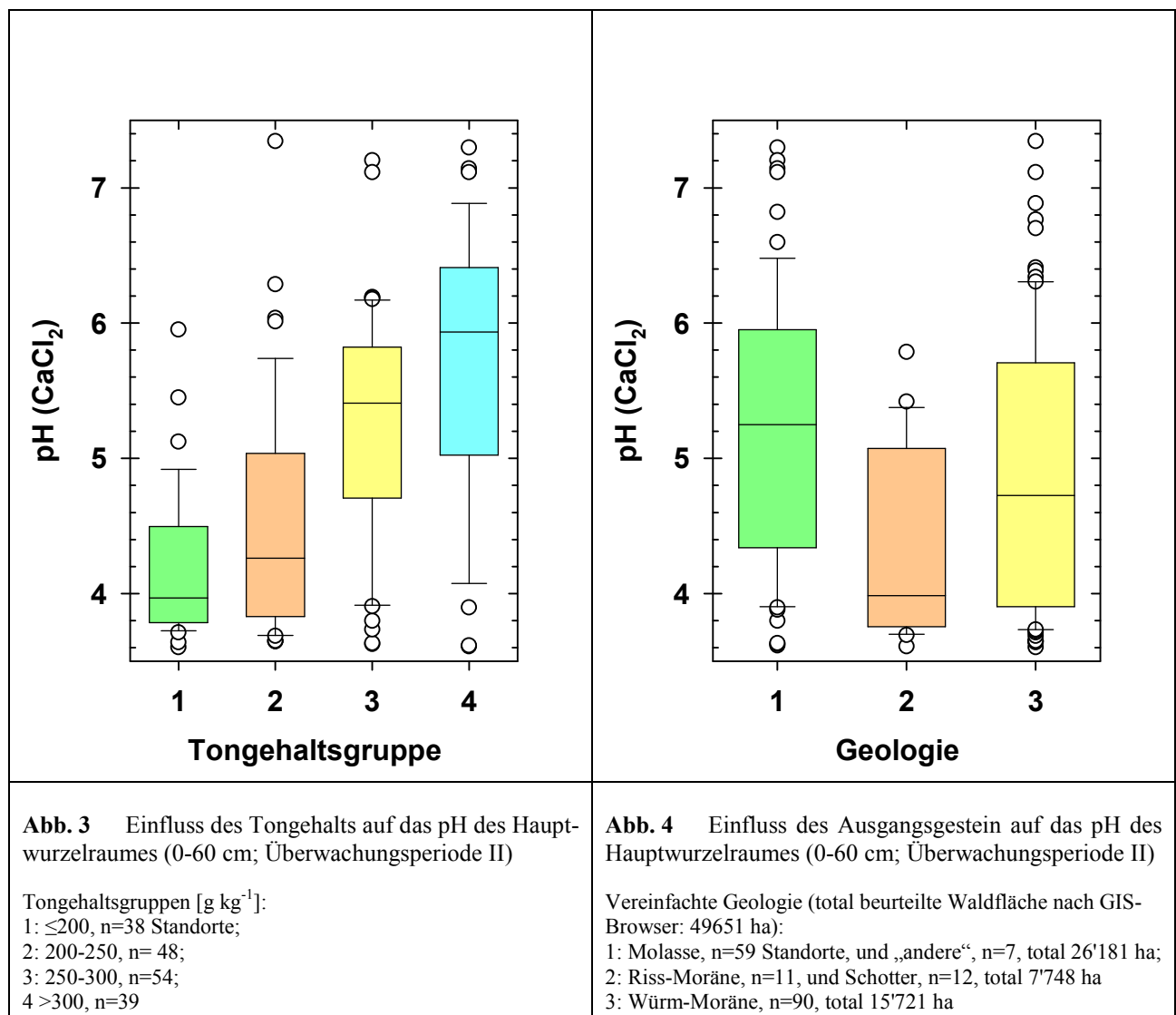


<sup>1</sup> In der Regel wurden 2-3 Oberbodenproben untersucht und davon der Median bestimmt. Dieser Wert und das Ergebnis der Unterbodenprobe wurden dann zum Wert für 0-60 cm gemittelt.

*Eigenschaften des Bodens, die dessen pH mitbestimmen*

Das pH der Zürcher Waldböden wird durch verschiedene Eigenschaften beeinflusst, die nicht mit dem Säureeintrag direkt zusammenhängen. Wichtig sind z.B. die Körnung des Bodens sowie dessen Ausgangsgestein (Abb. 3 und Abb. 4). Verstärkt versauerungsanfällig sind tonarme<sup>2</sup> Böden sowie Böden auf Schotter und Rissmoräne. Waldböden auf den genannten Ausgangsgesteinen findet man im Kanton Zürich auf rund 7'750 ha<sup>3</sup>, vor allem im Nordwesten und im Glattal.

Der aktuelle – vom Mensch gelenkte – Baumbestand wurde nicht im Hinblick auf die Optimierung des Bodensäuregrades gewählt. In dieser Untersuchung wurde deshalb kein wesentlicher Zusammenhang zwischen Baumbestand und Boden-pH festgestellt.

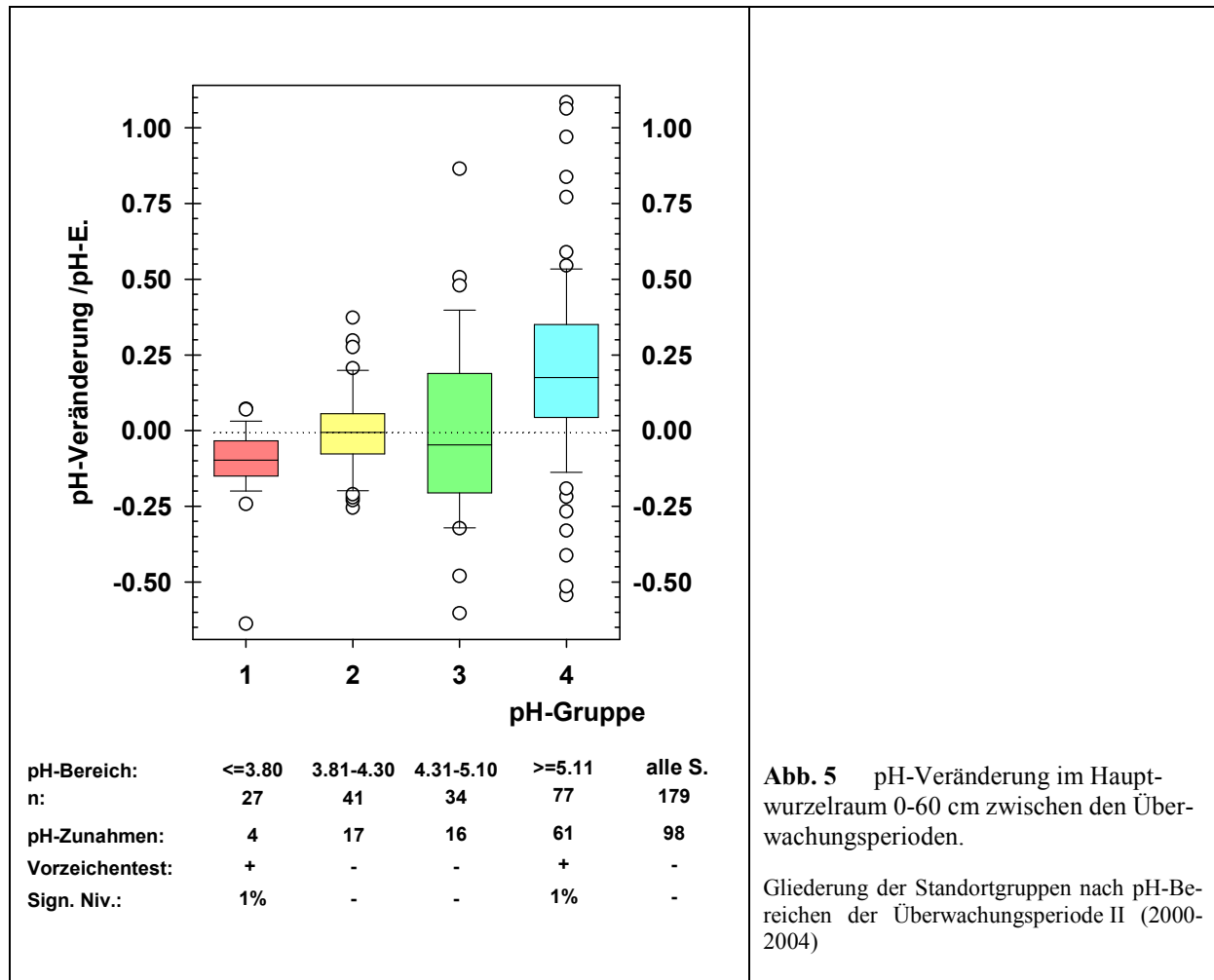


<sup>2</sup> Hier sind Böden mit <200 g kg<sup>-1</sup> Ton gemeint. Weil die Waldböden nicht bodenkundlich kartiert sind, kann die Fläche der tonarmen Waldböden nicht direkt geschätzt werden.

<sup>3</sup> GIS-Verschnitt von „Schotter“ und „Rissmoräne“ mit der Waldfläche, insgesamt rund 15% der kantonalen Waldfläche

*Veränderung des Boden-pHs zwischen beiden Überwachungsperioden*

Die pH-Veränderung der Standorte zwischen den Überwachungsperioden I und II betrug im Mittel +0.03 Einheiten und lag in 80% der Fälle zwischen -0.22 und +0.40 Einheiten (Abb. 5). Im pH-Bereich  $\leq 3.80$  mit 27 untersuchten Standorten war der Trend der pH-Abnahme (86% der Standorte) ausgeprägt und betrug im Mittel 0.10 Einheiten, während im pH-Bereich  $\geq 5.11$  mit 77 Standorten in der Regel eine pH-Zunahme von im Mittel 0.18 Einheiten verzeichnet wurde (79% der Standorte).



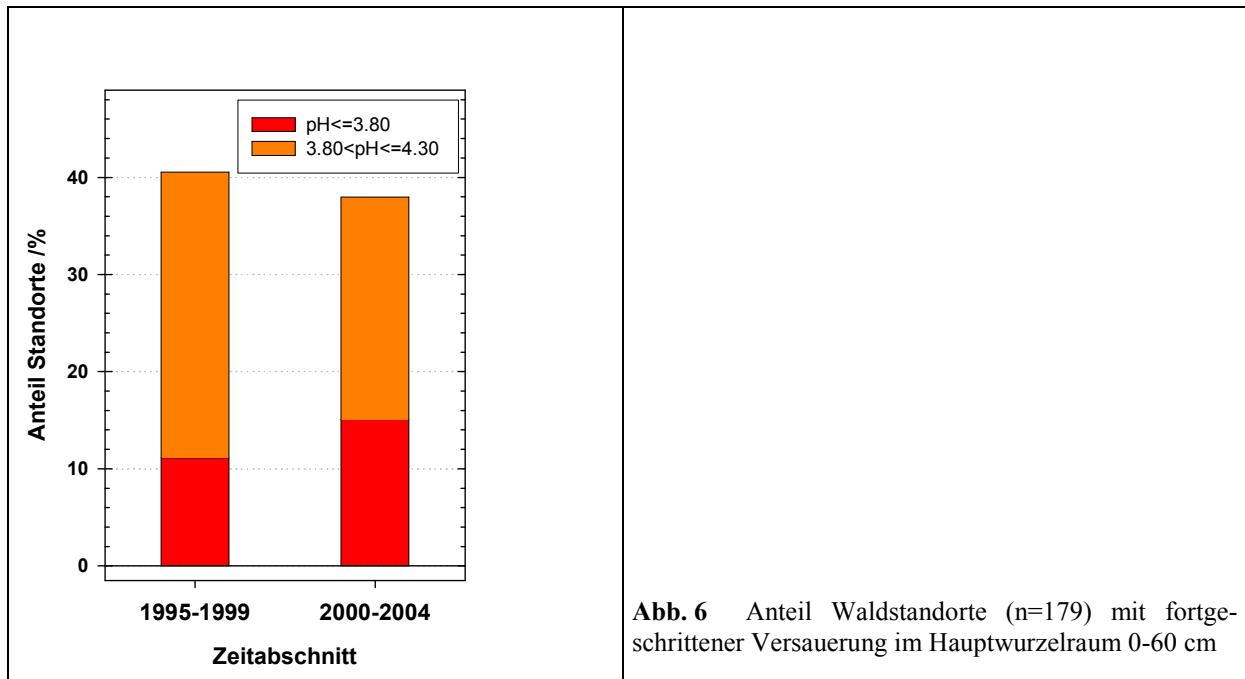
**Abb. 5** pH-Veränderung im Hauptwurzelraum 0-60 cm zwischen den Überwachungsperioden.

Gliederung der Standortgruppen nach pH-Bereichen der Überwachungsperiode II (2000-2004)

*Anteil der Standorte mit stark sauren Böden ( $pH \leq 4.30$ )*

In den Überwachungsperioden I (1995-1999) und II (2000-2004) betrug der Anteil der „stark sauren“ Standorte 41%, bzw. 38%. Der Anteil der „sehr stark sauren“ Standorte nahm jedoch im beobachteten Zeitraum von 11 auf 15% zu (Abb. 6), dies vor allem aufgrund deutlich zunehmender Versauerung von bereits stark sauren Unterböden.

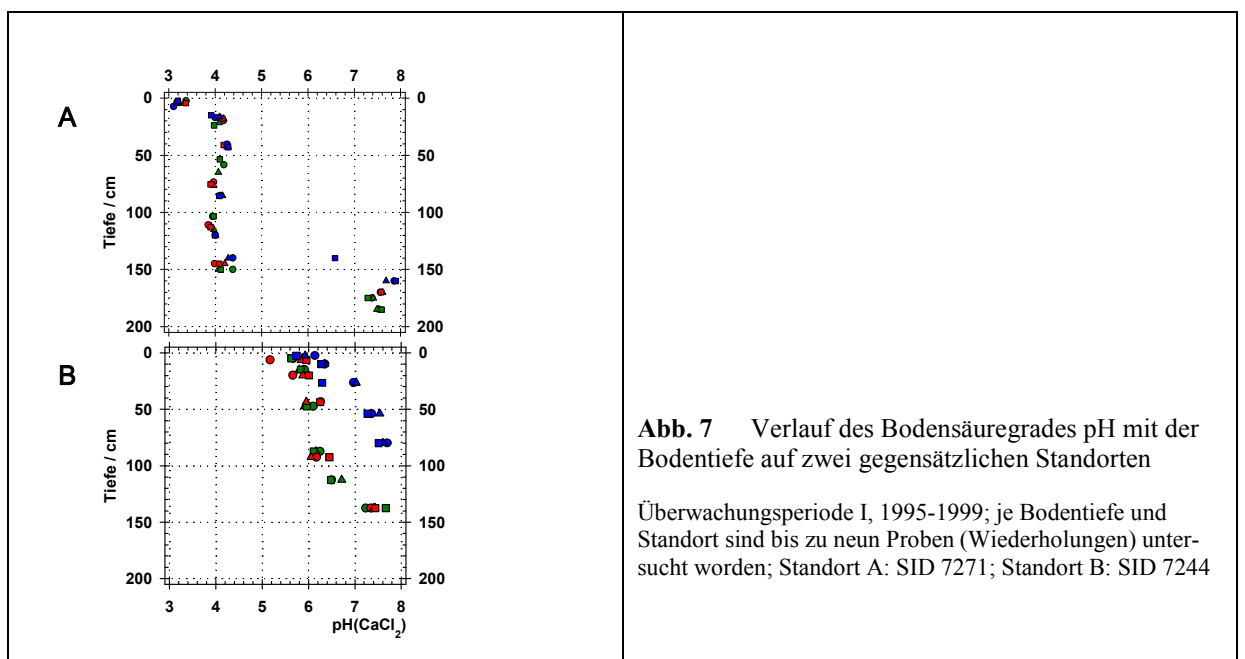
Die verdachtsneutrale Erhebung der WSL (1 km<sup>2</sup>-Raster; 2007) erlaubt eine grobe Schätzung der Waldfläche, die von fortgeschrittener Versauerung im Oberboden betroffenen ist. Ein  $pH \leq 3.80$  wiesen 20% der 459 Standorte auf. Zwischen  $pH 3.81-4.30$  lagen 11% der Standorte und 13% zwischen  $pH 4.31-5.10$ .



**Abb. 6** Anteil Waldstandorte (n=179) mit fortgeschrittener Versauerung im Hauptwurzelraum 0-60 cm

*pH-Verlauf mit der Bodentiefe*

Das pH nimmt in Waldböden in der Regel mit der Bodentiefe zu, jedoch von Standort zu Standort unterschiedlich. Die zeigen auch die folgenden Beispiele (Abb. 7). Am Standort A bleibt das pH bis in eine Tiefe von rund 150 cm meist unterhalb von 4.3 und schnell dann innerhalb einiger Dezimeter auf über 7.0 hoch. Die Wiederholungen am Standort A zeigen einen sehr einheitlichen Verlauf mit der Bodentiefe. Die räumliche Variabilität ist relativ gering.



**Abb. 7** Verlauf des Bodensäuregrades pH mit der Bodentiefe auf zwei gegensätzlichen Standorten

Überwachungsperiode I, 1995-1999; je Bodentiefe und Standort sind bis zu neun Proben (Wiederholungen) untersucht worden; Standort A: SID 7271; Standort B: SID 7244

Am Standort B hingegen liegt das pH stets über 5.0 und steigt – im Profil geradlinig von oben nach unten zunehmend – auf Werte über 7.0 an. Zwischen den Wiederholungen am Standort B bestehen teilweise erhebliche Unterschiede. Die räumliche Variabilität ist am Standort B grösser als am Standort A.

### *Mineralogie*

Wir untersuchten einige Bodenprofile auf ausgewählten Waldstandorten mineralogisch. Wie erwartet, fehlt Kalk in sauren Bodenbereichen. Diese Bereiche weisen zudem in der Regel im Sandanteil keine primären Schichtsilikate (Glimmer und Chlorit) mehr auf. Diese Minerale stellen Quellen für Kalium und Magnesium dar, beides wichtige Pflanzennährstoffe. Diese Elemente sind denn auch im stark versauerten Bodenbereich in nur ungenügender Masse pflanzenverfügbar.

### *Kalkfreier Bodenbereich und Bodenleben*

Der kalkfreie Bodenbereich beträgt im Mittel 110 cm (n= 16 Standorte). In Böden mit stark fortgeschrittener Versauerung kann die Kalkgrenze jedoch tiefer als 200 cm liegen. Zwischen Kalkgrenze und pH, ermittelt für 0-60 cm Bodentiefe, besteht eine deutliche Abhängigkeit: je höher das pH, umso näher liegt die Kalkgrenze an der Bodenoberfläche (Abb. 8).

Pflanzen mit ihrer Wurzeltätigkeit und Bodenorganismen wie Regenwürmer wirken der Bodenversauerung entgegen, indem sie Kalk oder seine Bestandteile an die Oberfläche heraufholen. Mit zunehmender Entkalkungstiefe werden die Transportwege länger und die biologische Aktivität geringer.

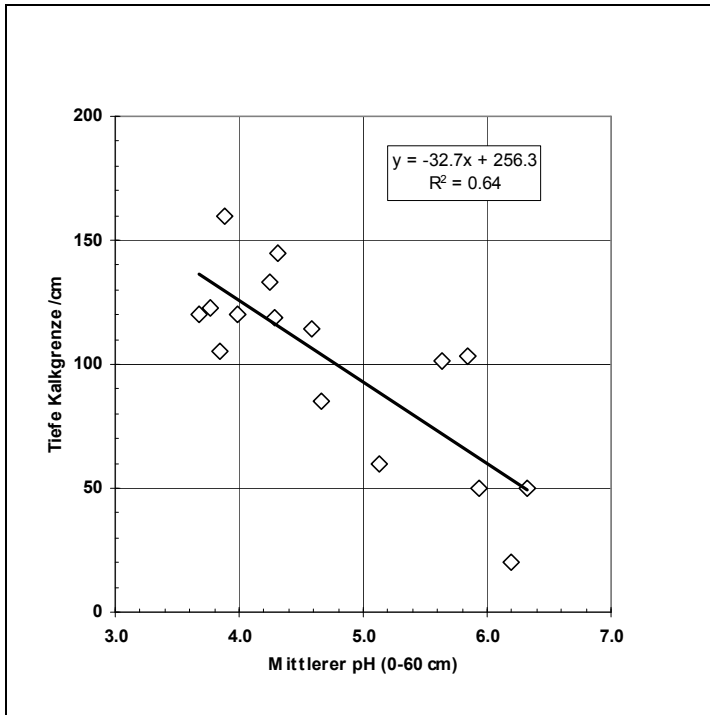
Stark und insbesondere sehr stark versauerte Böden weisen in der Regel wenig bis gar keine Regenwürmer auf. Diese Tiere haben eine sehr wichtige ökologische Funktion im Boden und beeinflussen Humusbildung, Bodenstruktur und Bodensäuregrad in positiver Weise. Bislang liegen keine eigenen Daten zum biologischen Funktionsverlust durch die Bodenversauerung vor.

### *Windwurf*

Auf 30 (17%) von 179 Standorten wurde Windwurf festgestellt, der überwiegend im Zusammenhang mit dem Tiefdrucksystem „Lothar“ Ende 1999 auftrat. Überdurchschnittlich betroffen waren Gebiete im pH-Bereich  $\leq 3.80$ : von den 20 Standorten<sup>4</sup> dieser Kategorie wiesen acht (40%) Windwurf auf. Hingegen waren Gebiete mit  $\text{pH} \geq 5.11$  unterdurchschnittlich von Windwurf betroffen: geschädigt waren nur sieben (9%) von insgesamt 74 Standorten dieser Kategorie. Diese Ergebnisse zeigen an, dass auf sehr stark sauren Standorten – im Vergleich zu schwach sauren und neutralen – Bäume anfälliger auf Windwurf sind (vgl. auch IAP 2005). Gebiete mit Sturm geschädigten Wäldern sind anfälliger auf Folgeschäden wie Murgänge, Erosion und Trinkwasserverschmutzung.

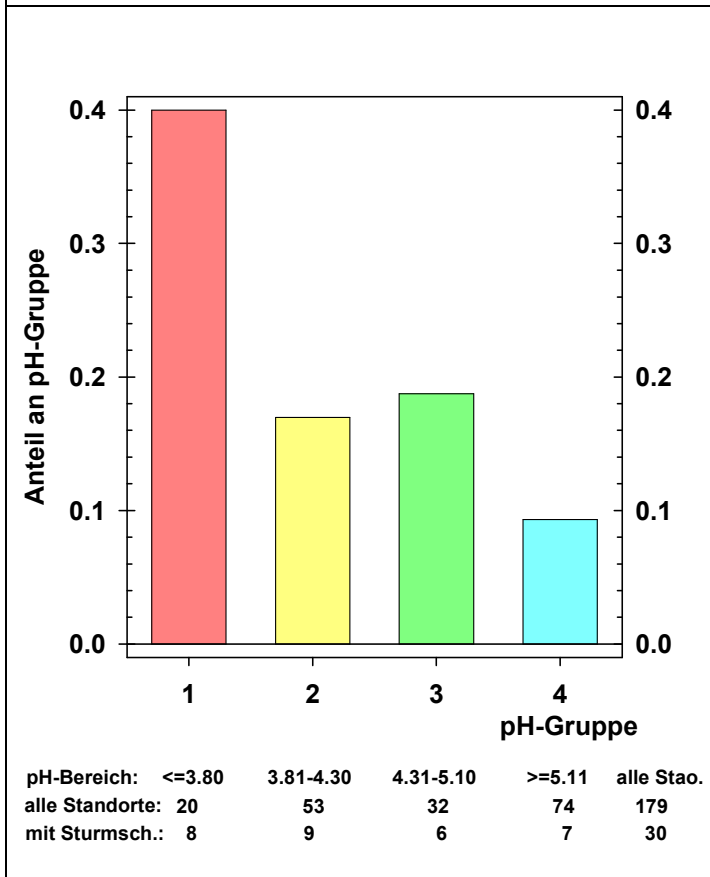
---

<sup>4</sup> Beurteilt nach Überwachungsperiode I (1995-1999)



**Abb. 8** Beziehung zwischen Kalkgrenze und mittlerem pH der Bodentiefe 0-60 cm

Überwachungsperiode I, 1995-1999: n=16 Hauptstandorte



**Abb. 9** Anteil Standorte mit Sturmschäden, gegliedert nach pH-Bereichen der Überwachungsperiode I, 1995-1999



## Fazit und Massnahmen

Über ein Drittel der KaBo Standorte sind bereits bis mindestens 60 cm Bodentiefe stark versauert. Diese Standorte sind in der Regel tonarm und/oder bildeten sich aus Rissmoräne oder Schotter.

Beachtlich ist die pH-Veränderung der bereits sehr stark versauerten Böden (pH-Bereich  $\leq 3.80$ ) innert fünf Jahren, die im Mittel (Median;  $n= 27$ )  $-0.10$  Einheiten betrug. Die Versauerung auf schon sehr stark versauerten Standorten erfolgt vermutlich beschleunigt und bewirkt zusätzlichen Stress für die Bäume. Die Anfälligkeit der Bäume auf Krankheit oder Schädlingsbefall dürfte deshalb weiter zunehmen. Darauf hin deuten auch einzelne Beobachtungen der letzten Jahre bei Wassermangel in trockenen Sommermonaten und der nachfolgende Befall durch die Fichtenquirilschildlaus (2006).

Mit zunehmender Tiefe von Bodenversauerungsfront und Kalkgrenze verlangsamt sich das Waldwachstum, nimmt die Bodenfruchtbarkeit ab, wichtige Bodenlebewesen wie Regenwürmer verschwinden vollständig, besonders Jungwuchs wird am Aufkommen gehindert und Schwermetalle sowie Aluminium können ins Grundwasser gelangen. Bodenstrukturschäden werden wahrscheinlicher. Vermehrter Windwurf verstärkt das Risiko für Naturgefahren wie Erosion und Murgang, mit möglichen Konsequenzen wie Trinkwasserverschmutzungen.

### *Massnahmen*

Die Bekämpfung der Bodenversauerung sollte sich zunächst auf „sehr stark versauerte“ Standorte konzentrieren. Folgende Massnahmen sollen geprüft werden:

1. Prüfung technischer und finanzieller Ansätze zur Bekämpfung der Waldbodenversauerung<sup>5</sup>
2. Flächenkartierung der Böden mit  $\text{pH} \leq 3.80$  im ganzen Kanton
3. Bestandenserhebung auf den kartierten Flächen als Grundlage für die Bestandeslenkung
4. Abklärung des Naturgefahrenpotentials von Gebieten mit stark versauerten Waldböden
5. Ermittlung der Bedrohung des Grundwassers durch bodenbürtige Schadstoffe sowie des Einflusses der Versauerung auf die biologische Bodenfruchtbarkeit

Werden die erwähnten Massnahmen kurzfristig nicht umgesetzt, erscheint mittelfristig eine weitere Verschlechterung der Situation als wahrscheinlich. Da Waldböden mit weit fortgeschrittener Versauerung auf mindestens 15% der Kantonalen Waldfläche zu erwarten sind, stellt sich die Frage der Prioritäten.

---

<sup>5</sup> - Eine deutliche Reduktion des Stickstoffeintrages (Bekämpfung an der Quelle) sollte so rasch als möglich angestrebt werden. Dazu sollte auch die Landwirtschaft im Bereich Hofdünger einen wesentlichen Beitrag leisten (zu prüfen ist z.B. der Einsatz von Schleppschläuchen).

- In stark sauren Gebieten mit tief liegender Kalkgrenze ist auf Kahlschläge – wie sie z.B. das neue geplante Waldgesetz vorsieht – a priori zu verzichten. Walddüngung z.B. mit Dolomit, ist in besonders gravierenden Fällen zu prüfen, ebenso die Pflanzung von Ionen-pumpenden Baumarten mit Düngerstarthilfe.

Der Bodensäuregrad pH liefert einen guten Überblick über den allgemeinen Stand der Waldbodenversauerung. Zusätzliche Information zum Nähr- und Schadstoffpotential der einzelnen Böden werden benötigt.

### **Quellen**

BAFU 2002: Umwelt Schweiz: Politik und Perspektiven. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, S. 55.

BAFU 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. Schriftenreihe Umwelt 384, 170 S.

FaBo 2003: Folgen der starken Versauerung von Zürcher Waldböden. Beitrag der Fachstelle Bodenschutz im Statistischen Jahrbuch des Kantons Zürich, Jahrgang 2003, S. 60.

IAP 2005: Wie geht es unserem Wald? Hrsg. Institut für angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch, BL, 67 S.

WSL 2007: Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebung 1983-85. 120307UU. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (Daten für den Kanton Zürich).