

## VERÄNDERUNGEN IN FICHTENWALDBÖDEN DURCH LANGZEITEIN- WIRKUNG VON SO<sub>2</sub>

Von

HÄRTEL O. und CERNY M.

Institut für Pflanzenphysiologie der Karl Franzens-Universität Graz

### A B S T R A C T

The alterations of some physico-chemical and biotic factors of spruce forests polluted by SO<sub>2</sub> during the last 30 years were investigated (industrial region of Upper Stiria, Mürztal). The pH values were shifted towards more acid reactions (1 - 1.5 pH units) in all the investigated horizons. Surprisingly, the buffer capacity turned to higher values, only the uppermost layer of the soil remains unaltered in this respect. This phenomenon is explained by mobilization of inorganic ions due to the acid immissions, it seems to be confirmed by a corresponding increase of electric conductance of the soil extracts. Soluble sulphates in the soils have only minor importance to the conductivity. Some soil enzymes investigated are altered by the acid immissions (catalase, dehydrogenase), they seem to be inactivated mainly in the lower soil horizons, while the endoenzymes investigated show minor activity mainly in the upper layers (O - horizon). Both the respiration of the soil and the decomposition of cellulose show a drastic decrease in the polluted soils. When caused by immissions the spruce forest broke down brushwood grew up spontaneously, enabling the soil to regenerate towards the values of the controls, even under the influence of immissions.

### E I N L E I T U N G      U N T E R S U C H U N G S G E B I E T

Durch 30 Jahre hindurch unter Abgasbelastung durch ein Chemiewerk im Mürztal (obersteirisches Industriegebiet) stehende Fichtenbestände boten Gelegenheit, im Rahmen einer Dissertation (CERNY 1979) Wirkungen von langdauernden SO<sub>2</sub>-Immissionen auf physikalisch-chemische und biotische Bodenfaktoren zu untersuchen.

In stark belasteten Beständen (es muß mit I<sub>2</sub> - Werten um 0,9 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Luft gerechnet werden, vgl. PAPESCH 1971) in auf

Grund der Symptome und objektiver Kriterien schwächer belasteten sowie in unbelasteten Kontrollbeständen wurden mehrfach Bodenproben aus verschiedenen Horizonten entnommen, zum Vergleich wurde ein unmittelbar hinter dem Werk stark belasteter Hang herangezogen, an dem der unter den Immissionen bereits zusammengebrochene Fichtenwald durch spontan aufgekommenes Laufbuschwerk ersetzt war ("Prallhang"). Exposition und Gesteinsunterlage (Karbonschiefer und Gneis) war an allen Probestellen ähnlich, sie unterschieden sich jedoch in der Stärke der Rohhumusaufgabe (in stark belasteten Beständen bis 9 cm, in den übrigen Beständen 3 - 2 cm); Kalk war in keiner Bodenprobe nachweisbar.

Die benutzten Methoden werden bei den jeweils behandelten Bodenfaktoren mitgeteilt, die in den Tabellen und Diagrammen angegebenen Werte sind Mittelwerte aus jeweils 10 - 12 Probestellen  $\pm$  Standardabweichungen der Einzelwerte.

## B O D E N A Z I D I T Ä T U N D P U F F E R K A P A Z I T Ä T

Die mit Glaselektrode in wässrigen Auszügen (1 2,5) ermittelten pH-Werte zeigen vor allem in den stark belasteten Bodenhorizonten die erwartete pH - Abnahme. In diesen sind die pH - Werte im obersten Bodenhorizont am niedrigsten, gleiches gilt auch für den Prallhang. Im schwach belasteten sowie im Kontrollboden sind die pH - Minima hingegen in den tieferen Horizonten zu finden (Tabelle 2).

Die an den gleichen Bodenproben bestimmten pH(KCl) - Werte verändern sich mit der Tiefe konform zu den pH(H<sub>2</sub>O) - Werten, sie sind jedoch durchwegs in Richtung sauer verschoben, und zwar je nach SO<sub>2</sub>-Belastung in verschiedenem Ausmaß. Im stark belasteten Boden beträgt die Abnahme 0,2 - 0,3 pH - Einheiten, in den schwach belasteten Böden mit zunehmender Tiefe von 0,7 - 0,4 Einheiten, in den Kontrollböden hingegen 0,7 - 0,6 pH - Einheiten. Die Böden des "Prallhanges" (Laubwald) liegen mit pH - Verschiebungen um 0,5 - 0,4 zwischen den schwach

T a b e l l e 2

pH - Wert und SO<sub>2</sub>-Belastung (Werte auf  
1 Dezimale gerundet)

Horizont	stark belastet	schwach belastet	"Prallhang" (Buschwald)	Kontroll- boden
O <sub>L</sub>	3,0 $\pm$ 0,1	4,1 $\pm$ 0,3	3,7 $\pm$ 0,2	4,6 $\pm$ 0,2
O <sub>F</sub>	3,2 $\pm$ 0,3	3,8 $\pm$ 0,2	3,7 $\pm$ 0,3	4,2 $\pm$ 0,1
A <sub>h</sub>	3,3 $\pm$ 0,2	3,7 $\pm$ 0,3	3,8 $\pm$ 0,3	4,1 $\pm$ 0,1
B <sub>h</sub>	3,5 $\pm$ 0,2	3,8 $\pm$ 0,6	4,1 $\pm$ 0,3	4,3 $\pm$ 0,1

belasteten Böden und den Kontrollböden. Bei aller Vorsicht, die beim Vergleich von Wasser- und KCl-Auszügen geboten ist, deutet dieses Ergebnis zweifellos an, daß sich das Ionenmilieu im Boden durch die  $\text{SO}_2$  - Belastung geändert hat. Dieser Einfluß der Immissionen reicht offenbar auch in tiefere Bodenhorizonte.

## E L E K T R O L Y T I S C H E L E I T F Ä H I G K E I T

In die gleiche Richtung weisen auch deutlich erhöhte Leitfähigkeitswerte der Bodenauszüge belasteter Böden, wie Tab. 3 zeigt (4 g Feinerde in 60 ml  $\text{H}_2\text{O}$  24 Std. extrahiert). Sie sind in den stark belasteten Böden rd. doppelt so hoch als in den Auszügen der Kontrollböden ( $P =$  besser als 0,01), im schwach belasteten Boden immerhin noch um 25 - 35 % höher ( $P =$  0,05 - 0,02), und zwar in allen untersuchten Horizonten. Am Prallhang ist die Leitfähigkeit nur im  $\text{O}_L$  - Horizont stark erhöht ( $P =$  0,01), im  $\text{O}_F$  - Horizont nur mehr um rd. 23 % ( $P =$  zwischen 0,05 und 0,1), während in den darunterliegenden Horizonten kein signifikanter Unterschied zu den Kontrollböden feststellbar ist.

Der Boden am Prallhang unter Laubgehölz zeigt wohl im obersten Horizont, wohl unter dem Einfluß unmittelbar einfallender  $\text{SO}_2$  - Immissionen, einen sehr hohen Wert, im  $\text{A}_h$  - und im  $\text{B}_h$  - Horizont sind die Unterschiede gegenüber den Kontrollböden nicht mehr gesichert.

Eine durchgehende Beziehung zwischen Leitfähigkeit und Gehalt des Bodens an löslichem Sulfat (nur dieses kommt für unsere Fragestellung in Betracht, weshalb wir auf die Bestimmung des Gesamt - S im Boden verzichteten) läßt sich allerdings nicht feststellen, d.h. sie findet sich nur im Bereich von Leitfähigkeitswerten über 200  $\mu\text{S}$ ; hier besteht eine gesicherte Korrelation zwischen den beiden Größen  $r = 0,8$ , während im Bereich bis 200  $\mu\text{S}$  überhaupt keine Korrelation feststellbar ist ( $r = + 0$ ).

T a b e l l e 3

Elektrolytische Leitfähigkeit der Bodenauszüge (in  $\mu\text{S}$ )

Horizont	stark belastet	schwach belastet	"Prallhang" (Buschwald)	Kontrollböden
$\text{O}_L$	204 $\pm$ 71	160 $\pm$ 10	234 $\pm$ 102	129 $\pm$ 34
$\text{O}_F$	203 $\pm$ 111	133 $\pm$ 47	132 $\pm$ 52	102 $\pm$ 5
$\text{A}_h$	146 $\pm$ 77	104 $\pm$ 30	90 $\pm$ 30	60 $\pm$ 11
$\text{B}_h$	126 $\pm$ 85	87 $\pm$ 35	85 $\pm$ 51	47 $\pm$ 9

Aber auch bei höherem Sulfatgehalt bestimmt dieser nicht allein die Höhe der Leitfähigkeit, sie wird bis doppelt so hoch gefunden als auf Grund der Sulfatgehalte allein zu erwarten wäre (vgl. Tabelle bei HÄRTEL 1979). Auch dieser Umstand spricht dafür, daß durch die sauren Immissionen zusätzlich Ionen im Boden mobilisiert werden. Die mangelnde Korrelation zwischen Sulfatgehalt alt und Leitfähigkeit im Bereich niedriger Leitfähigkeitswerte könnte darauf hindeuten, daß der Schwefel entweder in unlöslicher Form festgelegt oder anderweitig gebunden wird und dann die Leitfähigkeit nicht mehr beeinflussen kann.

## P U F F E R K A P A Z I T Ä T

Die Pufferkapazität als wichtiges Indiz für die Stabilität eines Bodens wurde nach STEUBING 1965 bestimmt und durch den

$$\text{Quotienten } A = \frac{\Delta \text{ mmol HCl bzw. NaOH}}{\Delta \text{ pH}} \quad (\text{vgl. HÄRTEL 1972})$$

angegeben.

Zur besseren Übersicht seien zunächst die pH - Änderungen bei schrittweisem Zusatz von Säure bzw. Lauge aufgetragen.

Im obersten Bodenhorizont verlaufen die Pufferkurven im Abstand von rd. 1 pH - Einheit (vgl. Tabelle 2) nahezu parallel, der Unterschied in der Pufferkapazität ist also noch gering. Im  $A_h$  - Horizont des belasteten Bodens hingegen ändert sich das  $p_p$  nach Laugenzusatz sehr stark, die Pufferkurve steigt steil an, was einer geringen Pufferkapazität entspricht, während der flache Kurvenverlauf im belasteten Boden dessen höhere Pufferkapazität anzeigt. Für den HCl - Ast ergeben sich Unterschiede in ähnlichem Sinne, doch sind sie sehr wenig ausgeprägt, sie sollen hier nicht weiter in Betracht gezogen werden. In Tabelle 4 sind die für den Bereich 1 - 4 mmol NaOH berechneten mittleren Pufferkapazitäten und die Signifikanz der Unterschiede angeführt.

Für den  $O_F$  - und den  $A_h$  - Horizont ergeben sich statistisch höchst signifikante Unterschiede der Pufferkapazität, wobei belastete Böden stets die höheren Werte aufweisen. Im  $B_h$  - Horizont sind sie bei allgemein niedrigeren Werten weniger drastisch, aber auch hier statistisch gesichert.

Das Fehlen einer deutlichen Schulter im Bereich pH 3 - 4 (vgl. Abb.2) deutet auf Abwesenheit von COOH - Gruppen hin, eine weitere Bestätigung dafür, daß als Träger der Pufferkapazität in erster Linie anorganische Ionen anzusehen sind. Dies erscheint auch durch eine recht gute und gesicherte Korrelation zwischen der Pufferkapazität und der elektrolytischen Leitfähigkeit ( $r = 0,59$ ) bestätigt.

Die Pufferkapazität der Böden vom Prallhang (hier nicht gesondert angeführt) liegt wieder zwischen der der belasteten Böden und der Kontrollen.

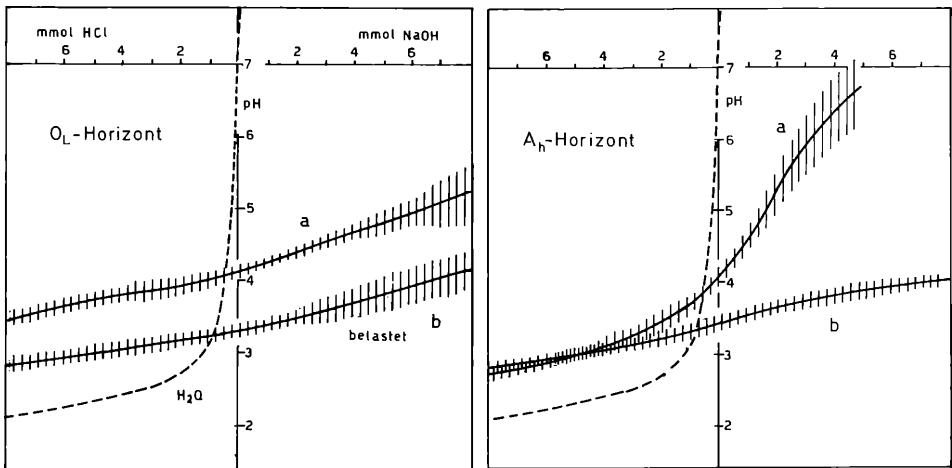


Abb.1 Pufferkurven aus den  $O_L$ -und den  $A_h$ -Horizonten belasteter und unbelasteter Böden (Durchschnittskurven aus 10 - 11 Bestimmungen; die Breite der schraffierten Fläche gibt die Standardabweichungen der Einzelwerte an). Näheres s.Text.

T a b e l l e 4

Durchschnittliche Pufferkapazität A für den Bereich 1 - 4 mmol HCl bzw. NaOH und Signifikanz P der Unterschiede

	stark belastet	Kontrolle	P
$O_L$	$83,0 \pm 34,9$	$68,3 \pm 20,6$	$> 0,20$
$O_F$	$106,4 \pm 45,8$	$38,8 \pm 13,2$	$0,005$
$A_h$	$104,8 \pm 43,0$	$27,6 \pm 6,7$	$< 0,001$
$B_h$	$54,0 \pm 23,6$	$23,1 \pm 5,9$	$< 0,001$

## B O D E N E N Z Y M E U N D B O D E N A K T I V I T Ä T

Bestimmt wurden die Aktivitäten der Katalase (nach BECK 1971), der Saccharase (nach SEEGERER 1953, jedoch mit polarimetrischer Erfassung der Saccharose nach KISS 1957) und der Urease (nach HOFFMANN und TEICHER 1961); die Dehydrogenase konnte im originalen Boden (aktuelle Aktivität) nicht erfaßt werden, erst nach Zusatz von Glukose und Pepton und Pufferung mit

$\text{CaCO}_3$ , also unter unnatürlichen, jedoch optimalen Bedingungen (potentielle Aktivität LENHARD 1956, 1957). Die erhaltenen mittleren Aktivitäten und die Standardwerte der Einzelwerte sind in Abb. 2 graphisch dargestellt.

Alle untersuchten Enzyme werden durch  $\text{SO}_2$ , wenn auch in unterschiedlicher Weise, beeinflusst. Die Katalase wird nur recht wenig und vor allem im obersten Bodenhorizont von den Immissionen betroffen. Dehydrogenase, gleichfalls ein Ectoenzym, hingegen wird in den obersten Bodenschichten durch  $\text{SO}_2$  drastisch inaktiviert, während sich im Bh - Horizont eine leichte, aber signifikante Erhöhung der potentiellen Aktivität ergibt ( $P = 0,05$ ). Die Endoenzyme Saccharase und Urease hingegen erscheinen im belasteten Boden vor allem in den tieferen Horizonten beeinträchtigt, ihr Verhalten in den oberen ist nicht eindeutig.

Am Prallhang (nicht im Diagramm) ist, offenbar infolge der stärkeren Zersetzung der Laubstreu, Dehydrogenase auch im obersten Bodenhorizont meßbar aktiv, Saccharase und Urease in den tieferen weniger stark inaktiviert als unter Fichten.

Die Bodenatmung (nach HABER 1958 bestimmt) beträgt im stark belasteten Boden nur 20 % der des Kontrollbodens, im schwach belasteten etwa 50 %, im Laubboden des Prallhanges 33 %. Ähnlich ist die Zellulosezerersetzung (nach UNGER 1960 bestimmt) im stark belasteten Boden auf 25 %, im schwach belasteten auf 36 % und am Prallhang auf 50 % der im unbelasteten Boden gefundenen Zersetzung gefunden worden.

Wie bereits den pH-Werten, der Pufferkapazität und den Leitfähigkeitswerten zu entnehmen war, deuten auch die am Prallhang gefundenen (hier nicht einzeln angeführten) Enzymaktivitäten darauf hin, daß unter Laubwald trotz langdauernder Immissionen die Regenerationsfähigkeit nicht ganz erloschen ist. Die hier in einem einzigen Immissionsgebiet erhaltenen Befunde dürfen jedoch nicht verallgemeinert werden. Auch mußte der verlockende Plan, nach der 1976 erfolgten Einstellung des Werkes und damit verbundenen weitgehenden Entlastung des Gebietes die Regeneration auch unter Fichten zu verfolgen, aufgegeben werden, weil die Bestände inzwischen einem großflächigen Windbruch zum Opfer gefallen sind. Wegen der dadurch völlig veränderten Bedingungen erscheinen Vergleiche mit dem früheren Zustand nicht mehr sinnvoll.

## L I T E R A T U R

- CERNY, M., 1979: Die Wirkungen langanhaltender  $\text{SO}_2$ -Immissionen auf die Aziditätsverhältnisse und Enzymaktivitäten im Fichtenwaldboden. Diss. Univ. Graz.
- HABER, W., 1958: Ökologische Untersuchung der Bodenatmung. Flora 146, S. 109-157.
- HÄRTEL, O., 1972: Zellphysiologische und biochemische Untersuchungen an  $\text{SO}_2$ -begasten Fichtennadeln - Resistenz und Pufferkapazität. Mitt. Forstl. Bundesvers. Anst. Wien 97, S. 367-386.
- , 1979: Neues über den Borkentest - seine Zuverlässigkeit bei der Beurteilung von Immissionen. Zbornik, Ljubljana, 1 - 390, S. 269-282.

## ENZYMAKTIVITÄT

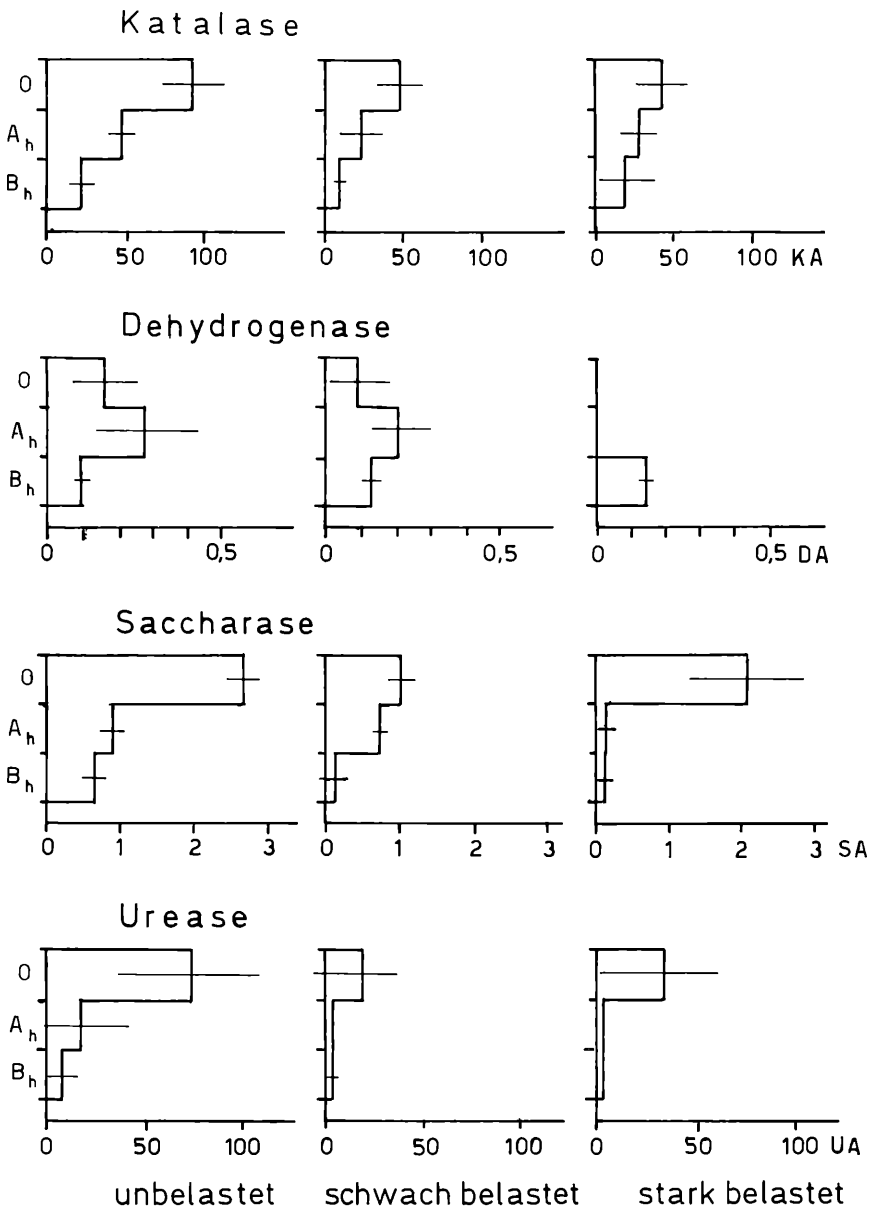


Abb. 2 Profile der Aktivitäten von vier Bodenenzymen. KA, DA, SA, UA = Katalase-, Dehydrogenase-, Saccharase- bzw. Ureaseaktivität in den jeweiligen Einheiten. Ordinate = Bodenhorizont. Die waagrechten Striche deuten die jeweiligen Standardabweichungen an.

- HOFFMANN, G. und TEICHER, K., 1961: Ein kolorimetrisches Verfahren zur Bestimmung der Ureaseaktivität im Boden. Z.Pfl.Ern.Düngg.u.Bodenkde. 95, S.55-63.
- KISS, S., 1957: Die Wirkung des spezifischen Enzymsubstrates (Saccharose) auf die Produktion der Bodensaccharse. Z.Pfl.Ern.Düngg.u.Bodenkde. 76, S. 119-122.
- LENHARD, G., 1962: Die Bestimmung der verfügbaren Pflanzennährstoffe im Boden durch Ermittlung der Dehydrogenaseaktivität des Bodens. Z.Pfl.Ern.Düngg.u.Bodenkde. 99, S.182-190.
- PAPESCH, E., 1971. Steirische Chemie AG, SO<sub>2</sub>-Belastung im Raume Deuchendorf. Immissionsgutachten, Amt der stmk. Landesregierung - Landesbaudirektion FA Ia.
- SEEGERER, A., 1953: Der Saccharasegehalt des Bodens als Maßstab seiner biologischen Aktivität. Z.Pfl.Ern.Düngg.u.Bodenkde. 61, S. 251-260.
- UNGER, H., 1960. Der Zellulosetest, eine Methode zur Ermittlung der zellulolytischen Aktivität im Boden im Feldversuch. Z.Pfl.Ern.Düngg. u. Bodenkde. 91, S.44-52.