

Bodentiere als Anzeiger anthropogener Fluoridbelastungen

Fluoridbelastete Böden und deren ökologisch-toxikologische Bewertung

Von Jürgen Vogel, Johannes C. G. Ottow und Gerhard Seifert

Unsere Böden werden außer durch fluoridhaltige Phosphatdünger auch diffus aus der Luft als Folge der Verbrennung fossiler Energieträger und lokal durch bestimmte Emittenten wie Ziegeleien, chemische Betriebe oder Aluminium-Hütten mit Fluoriden belastet. Während die Schäden durch gasförmige Fluoride – meist Fluorwasserstoff – an Pflanzen und infolge auch an Nutztieren seit längerem bekannt sind und untersucht wurden (u. a. durch die Gießener Arbeitsgruppe um Professor Lore Steubing), sind unsere Kenntnisse über die Fluoridbelastungen wirbelloser Tiere, insbesondere der Bodentiere, sehr gering. Dies gilt auch für die Wirkungsweise des Fluorids in den Tieren. Für eine Risikoabschätzung langfristiger Bodenbelastungen sind aber genaue Kenntnisse über das Verhalten von Fluoriden in Böden und in den Bodenorganismen unerlässlich. Um diesem Ziel näher zu kommen, wurden Böden, Pflanzen und Bodentiere in der Umgebung eines seit etwa 70 Jahren in der Fluorchemie arbeitenden Unternehmens in Bad Wimpfen/Neckar auf ihre Fluoridbelastung und deren mögliche Auswirkungen untersucht. Die Untersuchungen wurden vom Land Baden-Württemberg (Projekt Wasser-Abfall-Boden) und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Ein geeignetes Maß für die Fluoridbelastung von Böden ist nicht der gesamte F-Gehalt – in den untersuchten Muschelkalk- und Keuper-Böden etwa 500 mg F pro kg trockener Oberboden – sondern nur der säurelösliche Anteil. Nach umfangreichen Untersuchungen konnte anhand dieser Fraktion eine Belastungskarte um den Emittenten erstellt werden (Abb. 1). Oberböden mit über 200 mg säurelöslichem F pro kg wurden als stark belastet klassifiziert. Die Hauptausschneidung der Belastung verläuft in der vorherrschenden Windrichtung von West nach Ost. Das stark belastete Gebiet ist relativ eng begrenzt, da schon nach ca. 2,5 km Entfernung vom Verursacher die Werte unter



Abb. 2 und 3: Stark geschädigte Koniferen in einer Schonung in etwa 500 m Entfernung vom Emittenten nach einem HF-Unfall (links). Apikale Nekrosen, absterbende Spitzen, an Kiefernadeln, wie sie für Fluor-Schäden typisch sind (rechts).

die Grundgehalte von 100 mg säurelöslichem F pro kg Boden sinken (Abb. 1).

An verschiedenen kalkhaltigen Bodenprofilen war feststellbar, daß das Fluorid in der einige Zentimeter dicken oberen Bodenschicht wahrscheinlich als unlösliches CaF_2 festgelegt wird. Eine Tiefenverlagerung ist somit vernachlässigbar gering. In den Auskleidungen von Regenwurm-Röhren („Tapeten“) war der Fluoridgehalt allerdings auch in größerer Tiefe erhöht. Die Regenwürmer reichern offenbar Fluoride in ihren Gangauskleidungen an, und langfristig besteht somit auch die Gefahr ihrer Verlagerung bis in das Grundwasser.

Die Flora

Die Pflanzenproben bestätigten die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen. So wurden in der stark belasteten inneren Zone A in gewaschenen Grasproben Fluoridgehalte bis zu $1440 \mu\text{g F} \cdot \text{g}^{-1}$ gefunden. Auch das Fallaub, Nahrungsgrundlage für viele Mikroorganismen und Bodentiere, war hier stark mit Fluoriden angereichert. In etwa zwei Kilometer Entfernung vom Emittenten lagen die Werte in den Pflanzen dagegen unter $20 \mu\text{g F} \cdot \text{g}^{-1}$, wie es für unbelastete Proben typisch ist.

Wie verheerend gasförmige Fluoride auf die Vegetation einwirken können, zeigte sich nach einem unfallbedingten akut stark erhöhten Fluorwasserstoff-Ausstoß während einer Inversionswetterlage: Im Umkreis von rund einem Kilometer um die Emissionsquelle waren nahezu alle Koniferen schwer geschädigt (Abb. 2 und 3).

Die Bodenfauna

Auch die Bodentiere um den Emittenten sind eindeutig belastet. Die Weinbergschnecke *Helix pomatia* und Regenwürmer der Gattung *Lumbricus* können als Beispiele dienen (Abb. 4 und 5). Bei den Arthropoden waren insbesondere Asseln und Tausendfüßler (*Diplopoda*), die sich überwiegend von abgestorbenen Pflanzenteilen ernähren, stark belastet. In allen Fällen war die Belastung aber nur in der inneren Zone A, in der auch der Boden stark kontaminiert ist, erheblich. Zwischen dem Fluoridgehalt des Bodens und dem der Tiere bestanden hochsignifikante Korrelationen. Mit der Belastung des Bodens steigt auch die der Tiere. Somit können z. B. Regenwürmer und Weinbergschnecken eine länger andauernde Fluoridbelastung des Bodens anzeigen.

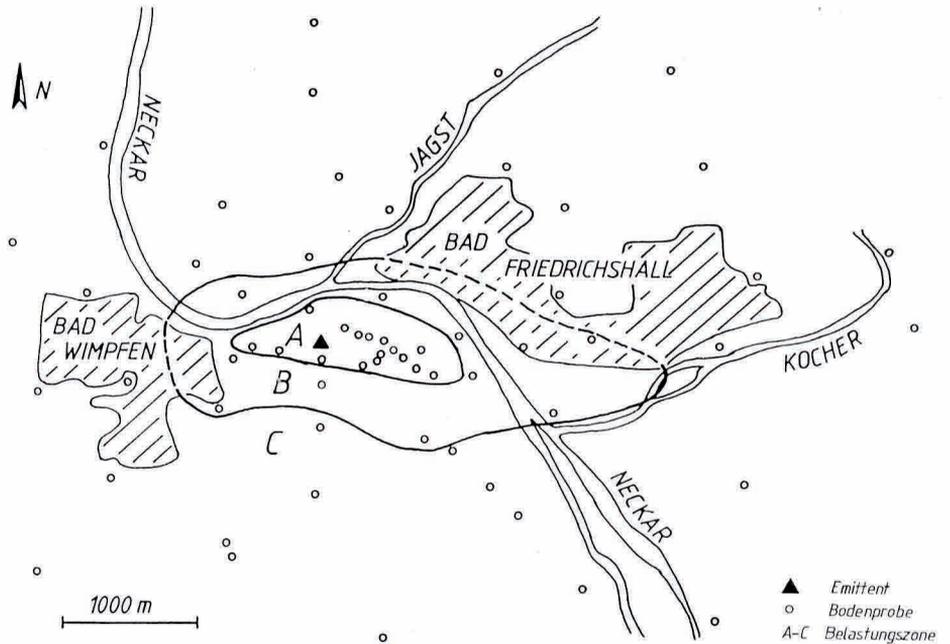


Abb. 1: Bodenbelastung mit Fluoriden um den Emittenten. Zone A: stark belastet (über $200 \text{ mg säurelösliches F pro kg trockener Oberboden}$), Zone B: mäßig belastet ($100\text{--}200 \text{ mg F} \cdot \text{kg}^{-1}$) und Zone C: unbelastet (unter $100 \text{ mg F} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Die Wirkung auf Bodentiere

Der Frage, wie Fluoride Bodentiere beeinträchtigen, wurde exemplarisch an Regenwürmern der Art *Eisenia foetida* untersucht. Dieser „Kompostwurm“ ist für Laborversuche gut geeignet, da er sich leicht halten und vermeh-

ren läßt. Die akute Toxizität der Fluoride war stark von der Art der Applikation und der Art des Fluorides abhängig. So wurde im Kontakt-Test mit fluoridgetränktem Filterpapier folgende Reihe abnehmender Toxizität ermittelt (LC_{50}): $\text{NaF} > \text{KF} \gg \text{FCH}_2\text{COONa}$, während im Substrat-Test, in welchem dem Boden Fluoride zugesetzt wurden, die umge-

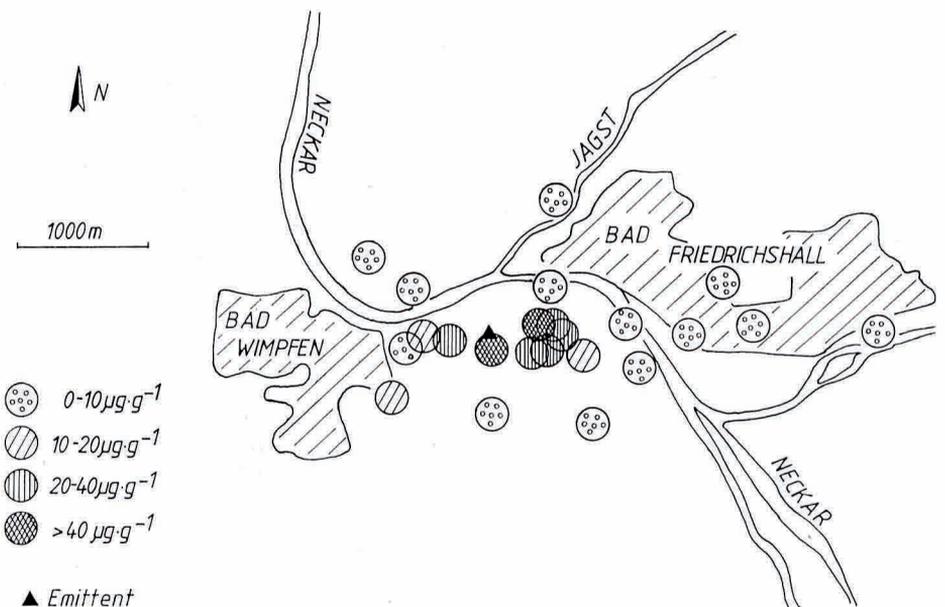


Abb. 4: Fluoridgehalte in den Gehäusen der Weinbergschnecke *Helix pomatia*

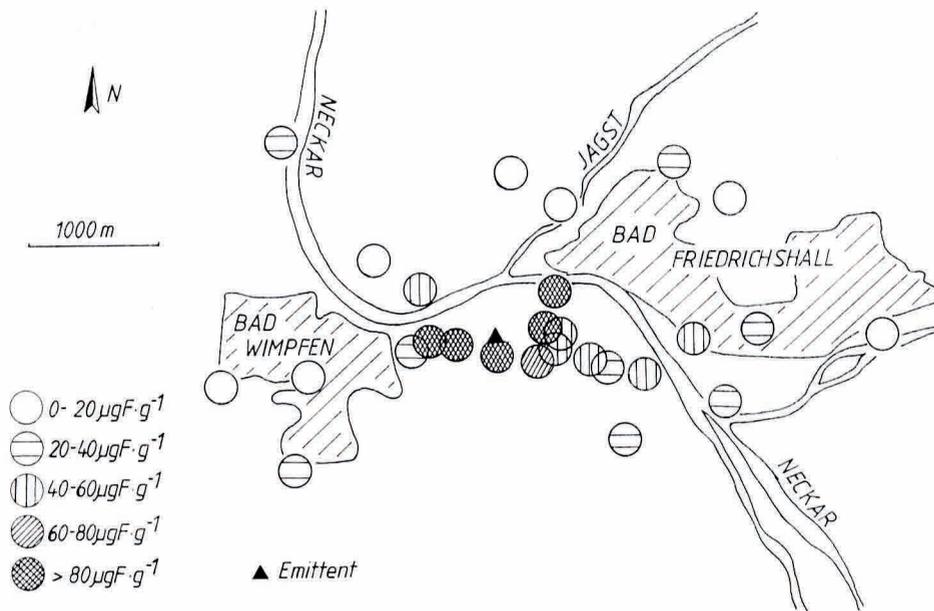


Abb. 5: Fluoridgehalte in Regenwürmern der Gattung *Lumbricus* spp. (ohne deren Darminhalt)

bes von *E. foetida* festgestellt werden. Das Chloragog ist **das** stoffwechselaktive Gewebe der Regenwürmer und funktionell der Wirbeltier-Leber vergleichbar. Es umlagert den Mitteldarm und die größeren Blutgefäße.

Licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, daß das Chloragog von allen Fluoriden, auch von CaF_2 , geschädigt wurde. Der Lipid- und Glykogengehalt ging zurück, die Zellen flachten apikal, also an der Spitze, ab, ihr Cytoplasma enthält zahlreiche Vesikel (Bläschen) mit unterschiedlichem Inhalt. Bemerkenswert sind kugelige oder ovoide Vakuolen mit konzentrischen Lamellen als Binnenstrukturen. Sie gleichen den Konkrementvakuolen oder „A-Vesikeln“ in stoffwechselaktiven Organen vieler Arthropoden, bei denen sie als Ionenspeicher (Ca^{++} , aber auch Schwermetalle und Anionen) bekannt geworden sind. Sie werden deshalb oft als Orte der Detoxifikation beschrieben. Daneben fallen im Cytoplasma zahlreiche stark modifizierte Mitochondrien auf, die sehr schlank und elektronendicht sind (Abb. 6).

kehrte Reihung der LC_{50} -Werte auftrat: $\text{FCH}_2\text{COONa} > \text{KF} > \text{NaF}$.

Wichtig für ökotoxikologische Bewertungen sind aber nicht nur die augenfälligen, akuten, sondern die subakuten Wirkungen von Schadstoffen. So kann z. B. die individuelle Fertilität herabgesetzt werden, ohne daß das Tier äußerlich („akut“) geschädigt erscheint; auf die Population wird sich ein solcher Effekt aber erheblich auswirken. Die subakuten Wirkungen wurden ebenfalls am Kompostwurm untersucht. Ermittelt wurde die Gewichtsentwicklung, der Eintritt der Geschlechtsreife, die an der Ausbildung des Clitellums, des sog. Gürtels, sichtbar ist, die Zahl der abgelegten Kokons und die Zahl der daraus geschlüpften Jungen (Tab. 1). Das unlösliche CaF_2 wirkte sich kaum auf die genannten Parameter aus. Allerdings war am Testende auch der Fluoridgehalt der CaF_2 belasteten Tiere erhöht. Sehr effektiv waren dagegen NaF und KF. Beide löslichen Fluoride beeinflussten Wachstum und Fertilität stark negativ. Verringerte Gewichtszunahme und verzögerte Geschlechtsreife sind zudem signifikant korreliert. Besonders bei NaF- und KF-Belastung sind also negative Wirkungen festzustellen, obwohl äußerlich keine Schäden erkennbar sind.

Die Wirkung auf Zellen und Gewebe

Ob Fluoride auch Zellen und Gewebe beeinträchtigen können, sollte anhand histologischer Untersuchungen des Chloragog-Gewe-

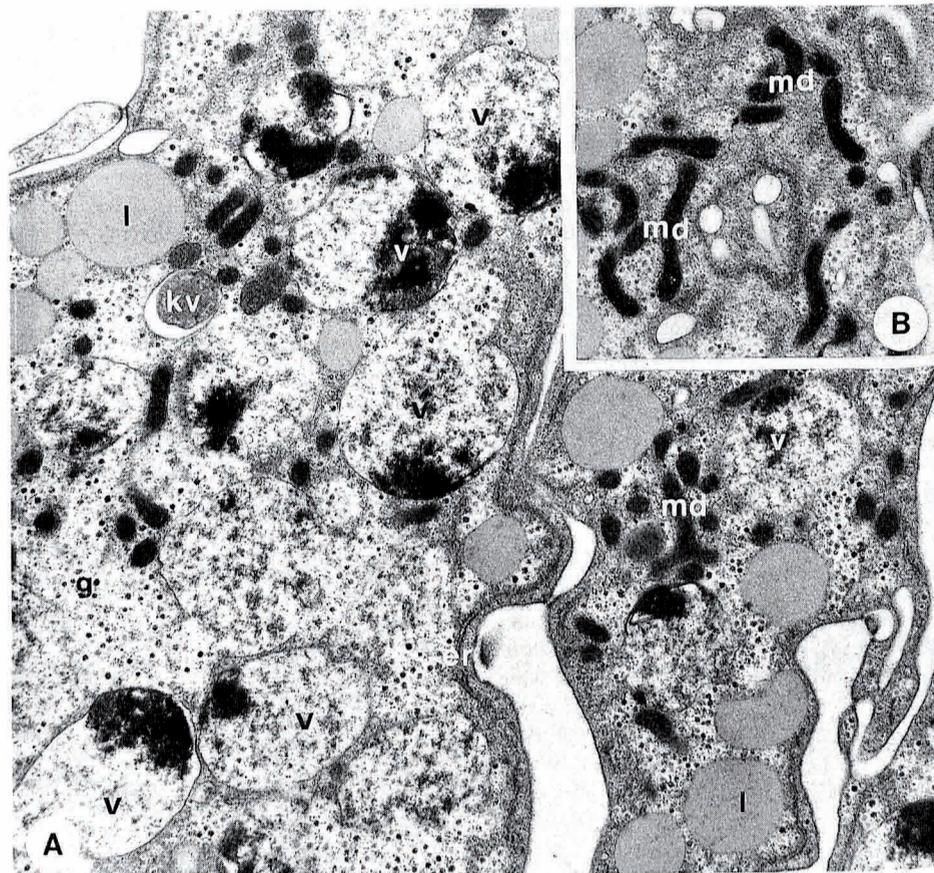


Abb. 6 A u. B: Geschädigte Chloragog-Zellen von *Eisenia foetida* mit zahlreichen Vakuolen und den charakteristisch modifizierten Mitochondrien; kv: Konkrementvakuole, v: Vesikel, i: Lipidtropfen, g: Glykogen, er: Endoplasmatisches Retikulum, md: modifiziertes Mitochondrion

Tabelle 1. Einfluß unterschiedlicher Fluoride auf das Wachstum, die Clitellumentwicklung, Anzahl der Kokons und Zahl der geschlüpften Jungen von *E. fetida* sowie der Fluorid-Akkumulation am Versuchsende

Substanz	NaF	KF	FCH ₂ COONa	CaF ₂
Gewicht	neg. ^{a)} 1800 ^{c)}	neg. 1000	neg. 240	kein ^{b)} –
Clitellum	neg. 1800	neg. 1000	kein –	pos. ^{d)} 1000
Kokonzahl	neg. 1800	neg. 1000	kein –	kein –
Junge	neg. 600	kein –	kein –	kein –
Fluorid-Akkumulation	pos. 600	pos. 250	kein –	pos. 1000

a) negativer Effekt, b) kein Effekt, c) Fluorid-Konzentration in mg F.kg⁻¹, ab der Wirkung auftritt, d) positiver Effekt

Das Bild entspricht weitgehend dem einer Zelldegeneration.

Zusammenfassender Ausblick

Böden, Flora und Fauna können lokale Fluoridbelastungen anzeigen. Eine Gefährdung des Grundwassers ist bei kalkreichen Böden kaum zu erwarten und nur bei biogener Tiefenverlagerung, z. B. über Regenwurmgänge, möglich. Eine starke Fluoridbelastung kann aber zu einer Verringerung der Artenvielfalt der örtlichen Vegetation, besonders unter sensiblen Pflanzen, führen. Die Fluorid-Kontamination der Bodenfauna hängt von der Belastung von Boden und Nahrung ab. Eine akute Ge-

fährdung der Bodenfauna scheint wenig wahrscheinlich, subakute Effekte können sich bei langfristiger Fluoridbelastung jedoch schädlich auswirken. Dies drückt sich bei Kompostwürmern in verminderter Fertilität und geringerem Wachstum aus. Auch die ermittelten histologischen Schäden dürfen nicht unterschätzt werden. Inwieweit sich diese auch auf Populationen auswirken können, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Auf jeden Fall ist bei langfristiger Fluoridbelastung auch mit zoozönotischen Veränderungen, also mit Veränderungen in der Lebensgemeinschaft der Fauna, zu rechnen. Außerdem ist eine Fluorid-Verteilung durch die Nahrungsnetze wahrscheinlich, und damit die Verbreitung von Fluorid in der Landschaft.

Zu den Autoren:



Dr. Jürgen Vogel, Jahrgang 1956, studierte Biologie in Gießen und Kiel. Von 1985 bis 1987 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde und Standortslehre in Stuttgart-Hohenheim, ab 1987 am Institut für Mikrobiolo-

gie und Landeskultur in Gießen und wurde 1990 über das hier vorgestellte Thema zum Dr. rer. nat. promoviert. Er war zwischenzeitlich im Naturschutz beschäftigt und ist jetzt freiberuflich tätig.

Prof. Dr. Johannes C. G. Ottow, M.Sc., studierte Agrarwissenschaften in Gießen und Biologie in Manhattan (Kansas, USA). Er wurde auf dem Gebiet der Bodenmikrobiologie promoviert. Von 1970 bis 1974 war er wissenschaftlicher Assistent an der TH Darmstadt. 1974 wurde er Professor für Bodenbiochemie an der Universität Hohenheim, bis er 1986 nach Gießen auf die Professur für Allgemeine und Bodenmikrobiologie berufen wurde. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Denitrifikation in Böden und Gewässern, Mikrobiologie der Rhizosphäre (bei Naßreis) und die biologische Stickstoffbindung (bei stengelknöllchenbildenden Leguminosen). Er ist Past-Präsident der Kommission für Bodenbiologie innerhalb der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft und Editor-in-Chief der internationalen Zeitschrift „Biology and Fertility of Soils“.

Prof. Dr. Gerhard Seifert, Jahrgang 1929, studierte Biologie und Chemie in Jena; Diplom: 1953, Promotion: 1958. 1953/54 war er wissenschaftlicher Assistent am Phyletischen Museum der Universität Jena, 1955 bis 1959 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin und am Institut für Phytopathologie in Naumburg/Saale; 1960 bis 1961 arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent am Zoologischen Institut der Universität Jena. Von 1962 bis 1966 war er am Zoologischen Institut der Universität Tübingen, von 1966 bis 1972 als Kustos, Oberkustos und Akademischer Oberrat am Zoologischen Institut der Universität Köln tätig. 1968 habilitierte er sich in Köln für das Fach Zoologie und wurde 1971 apl. Professor. 1972 wurde er auf die Professur für Spezielle Zoologie an der Universität Gießen berufen. Arbeitsgebiete: Funktionsmorphologie und Ultrastruktur v. a. der Anthropoden, Allgemeine Entomologie, pathologische Wirkung insektizider Pflanzenstoffe und Immunreaktionen bei Tracheaten.