

TELMA	Band 32	Seite 243 - 253	1 Abb., 4 Tab.	Hannover, November 2002
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

Anwendung von Grenzwerten der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung für Böden aus Torf

Use of critical values of the soil conservation law and directive for histosols

VOLKER SCHWEIKLE

Zusammenfassung

Grenzwerte für die land- und forstbauliche Nutzung von Mineralböden werden auf Böden aus Torf übertragen, ohne deren physiko-chemische Eigenschaften zu berücksichtigen. Mit Modellen, basierend auf Lehrbüchern, wird gezeigt, dass sich Torfe von Mineralböden erheblich unterscheiden bezüglich Verankerung von Wurzeln, CO₂-Produktion, (Schad-)Stoffsorption und der Aufnahmefähigkeit von (Schad-)Stofffrachten.

Abstract

Critical values for the use for agronomy and forestry of terrestrial soils are applied upon histosols, neglecting their physico-chemical characteristics. With models, based upon text-books, it is demonstrated, that histosols are quite different from mineral soils concerning moorage of roots, CO₂-production, sorption of (harmful) elements and the capacity for absorbing imports of (harmful) elements.

1. Einleitung

In Böden wird ein Porenvolumen von Pflanzen durchwurzelt und von Wasser durchströmt und nicht eine Bodenmasse. Deshalb sollte auch das Bodenvolumen Bezugsbasis von Grenzwerten sein und nicht die Bodenmasse wie in der BBodSchV (1999), die auf diese wichtige Randbedingung nicht einmal hinweist.

Grenzwerte (Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV (1999)) im stofflichen und nichtstofflichen Bodenschutz sind bezogen auf Mineralböden mit Raumgewichten von 0,8 bis 1,5 Mg/m³, Gehalten an organischer Masse ≤ 8 % und vernachlässigbarem Masseverlust durch Verwitterung. In Böden aus Torf sind die Raumgewichte jedoch wesentlich niedriger, die Gehalte an organischer Masse sehr viel höher und die

Masseverluste des Organischen durch Zersetzung hoch. Sie unterscheiden sich also wesentlich von Mineralböden, weshalb gebietsbezogene Festsetzungen in der BBodSchV (1999) vorgesehen sind.

Im Folgenden wird dargestellt, wie skalare Größen zur Bewertung von Mineralböden nach BBodSchV (1999), AD-HOC-ARBEITSGRUPPE (1994) und BOLT (1966) für Böden aus Torf modifiziert werden müssen. Betrachtet werden nur die Nutzungen als

- Ausgleichskörper im Wasserhaushalt von Böden (und Landschaften)
- Fläche zur Pflanzenproduktion im Rahmen des Forst-, Land- und Gartenbaus und
- Entsorgungsfläche für Abfälle, Abwasser und Abgase.

2. Methodik

Die Ansprüche von Nutzpflanzen terrestrischer Böden an deren Eigenschaften wurden entnommen KUTSCHERA (1960), BOLT (1966) und STRAßBURGER (1991), die Eigenschaften von Torfen NAUCKE (1990) und SCHWEIKLE (1990) und die formal-physikalische Betrachtung BOLT (1966) und HILLEL (1980).

Im Folgenden bedeutet Mg = Megagramm = Tonne.

3. Ergebnisse

3.1 Sickerung

Wasser versickert mit hinreichender Geschwindigkeit nur in Poren $\geq 50 \mu\text{m}$. Setzt man nach Hagen-Poiseuille

$$V = \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8 \eta l \sqrt{3}} \frac{mm}{h}$$

V	=	Volumen von Wasser (m ³)
r	=	Porenradius = $25 \cdot 10^{-6}$ m
t	=	Strömungszeit (h)
Δp	=	Druckdifferenz (Pa)
l	=	Strömungsstrecke (m)
$\sqrt{3}$	=	Tortuosität (Wegverlängerung durch Umwege um Partikel im Porenraum eines Bodens)
η	=	dynamische Viskosität = $1,4 \cdot 10^{-3}$ Pa s

formt um und unterstellt vertikale Strömung, so folgt, dass die Strömungsrate in einer Pore etwa $1,7 \cdot 10^{-8}$ mm/h beträgt.

Sollen 8 mm/h versickern, muss die Summe der Querschnitte aller Poren $\geq 50 \mu\text{m}$ ca. 10 % der Bodenfläche betragen.

Voraussetzung ist, dass das versickernde Wasser von Dränagen ohne Rückstau aufgenommen und abgeführt werden kann.

3.2 Wurzelwachstum (mechanische Grenze)

Wurzeln benötigen zum Wachsen Poren ≥ 12 bis $20 \mu\text{m}$. Der durchwurzelbare Raum sollte je m^2 Bodenfläche bei einer Wahrscheinlichkeit von 20 Tagen Trockenheit in der Vegetationszeit (Dauer maximaler Trockenheit in Baden-Württemberg in der Vegetationszeit in den Jahren 1890 bis 1950 ca. 20 Tage (KNOCH 1953)) und einer Evapotranspirationsrate von 3 mm/d 40 l betragen; was bei Torfen mit geringem Zersetzungsgrad ca. 15 cm, mit hohem ca. 30 cm durchwurzelbare Bodenmächtigkeit erforderlich macht.

Wurzeln mit Mykorrhiza mit Hyphen-Durchmessern von ca. $2,5 \mu\text{m}$ können Wasser auch aus Poren $\geq 2,5 \mu\text{m}$ Durchmesser gewinnen. Bis zu 80 % der Hyphenmasse in Böden ist jedoch tot. Fraglich ist, ob diese trotzdem Wasser (und Nährstoffe) transportieren können. Bei gleicher Wahrscheinlichkeit von Trockenheiten in Baden-Württemberg wie oben würde sich die oben angegebene Bodenmächtigkeit von 15 auf 10 bzw. 30 auf 20 cm verringern.

Wegen eines üblicherweise hohen Grundwasserspiegels mit leicht verfügbarem Wasser in Böden aus Torf könnten Pflanzen auf durchwurzelbaren Raum verzichten, wenn durchwurzeltes Bodenvolumen nicht auch der Verankerung und Nährstoffversorgung von Pflanzen dienen müsste.

3.3 Verankerung

Pflanzen verankern sich mit ihren Wurzeln in Böden, wobei den Wurzeln nur Poren mit Durchmessern $\geq 12 \mu\text{m}$ (mit Mykorrhiza $\geq 2,5 \mu\text{m}$) zur Verfügung stehen. Das zur Verankerung notwendige Bodenvolumen muss mindestens soviel wiegen, dass Winddruck und die von der Lotrechten abweichende Masse einer Pflanze bei Auslenkung durch Wind ausgeglichen werden. Die Feucht-Raumgewichte (Masse fester Substanz und Wasser in Poren $\geq 12 \mu\text{m}$ /Volumen) von Torfen betragen bei geringen Aschegehalten, bei hohem Zersetzungsgrad ca. $0,6 \text{ Mg/m}^3$ und bei geringem ca. $0,4 \text{ Mg/m}^3$. Werden $0,5 \text{ Mg/m}^3$ unterstellt und wendet man Hebel-, Strömungswiderstands- und Vektor-Gesetze

für eine 21 m hohe, freistehende Fichte mit 7 m Kronenhöhe und Sturm von 100 km/h an (Abb. 1), sollte bei 0,5 m durchwurzelbarer Torf-Mächtigkeit der Wurzelteller etwa 9 m Durchmesser besitzen. Im Bestand, wo nur der obere Kronenbereich angeströmt wird, dürften 6 m Wurzelteller-Durchmesser zur Verankerung ausreichen.

Waldbau auf Torf sollte deshalb Schwachholz-Sortimente bevorzugen.

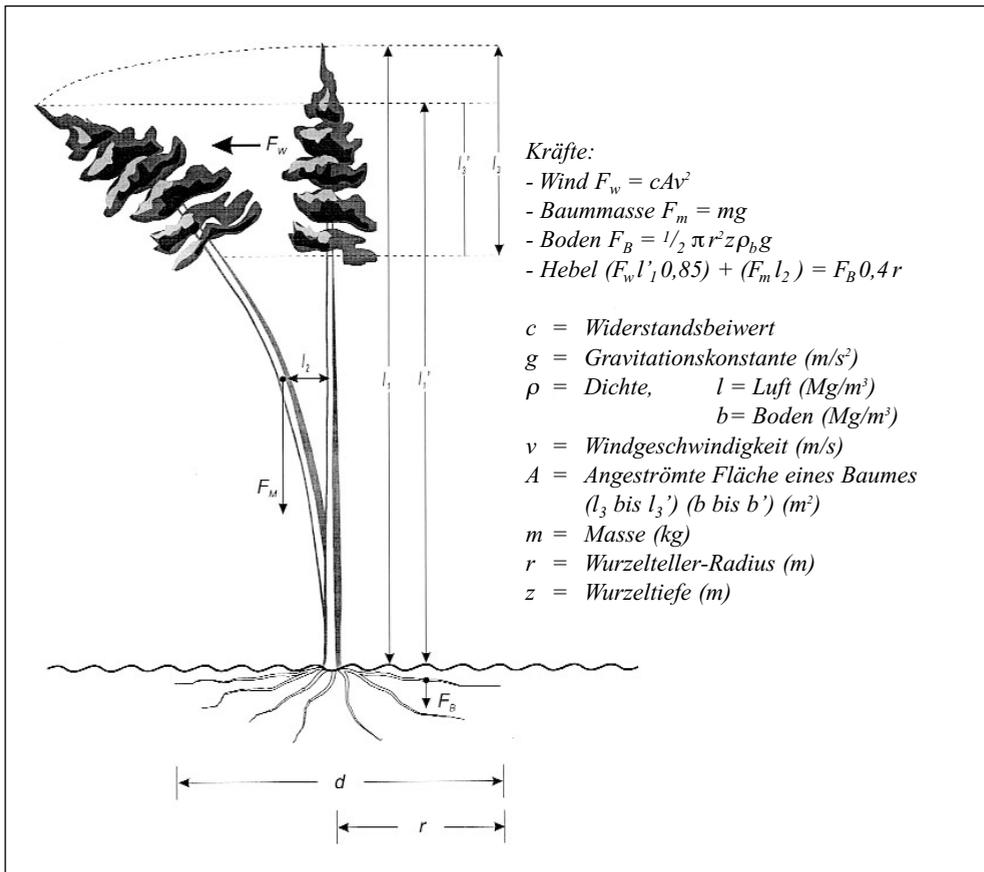


Abb. 1: Kräfte am Baum bei Wind
 Forces at a tree at wind

3.4 Wurzelwachstum (physiologisch)

Wurzeln erzeugen beim Atmen Kohlendioxid, welches bei Partialdrucken von ≥ 3 bis 5 kPa für die Wurzeln toxisch ist. Es muss über das Luftvolumen der Pedosphäre zur Atmosphäre diffundieren, da die meisten mitteleuropäischen Kulturpflanzen (einschließlich Bäumen) kein Aerenchym besitzen. Das Mindestluftvolumen freidränender Böden bilden Poren $\geq 50 \mu\text{m}$. Für CO_2 -Strömungsraten gilt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_f \frac{\partial c}{\partial z} \right) \pm S(z, t),$$

wobei $D_f = \frac{D \cdot f_a}{\sqrt{t_o}}$ ist bei konstantem D_f wird die obige Gleichung zu

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \pm S(z, t) \text{ mit}$$

S	=	CO_2 -Produktion der Vegetation; 2 bis $6 \cdot 10^{-7} \text{ mg CO}_2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.
D	=	Diffusions-Konstante für CO_2 in Luft; ca. $0,2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
f_a	=	Luftvolumen im Boden bei Feldkapazität; Fibrist (Boden aus wenig zersetztem Torf) 0,25 bis 0,55 m^3/m^3 , Saprist (Boden aus stark zersetztem Torf) 0,2 bis 0,4 m^3/m^3 .
t_o	=	Tortuosität mit 2 bis 3 (Wegverlängerung durch Umwege um Partikel im Porenraum eines Bodens)
c	=	CO_2 -Konzentration
z	=	Bodentiefe (cm)
t	=	Zeit (s)

Bei einem oxidierbaren C-Gehalt in Torf von $450 \pm 90 \text{ g/kg}$ (NAUCKE 1990), einer Lagerungsdichte von $0,12 \pm 0,07 \text{ Mg/m}^3$ und einer Zersetzungsrate von 1 cm/a beträgt die CO_2 -Produktion je cm^3 und s etwa $6 \cdot 10^{-6} \text{ mg}$. Je nach Lagerungsdichte und C-Gehalt von Torfen variiert sie zwischen 2 bis $16 \cdot 10^{-6} \text{ mg/cm}^3 \text{ s}$.

Bei Niedermooren unter Grünland dürfte die CO_2 -Produktion maximal insgesamt (Wurzelatmung plus Torfzersetzung) etwa $15 \cdot 10^{-6} \text{ mg/cm}^3 \text{ s}$ (von 7,6 bis $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ mg/cm}^3 \text{ s}$) betragen. Bei Ackernutzung von Torf und Zersetzungsraten von 2 cm/a dürfte die CO_2 -Produktion bei $21 \text{ mg/cm}^3 \text{ s}$ liegen.

Im Term $D_f = \frac{D \cdot f_a}{\sqrt{t_o}}$ sind f_a und t_o abhängig vom Wassergehalt des Bodens. Mit zunehmendem Wassergehalt (m^3/m^3) wird t_o größer und f_a kleiner (HILLEL 1980).

Nach BOLT (1966) kann bei Wassergehalten bei Feldkapazität in Sapristis (Boden aus stark zersetztem Torf) die CO_2 -Konzentration toxische 10 kPa (entspricht 10 %) in 30 cm Tiefe übersteigen.

In Torfböden sollte also das Luftvolumen bei Feldkapazität 30 Vol. % nicht unterschreiten und der durchwurzelbare Raum eine Mächtigkeit von 20 cm nicht überschreiten (was eine exakte Grundwasserstandsreglung erfordert), um Ertragseinbußen infolge toxischer CO_2 -Gehalte (bzw. unzureichende Wasserversorgung siehe 3.2) zu vermeiden.

3.5 Verdichtungsneigung

Torfe werden durch Belastung verdichtet. Das Porenvolumen nimmt ab. LEBERT (1989) maß folgende Beziehungen für Böden:

mit	10 % organischer Substanz	$\varepsilon = -0,246 \ln \sigma_n + 2,24; \quad r^2 = 0,95;$
mit	20 % organischer Substanz	$\varepsilon = -0,478 \ln \sigma_n + 3,8; \quad r^2 = 0,94$ und
\geq	95 % organischer Substanz	$\varepsilon = -0,8 \ln \sigma_n + 6$ (geschätzt).

In den Regressionsgleichungen (mit 6 kPa entwässert vor Verdichtung) bedeutet:

ε	=	Porenziffer = V_f / V_s mit
V_f	=	Porenvolumen m^3/m^3
V_s	=	Substanzvolumen m^3/m^3
σ_n	=	Normalspannung = Druck (kPa)

Bei einer Belastung von 200 kPa, was üblichen Reifendruck entspricht, bedeutet dies Verluste an Porenvolumen wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Änderung des Porenvolumens bei einer Belastung von 200 kPa.
Change of pore-volume at a pressure of 200 kPa.

org. Substanz %	Anfangs-Porenvolumen m^3/m^3	End-Porenvolumen m^3/m^3	Verluste %
10	0,70	0,52	26
20	0,75	0,58	23
≥ 95	0,80	0,64	20

Die scheinbar geringen Verluste an Porenvolumen sind vor allem Verluste an Grobporen, die für die Gasdiffusion wichtig sind (s. Kap. 3.4).

3.6 Stoffgehalte

Bezugsbasis für Schadstoffe in Böden aus Torf können sein: die Bodenmasse, das Bodenvolumen oder einer Fraktion darin, wie z. B. Asche oder silikatische Feinerde.

3.6.1 Der Massebezug

Nach BBodSchV und anderen gesetzlichen Regelungen ist nur die Bodenmasse Bezugsbasis für Schadstoffe:

$$\text{Sch} = m_s / m_b \quad (\text{Mg/Mg}), \text{ mit} \quad m = \text{Masse (Mg)} \quad s = \text{Schadstoff} \\ b = \text{Boden}$$

Soll auf Fraktionen im Mineralboden bezogen werden, muss korrigiert werden, und zwar für

- humusfreies Material = Asche: m_b wird ersetzt durch $m_b' = m_b - C_{\text{org}}$
- silikatisches Material: m_b wird ersetzt durch $m_b'' = m_b - C_{\text{org}} - C_{\text{CO}_3}$
mit C_{org} = Masse an org. Substanz (Mg)
und C_{CO_3} = Masse an Karbonaten (Mg).

In der BBodSchV wird weder mit dem Gehalt an organischer Substanz noch mit dem von Karbonaten korrigiert.

3.6.2 Der Volumenbezug

Für Pflanzenwurzeln bedeutsam ist die Verteilung der Stoffe im Wurzelraum und nicht in der Bodenmasse. Die Schadstoffdichte im Bodenvolumen wird wie folgt errechnet:

$$m_s / V_b = \text{Sch} \cdot \rho_b \quad (\text{Mg/m}^3 \text{ m})$$

mit V_b = Bodenvolumen (m^3), m_s = Schadstoffmasse (kg),
 $\text{Sch} = m_s / m_b$, ρ_b = Raumgewicht von Mineralboden (Mg/m^3)

Bei Mineralböden variiert ρ_b um bis zu $\pm 30\%$, mit denen man leben kann. Böden aus entwässerten Torfen haben allerdings sehr viel geringere Raumgewichte als Mineralböden. Gleiche Schadstoffdichte bedeutet deshalb um den Faktor ρ_b/ρ_t höhere massebe-

zogene Schadstoffgehalte, nämlich:

$$m_s / m_t = Sch_t = Sch \cdot \rho_b / \rho_t \quad \text{mit}$$

Sch_t = Schadstoffdichte in Torf (Mg/m³)
 m_t = Masse Torf (Mg)
 ρ_t = Raumgewicht Torf (Mg/m³)

Sch wären „Grenzwerte“ der BBodSchV, bezogen auf Mineralböden.

Höhere massebezogene Schadstoffgehalte in Torfen gegenüber Mineralböden wären akzeptabel, wenn Torfe ähnliche Porengrößenverteilungen wie Mineralböden besäßen und ähnlich durchwurzelt werden könnten. Das durchwurzelnbare Porenvolumen in Torfen (Porendurchmesser $\geq 10 \mu\text{m}$ entsprechend pF 2,5 entsprechend 33 kPa) von 40 bis 70 % (Lehm etwa 20 %; Sand etwa 30 %) ist 2- bis 3-fach größer als in Mineralböden. Entsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Wurzeln Schadstoffe erreichen können.

Daraus folgt, dass

$$Sch_t = Sch \cdot V_b' / V_t' \quad \text{ist, mit}$$

V' = durchwurzelnbares Volumen
 b = Mineralböden
 t = Torf

Zusammengefasst folgt: $Sch_t = Sch \cdot \rho_b / \rho_t \cdot V_b' / V_t'$

In Tabelle 2 wird gezeigt, um welchen Faktor die Grenzwerte (hier Vorsorgewerte) der BBodSchV für Torfe korrigiert werden müssen, um Gleichbehandlung zu gewährleisten und in Tab. 3 wird Blei beispielhaft vorgestellt.

Tab. 2: Korrekturfaktoren für „Grenzwerte“ der BBodSchV für Schadstoffgehalte in Torfen.
 Correction factors for critical values of the BBodSchV for contents of harmful chemicals in peat.

Zersetigungsgrad	ρ_t Mg/m ³	ρ_b Mg/m ³	ρ_b/ρ_t	V_b'/V_t'	Korrekturfaktor
H 1	0,05	1,0	20	0,33	x 7
H 4	0,1	1,0	10	0,33	x 3,3
H 6	0,15	1,0	7	0,33	x 2,3
H 9	0,20	1,0	5	0,33	x 1,7

Tab. 3: Berechnung der Vorsorgewerte für Blei für Böden aus Torf.
Calculation of precaution values for lead for histosols.

Körnung	Vorsorgewert für Mineralböden mg/kg	Zersetzungsgrad nach von Post	Korrekturwert nach Tab. 2	Vorsorgewert Torf mg/kg
Torf	100	H 9	1,7	170
Lehm	70	H 5	2,8	200
Sand	40	H 1	7	280

Werden die für Mineralböden geltenden Grenzwerte der BBodSchV angewandt, würden die Sicherheitsfaktoren 2 bis 3 betragen.

3.6.3 Stofffrachten

Neben den auf Bodenmasse bezogenen Grenzwerten wird auch die Fracht, d. h. die Zufuhr je ha und a, von Schadstoffen begrenzt. Die Fracht orientiert sich letztlich an Abschreibungszeiten (die z. B. für Schwermetalle in Klärschlämmen auf ungefähr 200 Jahre festgelegt wurden), wobei Mineralböden mit relativ konstanten Raumgewichten und damit vergleichbarer Bodenmasse zugrunde gelegt werden. Sollen Schwermetalle auf Böden aus Torf ausgebracht werden, müssen Frachten, bei gleicher Abschreibungszeit, den niedrigeren Raumgewichten von Torfen angepasst werden (s. Tab. 4).

Tab. 4: Zulässige Frachten von Blei auf Ackerflächen auf Torf.
Acceptable imports of lead upon ploughed histosols.

Mineralboden		Torfboden		Korrektur	Torf
Fracht für Pb g/ha a	ρ_b Mg/m ³	Zersetzungsgrad nach von POST	ρ_t Mg/m ³	ρ_b / ρ_t	zulässige Fracht g/ha a
400	1,0	H 1	0,05	1 : 20	20 (13) ¹⁾
400	1,0	H 5	0,125	1 : 8	50 (33)
400	1,0	H 9	0,20	1 : 5	80 (53)

¹⁾ Ziffern in Klammern berücksichtigen die um 1/3 geringere Pflugtiefe bei Böden aus Torf gegenüber Böden aus Mineralböden.

3.6.4 (Schad)Stoffgehalte und Torfzersetzung

Dränierte Torfe werden mikrobiell zersetzt und verlieren Masse. Allerdings wird im gleichen Umfang, wie der Oberboden zersetzt wird, nativer Torf aus dem Unterboden in den Wurzelraum biogen und anthropogen einbezogen.

Sind die Tiefenfunktionen von (Schad-)Stoffen, Asche und org. Substanz und die Rate der Torfzersetzung und –sackung bekannt, lässt sich die Residualakkumulation von originären (Schad-)Stoffen prognostizieren und bei Kenntnis der Im- und Exporte auch die tatsächliche Akkumulation und damit auch das Auffüllungspotential.

4. Diskussion

Die Porenverteilung in Böden aus Torf verändert sich durch Torfzersetzung, wobei der Sickerung und dem Gasaustausch dienende Grobporen zugunsten von Feinporen abnehmen. Besonders beim Gasaustausch, der hohe Diffusionsquerschnitte erfordert, bedeutet dies eine deutliche Verringerung der Gründigkeit mit der Folge von Wasserstress.

Torfe sind ein schlechter Verankerungsgrund für Bäume, bedingt durch geringes Raumgewicht und i. d. R. geringe Gründigkeit, die auch bei tieferer Entwässerung wegen stärkerer Zersetzung mit Grobporenverlust nicht dauerhaft ist.

Stark zersetzte Torfe verlieren ihre Elastizität und werden verdichtungsanfälliger.

Die Bindung von „Grenz“-Werten von (Schad-)Stoffen in Böden aus Torf auf Basis von Gesamtgehalten muss ergänzt werden, um die Messung mobilisierbarer Fraktionen aus dem Abbau der organischen Substanz und aus der Oxidation aus sulfidischer Bindung. Die oben angesprochenen Prognosen und übliche Analysen auf (Schad-)Stoffe unterstellen konstante Mobilität, was gerade in semiterrestrischen Böden nicht wahrscheinlich ist.

Werden mit Mineralböden vergleichbare Nutzungszeiten von Böden aus Torf bezüglich der Zufuhr von mit Schadstoffen belasteten Abfällen, wie Klärschlämmen, Komposten und Schwemmmist angestrebt, müssen die zulässigen jährlichen Frachten so stark verringert werden, dass eine wirtschaftliche Ausbringung von Abfällen auf Böden aus Torf nicht sinnvoll ist, obwohl Vorsorgewerte erhöht werden könnten. Man sollte deshalb grundsätzlich auf das Verbringen schadstoffhaltiger Abfälle und Düngemittel (auch aus betriebsinternen Quellen, wie z. B. Cu- und Zn-belasteten GülLEN u. ä.) auf Böden aus Torf verzichten.

Regeln der Anpassung von Vorsorgewerten an Böden aus Torf sollten zwangsläufig auch für Prüf- und Maßnahmenwerte gelten.

5. Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung.- 4. Auflage, 392 S. (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung); Hannover.
- BOLT, G. H. (1966): Basic elements of soil chemistry und physics, part II soil physics. Post-graduate training programme. University of Wageningen.
- BBodSchV = Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999. (Bundesgesetzblatt I Seite 1554/Bundesgesetzblatt III 2129-32-1).
- HILLEL, D. (1980): Fundamentals of soil physics, Academie Press; New York.
- KNOCH (1953): Klimaatlas von Baden-Württemberg. Deutscher Wetterdienst; Bad Kissingen.
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas. DLG-Verlag; Frankfurt
- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther bodenkundliche Berichte **12**; Bayreuth.
- NAUCKE, W. (1990): Chemie von Moor und Torf. - In: Göttlich, Kh. (Hrsg.): Moor- und Torfkunde. - 237-261; Stuttgart (Schweizerbart).
- SCHWEIKLE, V. (1990): Physik des Torfes und der Moorböden. - In: Göttlich, Kh. (Hrsg.): Moor- und Torfkunde. - 272-283; Stuttgart (Schweizerbart).
- STRABBURGER, E. (1991): Lehrbuch der Botanik. (Fischer-Verlag); Stuttgart.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. V. Schweikle
 Institut für Geographie und Geoökologie, Universität Karlsruhe
 Postfach 69 80
 76128 Karlsruhe
 E-mail: Volker.Schweikle@lfuka.lfu.bwl.de

Manuskriptes eingegangen am 15. Mai 2002