

Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf Böden

Dietmar Klotz^{1*} und Piotr Maloszewski¹

Abstract

Der prognostizierte globale Klimawandel mit Temperaturerhöhungen von 3 °C bis 5 °C bewirkt einerseits Änderungen der hydraulischen Eigenschaften von Böden (Durchlässigkeit, effektives Fließvolumen, Saugspannung, Dispersivität) sowie der Evapotranspiration bewachsener Böden. Das kann zur Folge haben, dass die totalen Wassergehalte und die Grundwasserneubildungen in und unter Böden abnehmen und damit die Sickerwassergeschwindigkeiten zunehmen, wie Versuche in verschiedenen bayerischen Lysimeterböden zeigten. Andererseits bewirken erhöhte Temperaturen langfristig Änderungen der Stoffausträge aus Böden, der Schadstoff-Quellstärken kontaminierter Materialien sowie des Abbaus von organischen Abfallmaterialien, wie Untersuchungen in vier verschiedenen Lysimeterböden, in drei Altlastenlysimetern und in einem Kompostlysimeter zeigten.

Einleitung

Die Erdgeschichte belegt, dass das Klima sehr empfindlich auf Änderungen der äußeren Bedingungen reagiert. Langfristige Klimaschwankungen der Erde hängen mit Variationen der Erdbahn zusammen, die durch die Schwerkraft anderer Planeten verursacht wird. In den letzten Jahrhunderten ist das Erdklima bemerkenswert stabil (Ausnahmen: kleine Eiszeiten im 14. und 16. Jahrhundert). Doch seit ca. 150 Jahren steigt die Temperatur deutlich an, wofür hauptsächlich anthropogene Einflüsse, sog. „Forcings“ wie Treibhausgase und Aerosole (HANSEN 2005) verantwortlich sind, die die Energiebilanz ändern: diese Forcings adsorbieren die vom Erdboden ausgehende Infrarotstrahlung in der Atmosphäre. An dieser Art „Glasglocke“ wird die Wärme zur Erdoberfläche zurückgestrahlt, anstatt sie in den Weltraum entweichen zu lassen. Folge der unausgeglichene Energiebilanz ist die Erderwärmung.

Der globale Klimawandel bewirkt (KOHL & KÜHR 2004):

1. Die mittlere globale Temperatur der Atmosphäre steigt.
2. Die globalen Niederschlagsmengen und das Niederschlagsmuster haben sich im 20-sten Jahrhundert verändert: Niederschlagszunahme in Teilen Australiens, Nordamerikas und -europas, Niederschlagsabnahme in der Sahelzone.
3. Folgen der globalen Erderwärmung sind die Zunahmen extremer Wettersituationen (z. B. Zunahme der Starkniederschläge, Trockenheit und Dürren, minimale Nachttemperaturen) und Anstieg der Meeresspiegel (durch thermische Expansion sowie Abtauen des arktischen Eisschildes, der Schneedecken und der Gletscher).

Im Folgenden wird über den Einfluss einer Temperaturänderung auf die physikalisch/hydraulischen Parameter des Systems Boden/Sickerwasser und auf den Stoffaustag mit dem Sickerwasser (bzw. auf die chemisch-physikalischen Parameter des Sickerwassers) unter Böden und aus Altlasten berichtet.

Eingesetzte Messanordnungen und verwendete Böden/Materialien

Als Messanordnungen wurden Laborsäulen und Freiland-lysimeter eingesetzt (*Abbildung 1*):

• Messanordnung I: Laborsäulen des Institutes für Hydrologie,

bestehend aus Acrylglassäulen der Nennweite 50 mm und der Länge 500 mm (KLOTZ 1992). Bestimmt wurden die hydraulischen Eigenschaften unter Variation der Temperatur, der Sickerwassergeschwindigkeit, des Wassergehaltes und der Saugspannung, als Lockersediment wurde ein gleichförmiger natürlicher Feinsand unter versuchstechnisch dichter Lagerung verwendet.

• Messanordnung II: Grosslysimeter der Anlage Neuherberg,

bestehend aus Edelstahlsäulen von 1,00 m² Querschnitt und 2,00 m effektiver Länge (KLOTZ & SEILER 1998), in die 4 x 4 Böden aus Bayern („Standorte“ und Bodenan-sprache s. *Tabelle 1*) eingebaut sind. Untersucht wurden die Änderungen des Wassergehaltes in den Böden und der Grundwasserneubildung unter Böden sowie der Stoffausträge (Hauptionen, DOC und Al) unter Böden mit dem Sickerwasser.

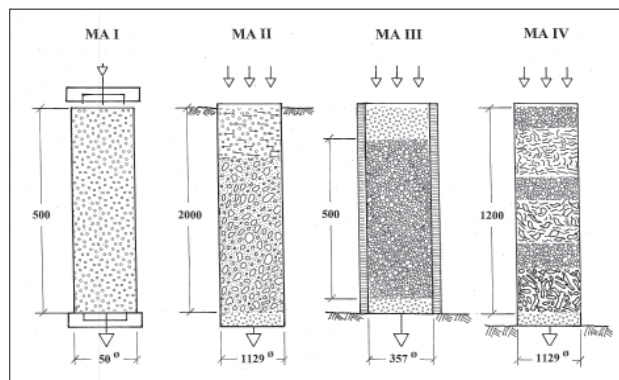


Abbildung 1: Schematische Darstellung der eingesetzten Messanordnungen; von links: Laborsäule (MA I), Großlysimeter (MA II), Kleinlysimeter (MA III), Kompostlysimeter (MA IV); Maße in [mm].

¹ Helmholtz-Zentrum München, Institut für Grundwasserökologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 NEUHERBERG

* Ansprechpartner: dietmar-klotz@t-online.de

Tabelle 1: Beschreibende Größen für die in die Gefäßlysimeter der Messanordnungen II bis IV eingebauten Materialien.

| Boden, Material | Standort Bezeichnung | Boden-/Materialansprache | Horizont-Anzahl | Einbaumethode |
|--|----------------------|---------------------------|-----------------|---------------|
| Messanordnung II: Großlysimeter der Anlage Neuherberg Position: 48° 13,37 N, 11° 35,83 E, 491 m | | | | |
| SCH | SCHEYERN | pseudovergleyte Braunerde | 3 | monolithisch |
| KEH | KELHEIM | Braunerde | 3 | monolithisch |
| HW | HOHENWART | Kolluvium ü. Braunerde | 4 | monolithisch |
| FK | FELDKIRCHEN | Rendzina | 2 | händisch |
| Messanordnung III: Kleinlysimeter des Instituts für Hydrologie Position: 48° 13,43 N, 11° 35,78 E, 494 m | | | | |
| BO | Kontam. Boden | Mittelsand-Bereich | 1 | händisch |
| MV | Hausmüllv.-Asche | Mittel-/Grobsand-Bereich | 1 | händisch |
| BS | Bauschutt | Mittelsand-Bereich | 1 | händisch |
| Messanordnung IV: Kompostlysimeter München-Freimann Position: 48° 11,41 N, 11° 37,26 E, 497 m | | | | |
| KP | Kompost | Äste, Laub, Gras, Boden | 3 | händisch |

• **Messanordnung III: Kleinlysimeter des Institutes für Hydrologie,**

bestehend aus drei Edelstahlsäulen von 0,10 m² Querschnitt und 0,65 m effektiver Länge (KLOTZ 2006), in die drei verschiedene Altlasten (Materialansprache s. *Tabelle 1*) von 0,50 m Mächtigkeit eingebaut waren (Betriebszeit: Februar 2002 bis November 2004). Untersucht wurde der Einfluss des Extremsommers 2003 auf die Schadstoff-Quellstärken der Altlasten.

• **Messanordnung IV: Kompostlysimeter München-Freimann,**

bestehend aus übereinander angeordneten Kunststoff-Rohrabschnitten von 1,00 m² Querschnitt und 1,20 m effektiver Länge (KLOTZ 2007 a), in das zu Versuchsbeginn zerkleinerte Äste, Laub, Grasschnitt und bereits kompostierte Erde (s. *Tabelle 1*) versuchstechnisch dicht eingefüllt waren. Es wurde der Einfluss der zu warmen Winter 2006/07 und 2007/08 (gegenüber dem mehrjährigen Mittel) auf die Leitfähigkeit des Sickerwassers untersucht (Untersuchungszeitraum: Juni 2004 bis Februar 2008).

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung von beschreibenden Größen für die in die Lyssimeter der Gelände-Messanordnungen (II bis IV) eingebauten Böden, Altlasten-Materialien und des zu kompostierenden Materials.

Temperaturerhöhungen an den eingesetzten Messanordnungen

Erhöhte Temperaturen an den Messanordnungen MA können entweder durch künstliche kontinuierliche Wärmezufuhr (MA I und teilweise II) oder durch Ausnutzung extremer natürlicher Temperaturen über bestimmte Zeiträume (meteorologische Jahreszeiten) (MA II, IV und teilweise II) eingestellt werden:

1. Temperaturen im Bereich 3 °C bis 35 °C wurden in den Laborsäulen (MA I) durch ihren Einbau in eine Klimakammer erzeugt.

2. In der Betriebszeit 2001 bis 2008 der Lyssimeter (MA II, III und IV) traten große Variationen in den klimatischen Parametern auf. Für die Temperaturen im Münchner Norden erhält man für die mittleren Temperaturen der meteorologischen Jahreszeiten dasselbe Muster (*Abbildung 2*): die Werte liegen i. a. im entsprechenden Bereich des 20-jährigen Mittels. Ausnahmen bilden der zu warme meteorologische Sommer 2003 sowie die zu warmen Winter 2006/07 und 2007/08, die als Modelle für den globalen Wandel in den Messanordnungen II (teilweise), III bzw. IV dienen können.

3. Zwei der vier Großlysimeter jeden Standortes (MA II) waren ab Juni 2001 mit oberflächlich aufgelegten Heizspiralen der Fa. Umweltanalytische Messsysteme GmbH, München (UNOLD 2005) ausgestattet, um den natürlichen Temperaturverlauf (*Abbildung 2*) um 3 °C zu erhöhen.

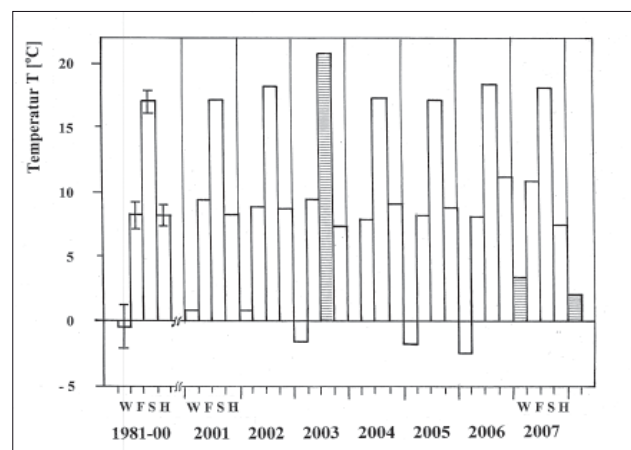


Abbildung 2: Mittlere Lufttemperaturen T im Münchner Norden der meteorologischen Jahreszeiten Winter 2000/01 bis Winter 2007/08 sowie Werte des 20-jährigen Mittels (1981 – 2000); Werte nach DWD, Oberschleißheim und Flughafen München.

Ergebnisse der physikalisch-hydraulischen Untersuchungen

Hydraulischen Parameter in Messanordnung I

In die Säulen der MA I, in die ein Feinsand gut reproduzierbar dicht eingebaut war, wurde die Abhängigkeit eines speziellen hydraulischen Parameters (z. B. Durchlässigkeit) von der Temperatur bei Konstanzhaltung anderer Größen (z. B. Wassergehalt, Saugspannung) bestimmt. Die durch den globalen Wandel prognostizierte Temperaturerhöhung von 3 bis 5 °C hat zusammengefasst folgende Einflüsse auf die hydraulischen Parameter des Systems Boden/Sickerwasser (KLOTZ 2007 b):

1. Zunahme der Durchlässigkeit von ca. 9 bis 15 %, da sie umgekehrt proportional der kinematischen Zähigkeit des Sickerwassers ist.
2. Geringe Abnahme
 - des totalen und effektiven Wassergehaltes (für Feinsand von maximal 0,8 bzw. 0,5 %) sowie
 - der Saugspannung (für Feinsand von maximal 5 %).
3. Zunahme der Dispersivität (für Feinsand um ca. 3 bis 5 %).

D. h. bei einer Temperaturerhöhung werden die Sickerwassergeschwindigkeiten in Böden anwachsen (wegen 1. und 2.) und Schadstoffe werden beim Transport breiter in Strömungsrichtung verschmiert (wegen 3.).

Sickerwassermengen aus den Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss einer kontinuierlichen Temperaturerhöhung um 3 °C

Die Untersuchungen fanden über neun Jahre (1997 – 2005) in je vier verschiedenen Böden (Tabelle 2) statt:

- Versuchsabschnitt A (01/1997 – 05/2001): alle (16) Lysimeter nicht beheizt.
- Versuchsabschnitt B (06/2001 – 12/2004): je zwei Lysimeter pro Boden durch aufgelegte Heizspiralen beheizt

Tabelle 2: Sickerwassermengen [mm] von 2 x 2 Lysimetern von vier verschiedenen bayerischen Böden ohne (-) und mit (+) aufgelegten Heizspiralen ($\Delta T = + 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

| Standort ↓/ Zeitraum → | 01/1997 – 05/2001 | | 06/2001 – 12/2005 | |
|--|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Heizung → | - | - | - | + |
| Niederschlagsmenge N [mm] | 3954 | | 4305 | |
| SCHEYERN (Schluffboden) | 1578 0,40 · N | 1548 0,39 · N | 1192 0,28 · N | 1250 0,29 · N |
| KELHEIM (Sandboden) | 1526 0,39 · N | 1690 0,43 · N | 1957 0,45 · N | 1502 0,35 · N |
| HOHENWART (kiesiger Sandboden) | 1756 0,44 · N | 1725 0,44 · N | 1835 0,43 · N | 1249 0,29 · N |
| FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden) | 1751 0,44 · N | 1740 0,44 · N | 1863 0,43 · N | 1793 0,42 · N |

Tabelle 3: Niederschlagsmengen [mm] und Sickerwassermengen [mm] unter vier Böden für die Jahre 2003 und 2004 im Vergleich zum mehrjährigen Mittel 1996 – 2002.

| Standort ↓/ Zeitraum → | 1996 - 2002 | 2003 | 2004 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| Niederschlag N | 957 | 617 | 852 |
| SCHEYERN (Schluffboden) | 367 0,38 · N | 97 0,16 · N | 112 0,13 · N |
| KELHEIM (Sandboden) | 448 0,47 · N | 178 0,29 · N | 400 0,47 · N |
| HOHENWART (kiesiger Sandboden) | 404 0,42 · N | 189 0,91 · N | 319 0,37 · N |
| FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden) | 427 0,45 · N | 234 0,38 · N | 332 0,39 · N |

($\Delta T = + 3 \text{ }^\circ\text{C}$), die restlichen („Normal“-)Lysimeter laufen unter natürlichen Temperaturen (mit aufgelegten Heizspiralen-Attrappen).

Zusammengefasst folgt (KLOTZ 2007 b):

1. Im Normalbetrieb (Versuchsabschnitt A) über ca. 4 ½ Jahre sind die Sickerwassermengen der vier Lysimeter jeden Standortes im Rahmen der Messgenauigkeit gleich (Tabelle 2).
2. Die Sickerwassermengen für den Versuchsabschnitt B über ca. 4 ½ Jahre zeigen (Tabelle 2), dass bei einer Temperaturerhöhung von 3 °C nur messbar die Sickerwassermengen in den Böden mit durchlässigen (sandigen) Oberböden (Standorte KELHEIM und HOHENWART) abnehmen.

Sickerwassermengen aus den Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss des Extremjahres 2003

Für das Jahr 2003 mit einem Niederschlagsdefizit von ca. – 340 mm und einem um ca. + 3,7 °C wärmeren Sommer als das zehnjährige Mittel haben starken Einfluss auf die Sickerwassermengen („Grundwasserneubildung“ GWN) unter Böden (KLOTZ 2007 c):

1. Sie betragen 2003 nur ca. ¼ (Standort SCHEYERN) bis ca. ½ (Standort FELDKIRCHEN) des langjährigen Mittels (Tabelle 3).
2. Die GWN kam im meteorologischen Sommer 2003 fast zum Erliegen, der Wassergehalt der Böden nahm ab.
3. Ab Oktober 2003 (Starkniederschläge) wurden die Böden wieder aufgefüllt, der Schluffboden SCHEYERN war erst 2005 (GWN = 0,41 · N), die drei anderen Böden schon 2004 wieder aufgefüllt (Tabelle 3).

Wassergehaltsänderungen der Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss des Extremjahres 2003

Die Wassergehalte der Lysimeterböden wurden aus den stündlich registrierten Gesamtgewichten der Lysimeter berechnet (KLOTZ 2008). Als Folge der klimatischen Extrembedingungen des Jahres 2003 wird auch der Wassergehalt der Böden stark reduziert (Tabelle 4). Diese

Tabelle 4: Berechnete mittlere totale Wassergehalte der untersuchten vier Lysimeterböden.

| Jahr/Standort→ | SCHEYERN | KELHEIM | HOHENWART | FELDKIRCHEN |
|----------------|----------|---------|-----------|-------------|
| 2002 | 0,354 | 0,390 | 0,216 | 0,082 |
| 2003 | 0,273 | 0,345 | 0,189 | 0,066 |
| 2004 | 0,314 | 0,354 | 0,213 | 0,056 |
| 2005 | 0,313 | 0,355 | 0,213 | 0,062 |

Änderung wird nicht verursacht durch Entwässerung der Grobporen, sondern

- durch gesteigerte Verdunstung von den oberen Bodenhorizonten aus,
- durch zunehmenden Wasserbedarf der Pflanzendecke und
- durch Ausgleich der Wassergehalte der Bodenhorizonte durch Saugspannungsänderungen.

Ergebnisse der chemischen Untersuchungen des Sickerwassers

Stoffausträge aus Lysimeterböden der Messanordnung II – Einfluss einer Temperaturerhöhung um 3 °C

Beim Vergleich der Stoffkonzentrationen der zwei beheizten Lysimeter und der Konzentrationen der Normallysimeter der vier untersuchten Böden ist zu beachten,

- dass i. a. bei herrschenden Matrixflüssen in den Lysimetern mit Sickerwassergeschwindigkeiten im „Meter/Jahrbereich“ Änderungen der Stoffkonzentrationen verzögert und durch Vermischungsprozesse stark vermindert im Lysimeterauslauf registriert werden,
- dass aber bei einem gewissen Mindest-Wassergehalt der Böden (im Untersuchungszeitraum erfüllt für die Jahre 2001 und 2002) und stattfindenden Starkregenereignissen Bypassflüsse mit Sickerwassergeschwindigkeiten im

„Meter/Tag-Bereich“ auftreten, d. h. Änderungen der Stoffkonzentrationen im Lysimeterauslauf stark und fast sofort registriert werden.

In *Tabelle 5* sind die mittleren Stoffkonzentrationen c_B der beheizten und die Konzentrationen c_N der Normallysimeter (unter natürlichen Temperaturen) im Zeitraum 06/2001 bis 12/2004 gegenübergestellt. Für ca. 60 % der registrierten Stoffe ist dabei $c_B > c_N$.

Quelltermänderungen der in Messanordnung III eingebauten Altlasten – Einfluss des Extremjahres 2003

Die in die Kleinlysimeter anfangs dicht eingebauten Materialien kontaminierter Boden BO, Hausmüllverbrennungssasche MV und Bauschutt BS erfahren während der Versuchszeit 02/2001 - 11/2004 durch Lösungsprozesse Massenverluste ΔM

BO ($\Delta M = 6\%$) < MV ($\Delta M = 16\%$) < BS ($\Delta M = 38\%$) und ändern die sedimentphysikalischen Parameter Porosität, Korngröße und spezifische Oberfläche sowie auch die Mineralisation und den DOC-Gehalt des Sickerwassers.

Die **Hausmüllverbrennungssasche** ist mit Schwermetallen kontaminiert. **Cu** (*Abbildung 3*, links) wird für das klimatische Normaljahr 2002 in Näherung exponentiell ausgelaugt. Die ansteigenden Cu-Quellstärken für die Sommer- und Herbstmonate des Extremjahres 2003 und auch (abgeschwächt) für 2004 im Vergleich zu den Minimalwerten des Winters 2002/03 und 2003/04 sind bedingt (MERKEL & SPERLING 1998)

- durch die Zunahme der Cu-Löslichkeit und der -Mobilität mit steigender Temperatur,
- durch zunehmende Cu-Mobilisierung für pH > 6 durch lösliche Komplexbildner und
- durch huminstoffgetragenen Cu-Transport.

Der **Bauschutt** ist hauptsächlich mit **PAK's** kontaminiert (KLOTZ & SCHRAMM 2006). In der Betriebszeit des BS-Kleinlysimeters zeichnen sich vier PAK-Quellstärkebereiche ab (*Abbildung 3*, Mitte):

Tabelle 5: Im Untersuchungszeitraum 06/2001 – 12/2004 bestimmte Stoffkonzentrationen in [mg/l] (für Al in [µg/l]) der Sickerwässer für beheizte ($\Delta T = +3\text{ °C}$) Lysimeter (c_B) und für Lysimeter unter natürlichen Temperaturen (c_N).

| Konz. | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | DOC | Al |
|---|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------|------|
| Standort SCHEYERN (Schluffboden) | | | | | | | | | |
| c_B | 0,562 | 4,95 | 56,3 | 22,9 | 11,3 | 33,6 | 21,2 | 3,08 | 53,2 |
| c_N | 0,506 | 5,23 | 51,8 | 22,2 | 7,52 | 38,3 | 21,0 | 2,94 | 71,2 |
| Standort KELHEIM (Sandboden) | | | | | | | | | |
| c_B | 0,456 | 5,93 | 42,5 | 9,92 | 12,3 | 22,3 | 14,9 | 1,28 | 23,9 |
| c_N | 0,405 | 8,08 | 47,6 | 11,0 | 7,34 | 31,8 | 20,8 | 1,51 | 16,7 |
| Standort HOHENWART (kiesiger Sandboden) | | | | | | | | | |
| c_B | 0,418 | 6,99 | 41,0 | 7,14 | 16,0 | 104 | 21,0 | 1,47 | 13,2 |
| c_N | 0,427 | 9,49 | 24,1 | 3,63 | 12,6 | 31,9 | 13,0 | 1,15 | 7,60 |
| Standort FELDKIRCHEN (sandiger Kiesboden) | | | | | | | | | |
| c_B | 0,478 | 1,67 | 59,2 | 13,1 | 1,51 | 93,4 | 12,1 | 2,17 | 8,06 |
| c_N | 0,636 | 1,85 | 52,7 | 11,8 | 1,49 | 63,7 | 9,88 | 2,08 | 10,2 |

1. Anlaufphase (Frühjahr 2002), bedingt durch starke Masenauslaugung der BS-Matrix und starke Mineralisation des Sickerwassers. Folge: geringe PAK-Quellstärken (ca. 2,4 µg/l).
2. Ca. „konstante“ PAK-Auslaugung (Sommer 2002 bis Winter 2002/03): gewichtete PAK-Quellstärke 19 µg/l.
3. Reduzierung der PAK-Auslaugung für das Extremjahr 2003: gewichtete PAK-Quellstärke ca. 9 µg/l.
4. Näherungsweise exponentieller Abfall der Quellstärke für das Normaljahr 2004, gewichtete PAK-Quellstärke ca. 24 µg/l.

Der **kont. Boden** ist mit **MKW's** kontaminiert (KLOTZ & SCHRAMM 2006). In der Betriebszeit des BO-Kleinsystems sind drei MKW-Quellstärkebereiche erkennbar (*Abbildung 3*, rechts):

1. Ca. „konstante“ MKW-Auslaugung 2002 mit gewichteter MKW-Quellstärke 615 ng/l.

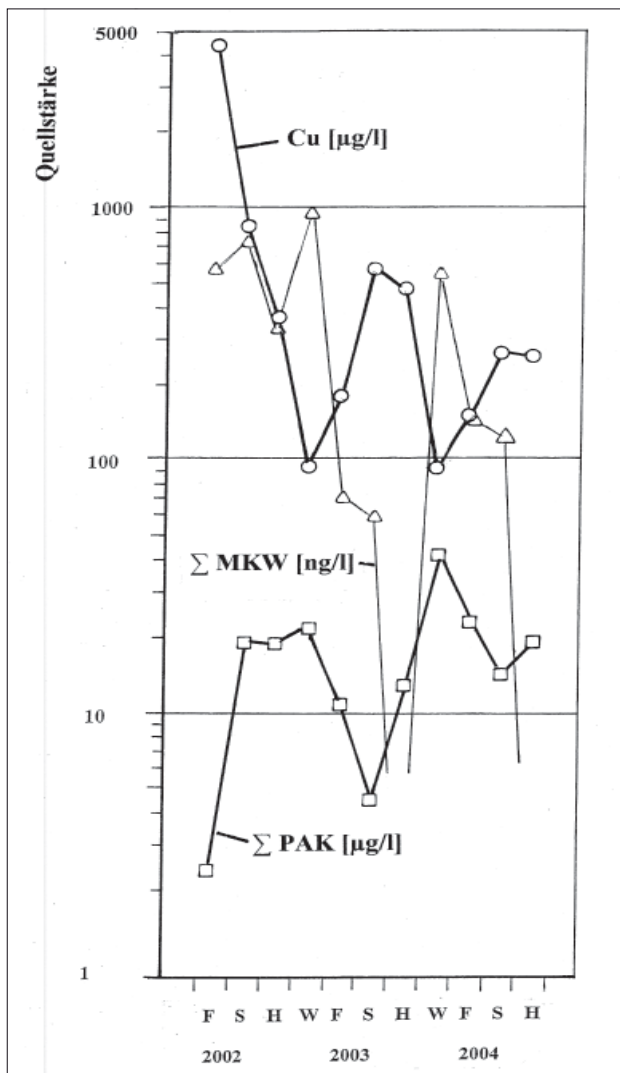


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Cu- (Messpunkte: ○), der PAK- (□) und der MKW-Quellstärke (△) aus den Altlastensystemen MV, BS bzw. BO während der Betriebszeit 02/2002 bis 11/2004.

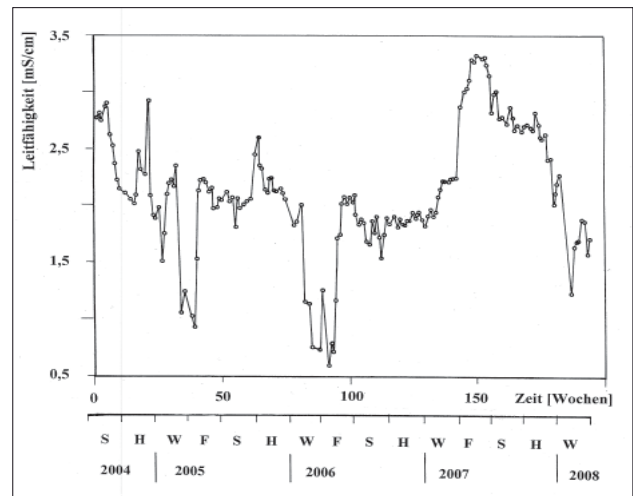


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Leitfähigkeit des Sickerwassers des Kompostlysimeters Freimann.

2. Minimale bzw. nicht nachweisbare Auslaugung für das Extremjahr 2003: gewichtete MKW-Quellstärke 37 ng/l.
3. Exponentieller Abfall der MKW-Quellstärke für das Normaljahr 2004 (gewichtete MKW-Quellstärke 200 ng/l).

Leitfähigkeitsänderungen des Sickerwassers des Kompostlysimeters (Messanordnung IV) – Einfluss der warmen Winter 2006/07 und 2007/08

Der Abbau der zu kompostierenden, organischen Abfallmaterialien fand hauptsächlich in den Sommerhalbjahren statt und war verbunden mit einem starken Einsacken der Lysimeterbefüllung. Für die Winter 2004/05 und 2005/06 mit etwas tieferen Temperaturen als das langjährige Mittel (*Abbildung 2*) werden Minimas der Mineralisation des Sickerwassers registriert (*Abbildung 4*). Für die Winter 2006/07 und 2007/08, die ca. 4 °C bzw. ca. 2,5 °C wärmer als das mehrjährige Mittel waren, sind diese Leitfähigkeitseinbrüche nicht vorhanden, d. h. die zu kompostierenden Materialien werden stärker als in Normal-Wintern abgebaut.

Literatur

- HANSEN, J.E., 2005: Lässt sich die Klimazeitbombe entschärfen? – Spektrum der Wissenschaft, 50-58.
- KLOTZ, D., 1992: Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoff-Migration. – GSF-Bericht 07/91, 118 S.
- KLOTZ, D., 2006: Eingesetzte Messanordnungen zur Sickerwasserprognose – Säulen und Lysimeter. – In: Untersuchungen in Laboranordnungen und Freilandlysimetern zur Sickerwasserprognose (Hrsg.: D. Klotz), GSF-Bericht 01/06, 6-17.
- KLOTZ, D., 2007 a: Untersuchungen an einem einfachen Kompost-Lysimeter. – In: Lysimeter im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken, Berichte der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Gumpenstein/Österreich, 155-157.
- KLOTZ, D., 2007 b: Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf die Sickerwasserparameter von Böden. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 51, 170-180.
- KLOTZ, D., 2007 c: Einfluss des Trockenjahres 2003 auf die Grundwasserneubildung unter Böden. – Wasserwirtschaft, 12/07, 25-29.

- KLOTZ, D., 2008: Auswirkungen des Extremjahres 2003 auf den Wassergehalt von Böden. – *WasserWirtschaft*, 05/08, 16-20.
- KLOTZ, D. und K.P. SEILER, 1998: Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg. – *GSF-Bericht* 23/98, 56 S.
- KLOTZ, D. und K.W. SCHRAMM, 2006: Sickerwasserergebnisse der GSF-Kleinlysimeter. – In: *Untersuchungen in Laboranordnungen und Freilandlysimetern zur Sickerwasserprognose* (Hrsg.: D. Klotz), *GSF-Bericht* 01/06, 92-130.
- KOHL, H. und H. KÜHR, 2004: Klimawandel auf der Erde – die planetare Krankheit. – *Spektrum der Wissenschaft*, 32-39.
- MERKEL, B. und B. SPERLING, 1996: Hydrogeochemische Stoffsysteme – Teil 1. – *Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.*, Heft 110, 288 S.
- UNOLD, G., 2005: *UMS-measure to know: Boden, Wasser, Pflanze, Klima*. – UMS GmbH, München, 63 S.