

Charakterisierung des mikrobiellen Abbaus organischer Flugzeugenteisungsmittel und dessen Einfluss auf das natürliche Redoxsystem im Boden mittels Kleinlysimeter

Heidi Lißner^{1*}, Markus Wehrer¹ und Kai Uwe Totsche¹

Zusammenfassung

Um Abbau und Transport von Flugzeug-Enteisungs-/Vereisungsschutz-Mittel (EM) im Boden zu charakterisieren, wurden auf dem Flughafen Gardermoen in Norwegen acht ungestörte Bodenmonolithe entnommen und als nicht-wägbare Kleinlysimeter auf einem nahegelegenen Testfeld installiert. Im Frühjahr 2010 und 2011 erfolgte die Applikation einer Mischung aus Schnee, dem EM Propylenglycol (PG) und Formiat, sowie Bromid. In beiden Jahren wiesen die Lysimeter eine starke Variabilität der Sickerwasserraten sowie des Durchbruchverhaltens der EM und Bromid auf. Hohe Infiltrationsraten während der Schneeschmelze hatten den Austrag von bis zu 51 % PG im Jahr 2010 und 81 % PG im Jahr 2011 zur Folge. Während im Frühjahr PG kaum mikrobiellem Abbau unterlag, reduzierte der wesentlich schnellere Abbau von Formiat bereits wenige Tage nach Infiltration erheblich dessen Stoffverlagerung. Einhergehend sank das Redoxpotential im Boden temporär auf 130 mV. Der effiziente Abbau von PG im Sommer führte zu einer Mobilisierung von Mangan und Eisen im Sickerwasser. Redoximorphe Merkmale der Bodenmatrix spiegeln dabei nicht nur Bereiche der An- und Abreicherung von Oxiden, sondern auch das Vorhandensein präferenzialer Fließwege wieder.

Schlagwörter: Propylenglycol, Kaliumformiat, Abbau, Reduktion, Mangan- und Eisenoxide

Summary

To study the transport and degradation of deicing chemicals (DIC) in the unsaturated zone, eight undisturbed soil cores were retrieved at the Gardermoen Airport, Norway, and installed as non-weighable small scale lysimeters at a nearby field site. Before snowmelt in 2010 and 2011, a mix of snow containing propylene glycol (PG), formate, and bromide were added to the lysimeters. Water and solute transport varied considerably, not only among the lysimeters within one year but also between 2010 and 2011. During snowmelt, high infiltration rates caused the discharge of up to 51 % and 82 % PG in 2010 and 2011, respectively. Compared to PG, hardly any formate was leached out of the lysimeters during spring, indicating its fast degradation. The soil redox potential temporary dropped down to 130 mV. The efficient degradation of residual PG during summer resulted in the mobilization of manganese- and iron into the seepage water. Redoximorphic features of the soil matrix thereby not only reflect the depletion and concentration of oxides but also preferential flow pathways.

Keywords: Propylene glycol, potassium formate, degradation, reduction, manganese- and iron oxides

Einleitung

Die Gewährleistung eines sicheren Flugbetriebes im Winter erfordert den Einsatz erheblicher Mengen organischer EM. Auf dem Flughafen Gardermoen in Norwegen werden hierfür pro Saison 1000-2000 Tonnen PG (1,2-Propandiol) und ca. 200 Tonnen Formiat auf Flugzeuge und Rollbahnen appliziert. Auch wenn 80 % der EM über spezielle Enteisungsplattformen und Drainagesysteme aufgefangen und recycelt werden, akkumulieren sich bis zu 20 % der EM in unmittelbarer Umgebung der Rollbahnen und infiltrieren mit einsetzender Schneeschmelze im Frühjahr in den Boden (WEJDEN und OVSTEDAL 2006). Enteisungsmittel sind prinzipiell sehr gut und schnell durch eine Vielzahl von Bakterien und Pilzen abbaubar und sollten sich daher nicht in der Umwelt anreichern. Ihr Gefahrenpotential bedingt sich

durch ihren hohen biologischen Sauerstoffbedarf während des mikrobiellen Abbaus. Nach Infiltration der EM in den Boden wird verfügbarer Sauerstoff im Sickerwasser somit unmittelbar für den aeroben Abbau der EM verbraucht. Im Anschluss wird der überwiegende Teil der verbleibenden EM anaerob durch Reduktion von Nitrat, Mangan- und Eisenoxiden metabolisiert (WILLETTS 1979, VELTMAN et al. 1998). In Feld- und Laborstudien konnte dabei eine Freisetzung reduzierten Mangans (Mn) und Eisens (Fe) nachgewiesen werden (FRENCH et al. 2001, JAESCHE et al. 2001, WEJDEN und OVSTEDAL 2006). Die Aufenthaltszeit organischer Substanzen im mikrobiologisch aktiven Oberboden ist für die Abbaueffizienz dieser Stoffe von entscheidender Bedeutung. Während in Labor- und Feldstudien der rasante Abbau von Formiat selbst bei geringen Temperaturen nachgewiesen werden konnte (HELLSTEN

¹ Lehrstuhl für Hydrogeologie, Institut für Geowissenschaften, Burgweg 11, D-07749 JENA

* Ansprechpartner: Heidi Lißner, heidi.lissner@uni-jena.de



et al. 2005, HELLSTEN und NYSTEN 2003), ist der Abbau von PG maßgebend von der Temperatur abhängig. Temperaturen um den Gefrierpunkt, aber auch Bodensättigung, Lufteinschlüsse und partieller Bodenfrost können daher die Ausprägung präferenzierter Fließwege und die schnelle Tiefenverlagerung von PG begünstigen (KLECKA et al. 1993, JAESCHE et al. 2006, JARVIS 2007, CLOTHIER et al. 2008). Dass erhöhte Infiltrationsraten während der Schneeschmelze als auch präferenzierter Fluss den Austrag von PG erhöhen, wurde von SCHOTANUS et al. (2012) mit Hilfe eines Multicompartment Samplers gezeigt.

Der vorliegende Beitrag stellt Ergebnisse eines 2,5-jährigen Lysimeterexperimentes vor, dessen Fokus auf der Erfassung der räumlichen Variabilität des Stofftransports als auch dem Verständnis einhergehender Abbauprozesse lag. Da es sich bei dem Eintrag von EM in den Boden um eine langfristige, sich jährlich wiederholende Maßnahme handelt, sollte zudem das Gefahrenpotential für das natürliche Redoxsystem und das Grundwasser abgeschätzt werden.

Material und Methoden

Lysimeter Set-Up und experimentelle Durchführung

Die Feldstudie wurde direkt neben dem Gelände des Flughafens Oslo-Gardermoen durchgeführt, welcher sich 50 km nordöstlich von Oslo befindet. Der Flughafen wurde im Gardermoen-Delta erbaut und befindet sich auf Norwegens größtem ungespanntem Grundwasserleiter. Glazio-fluviatile Ablagerungen bilden die ungesättigte Zone, welche im Westen des Deltas zwischen 5 bis 10 m und im Osten zwischen 10 bis 25 m variiert. Die oberen 3 m bestehen überwiegend aus Schichten von Schluff-, Fein- und Mittelsand. Darunter werden die Sedimente wesentlich grobkörniger und weisen hohe Anteile Kies und Grobsand auf.

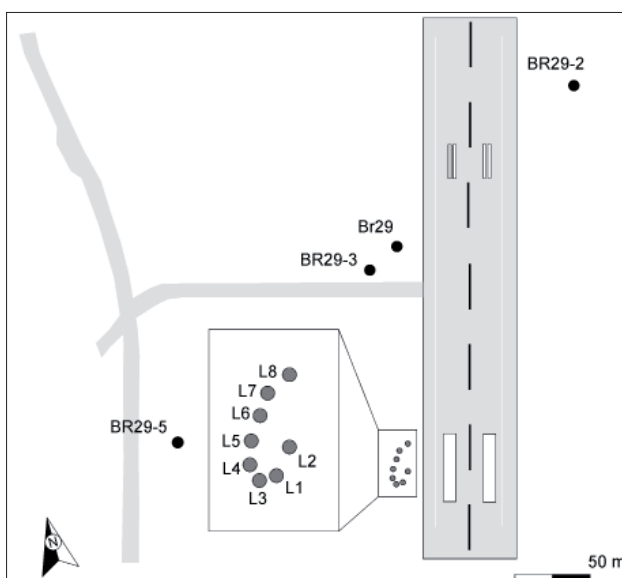


Abbildung 1: Schematische Darstellung der westlich gelegenen Rollbahn des Gardermoen Flughafens mit Entnahmepunkte der Lysimeter und ausgewählten Grundwassermessstellen.

Tabelle 1: Übersicht der Mengen Schnee, PG, Formiat, Bromid und Nitrat, die im Jahr 2010 und 2011 pro Lysimeter (0,0707 m²) appliziert wurden.

Zugabe	Lysimeter	Schnee mm	PG gm ⁻²	Formiat gm ⁻²	Bromid gm ⁻²	Nitrat gm ⁻²
23.03.2010	L1-L8	71	350	70	17	-
01.04.2011	L4,L7,L8	113	350	70	17	80
01.04.2011	L1,L5,L6	113	350	70	17	-
01.04.2011	L3	113	-	-	17	-
01.04.2011	L2	113	-	-	-	-

Für das Lysimeterexperiment wurden neben der westlich gelegenen Rollbahn des Flughafens acht Bodenmonolithe (30 x 100 cm) entnommen und auf einem nahe gelegenen Testfeld als nicht-wägbare Kleinlysimeter (UMS) installiert (L1-L8) (s. Abbildung 1). Alle Lysimeter wurden mit Sonden für Wassergehaltmessung (EC5, Decagon) in 20, 50 und 80 cm ausgestattet. Zudem wurden in zwei Lysimetern Elektroden für die Messung des Redoxpotentials (Methode nach Mansfeldt, Ecotech) in 30, 60 und 90 cm Tiefe eingebaut. Die Messung der Bodentemperatur (Th2, UMS) erfolgte ebenfalls in 30, 60 und 90 cm. Über eine Saugplatte wurde mittels Vakuumkontrollstation (VS single, UMS) ein Unterdruck von 40-60 hPa angelegt und das Sickerwasser in Glas-Sammelflaschen aufgefangen. Im Jahr 2011 wurden zusätzlich vor den Sammelflaschen von vier Lysimetern jeweils zwei Durchflussmesszellen angebracht, um während der Schneeschmelze Sauerstoffgehalt und Redoxpotential (FDO[®] 925 und SenTix[®] ORP 900, WTW) des Sickerwassers zu erfassen. Die Messdaten wurden on-line mit einem MultiLine[®]IDS Multi 3420 von WTW aufgezeichnet.

Die Applikation der EM erfolgte vor Beginn der Schneeschmelze im Jahr 2010 und 2011. Hierfür wurde auf das von Schnee befreite Lysimeter ein KG-Rohr aufgesetzt und den Lysimetern über das Rohr eine definierte Menge Schnee, PG (Type II, Kilfrost), Formiat (KFo, Aviform) und Bromid als konservativer Tracer (s. Tabelle 1) zugegeben. Im Jahr 2011 wurden drei Lysimeter zum Testen einer Sanierungsstrategie genutzt, indem ihnen zusätzlich Nitrat (NH₄NO₃) als alternativer Elektronenakzeptor beigefügt wurde. Lysimeter 2 und 3 dienten 2011 als Kontrolllysimeter. Während der Schneeschmelze erfolgte die Probenahme täglich und im restlichen Jahr nach Bedarf in Abhängigkeit der natürlichen klimatischen Bedingungen.

Nach Erfassung des Probenvolumens wurde vor Ort der pH-Wert bestimmt (SenTix41, WTW GmbH). Proben für die spätere Analyse von PG (Trace GC Ultra, Thermo Scientific) und der Anionen (IC 20, Dionex) wurden gefiltert (0,45 µm, Acrodisc[®], Pall) und tiefgefroren, um den Abbau der EM als auch der Metabolite (Laktat, Pyruvat, Acetat und Propionat) zu verhindern. Gesamtgehalte an Fe und Mn wurden in angesäuerten Proben (HNO₃, ultrapure) mittels ICP-MS (Spectroflame, Spectro) analysiert.

Für die Bodencharakterisierung der Lysimeter wurden parallel zur Entnahme der Bodenmonolithe auf dem Flugfeld sieben ungestörte Bohrkerne (5 x 100 cm) entnommen. An ihnen wurde repräsentativ für die acht Lysimeter eine Bodenansprache durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine horizontbezogene Probenahme für die physico-chemische

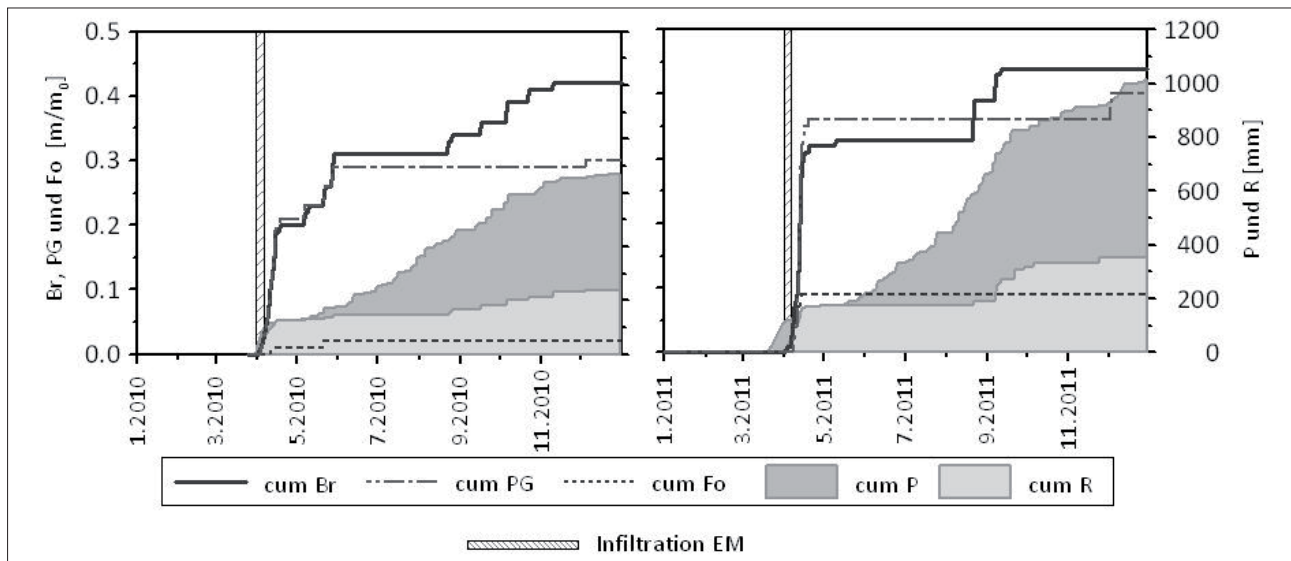


Abbildung 2: Gegenüberstellung der gemittelten, kumulativ ausgetragenen Mengen Sickerwasser (R), Bromid (Br), PG und Formiat (Fo) sowie des Niederschlags (P) in den Jahren 2010 und 2011.

Charakterisierung des Bodens. Diese beinhaltete u.a. die Bestimmung von: Korngröße, pH-Wert, organischem Kohlenstoff, dithionitlöslichem Fe, oxalatlöslichem Fe und Mn, sowie Gesamteisen- und Mn.

Ergebnisse

Bodencharakterisierung

Die Bodenprofile der sieben Bohrerkerne zeigen eine Ah-Bv-C Horizontfolge, wobei die Mächtigkeit der Horizonte variiert und der mineralische Untergrundhorizont charakteristische redoximorphe Merkmale aufweist. Eine Ausnahme stellt L2 dar, welches unmittelbar neben einem ehemals befestigten Weg entnommen wurde und dessen Horizontfolge strukturelle Eigenschaften eines Aufschüttungsmaterials besitzt. Die Korngrößenverteilung zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bodenprofilen der Lysimeter. Während im oberen und mittleren Teil des Profils Fein- und Mittelsand dominieren, steigt der Anteil an Schluff mit zunehmender Tiefe. Den größten Anteil an Schluff hat dabei mit 70 % L6 in 70 bis 100 cm Tiefe. Lysimeter 4 hingegen besitzt in 30 cm bis 100 cm eine konsistente Kornverteilung mit geringen Schluff- (< 10 %) und hohen Mittelsandanteilen (~ 50 %). Der Oberboden (0-10 cm) hat erwartungsgemäß den höchsten Anteil organischer Substanz mit $54,7 \pm 45,7 \text{ mg g}^{-1}$. Darunter sank der Anteil von $5,7 \pm 2,2 \text{ mg g}^{-1}$ (10-40 cm) auf $2,9 \pm 2,8 \text{ mg g}^{-1}$ (70-100 cm). Der Gesamteisengehalt variiert zwischen $19,7 \pm 3,5 \text{ mg g}^{-1}$ (40-70 cm) und $28,7 \pm 5,7 \text{ mg g}^{-1}$ (0-10 cm). Oxalat- und dithionitlösliches Fe machen einen wesentlich geringeren Anteil mit durchschnittlich $3,1 \pm 0,2 \text{ mg g}^{-1}$ und $5,1 \pm 1,0 \text{ mg g}^{-1}$ aus. Die Konzentration von dithionitlöslichem Mn im Boden beträgt lediglich $0,08 \pm 0,04 \text{ mg g}^{-1}$.

Stofftransport

Abbildung 2 zeigt, dass hohe Infiltrationsraten während der Schneeschmelze im April mit einem hohen Sickerwasser-

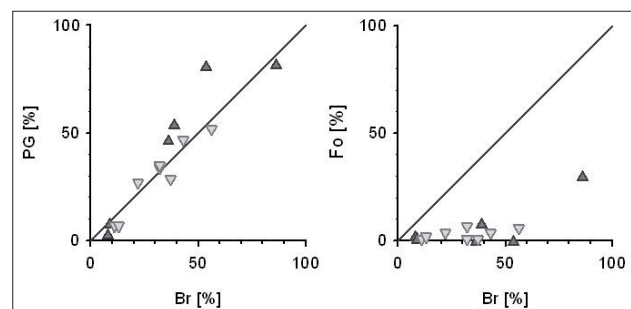


Abbildung 3: Beziehung zwischen den Wiederfindungsraten von PG und Bromid bis Ende Mai im Jahr 2010 (helle Dreiecke) und 2011 (dunkle Dreiecke).

und Stoffaustrag einhergingen. Der Austrag von PG und Bromid erfolgte in diesem Zeitraum im Gegensatz zu Formiat und Bromid weitestgehend simultan (s. *Abbildung 3*), so dass ähnliche Wiederfindungsraten beider Stoffe erzielt wurden. Nach ausbleibendem Sickerwasser in den Sommermonaten, konnte im Spätsommer erneut eine Beprobung des Sickerwassers durchgeführt werden. Dabei ist auffallend, dass weiterhin Bromid, jedoch keine EM im Sickerwasser enthalten waren.

Im Frühjahr 2011 fiel die Infiltrationsmenge mit insgesamt 211 mm höher aus als im Jahr 2010 mit nur 174 mm. Dies spiegelte sich auch in der durchschnittlichen Sickerwassermenge wider, die mit 174 mm in 2011 über der von 2010 mit 150 mm lag. Große Niederschlagsmengen im Spätsommer und Herbst 2011 erhöhten den Sickerwasseraustrag auf 352 mm gegenüber nur 217 mm in 2010. Dementsprechend waren auch die Stoffausträge, speziell der vier Lysimeter L1, L4, L5 und L8, im Jahr 2011 gegenüber 2010 erhöht. *Abbildung 4* verdeutlicht die Unterschiede im Stoffaustrag zwischen beiden Jahren und zwischen den Lysimetern. Die Austräge variierten stark. Am geringsten waren die Wiederfindungsraten in L2 (2010: 22 % Bromid und 26 % PG) und L6 (2010: 12 % PG und 6 % Bromid, 2011: 8 %

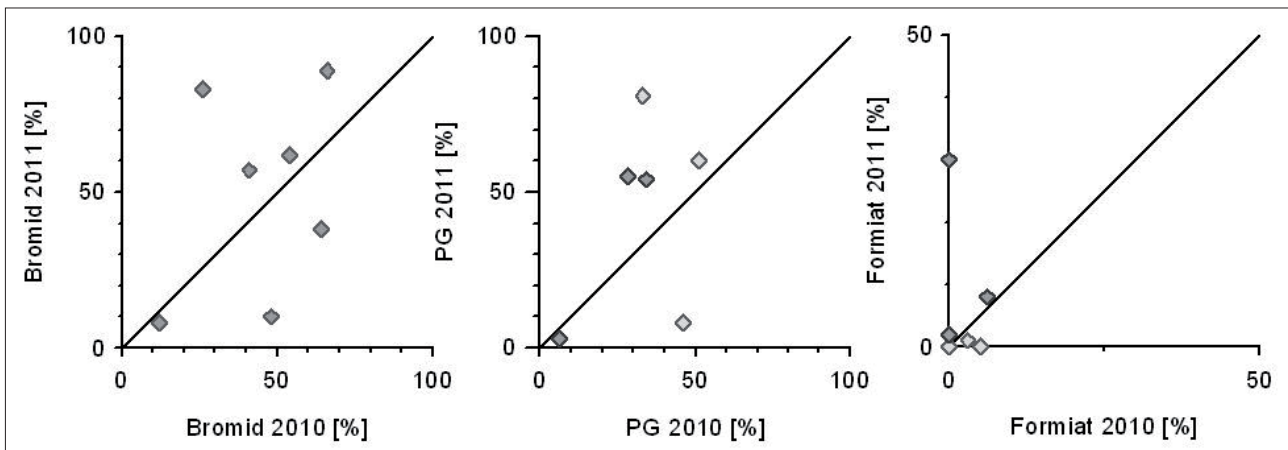


Abbildung 4: Vergleich der wiedergefundenen Stoffmengen Bromid, PG und Formiat im Jahr 2010 und 2011. Helle Diamanten verweisen auf Lysimeter mit Nitratzugabe.

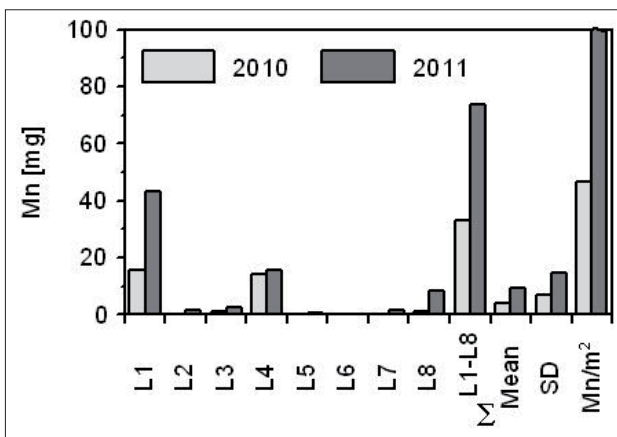


Abbildung 5: Austrag Mangan (Mn) mit Sickerwasser der Lysimeter im Jahr 2010 und 2011.

Bromid und 3 % PG). Obwohl drei Lysimetern Nitrat zur Steigerung der Abbaueffizienz zugefügt wurde, konnte im Jahr 2011 nur in L7 ein geringerer Austrag von PG beobachtet werden. Im Gegensatz zu Bromid und PG war der Austrag von Formiat in beiden Jahren vergleichsweise gering. Ein erhöhter Austrag mit 30 % wurde nur in L5 im Jahr 2011 gemessen.

Hydrochemie

Während des 2,5-jährigen Monitorings konnten starke Veränderungen der Hydrochemie beobachtet werden. Der pH-Wert unterlag nicht nur saisonalen Schwankungen, sondern zeigte langfristig auch einen ansteigenden Trend. Während der pH-Wert vor Zugabe der EM im Jahr 2010 noch im schwach sauren Bereich lag ($\text{pH} < 7$), stieg er im Frühjahr und Herbst temporär auf schwach alkalische Werte an und erreichte im Herbst 2011 Spitzenwerte > 8 . Ein erster signifikanter Anstieg der Mangankonzentrationen im Sickerwasser wurde mit $6,5 \text{ mg L}^{-1}$ im Herbst 2010 gemessen. Im Folgejahr kam es bereits im Frühjahr zu erhöhten Austrägen, was sich auch im gestiegenen Gesamtaustrag von Mn im Jahr 2011 widerspiegelt (s. *Abbildung 6*). Die Eisengehalte lagen bis Ende 2011 zumeist unter dem De-

tektionslimit von $0,008 \text{ mg L}^{-1}$. Beachtliche Mengen $\text{Fe} > 20 \text{ mg L}^{-1}$ wurden erst im Frühjahr 2012 im Sickerwasser von L7 analysiert.

Die Zugabe der EM führte zu einer Absenkung des Redoxpotentials im Boden während der Schneeschmelze (s. *Abbildung 7*). Wegen technischer Probleme fehlen Daten bis Mitte Mai 2010. Dennoch ist ein Wiederanstieg des Redoxpotentials ersichtlich. Im Frühjahr 2011 sank das Redoxpotential in 30 cm auf 130 mV, erholte sich in den Sommermonaten aufgrund besserer Belüftung des Bodens, und sank erneut mit infiltrierendem Regenwasser und ansteigendem Bodenwassergehalt im Herbst auf 320 mV in 30 cm und 200 mV in 90 cm ab. In den Durchflussmesszellen konnte kein wesentlicher Effekt des Abbaus der EM auf das Redoxpotential im Sickerwasser nachgewiesen werden. Jedoch kam es mit dem Durchbruch der EM zu einer messbaren Sauerstoffzehrung. Während im Sickerwasser von L4 und L8 die minimale Sauerstoffsättigung bei ca. 30 % lag, stellte sich im Kontrolllysimeter 3 ein konstanter Wert von 90 % Sauerstoffsättigung ein.

Die im Sickerwasser analysierten Metabolite des PG Abbaus sind exemplarisch anhand L8 (2010) in *Abbildung 5* dargestellt. Die gemessenen Konzentrationen waren im Vergleich zu PG ($> 2000 \text{ mg L}^{-1}$) mit $< 40 \text{ mg L}^{-1}$ sehr gering. Auffällig ist das sequenzielle Auftreten der Metabolite. Mit Infiltration des Sickerwassers im April erschien zunächst Laktat, gefolgt von Pyruvat, Propionat und Acetat. Laktat ist dabei erstes Abbauprodukt des aeroben Metabolismus gefolgt von Pyruvat, und Propionat das erste Abbauprodukt des anaeroben Metabolismus gefolgt von Acetat.

Diskussion

Transportheterogenität

Erhebliche Schwankungen in den Wiederfindungsraten der Stoffe weisen auf ein sehr heterogenes Transportregime hin. Der teilweise schnelle Austrag erheblicher Mengen Bromid und PG spricht für das Vorhandensein präferenzierter Fließwege, deren Ausprägung zwischen den Lysimetern variiert. V.a. in den Lysimetern 1, 3, 4, 5 und 8 scheint präferenzierter

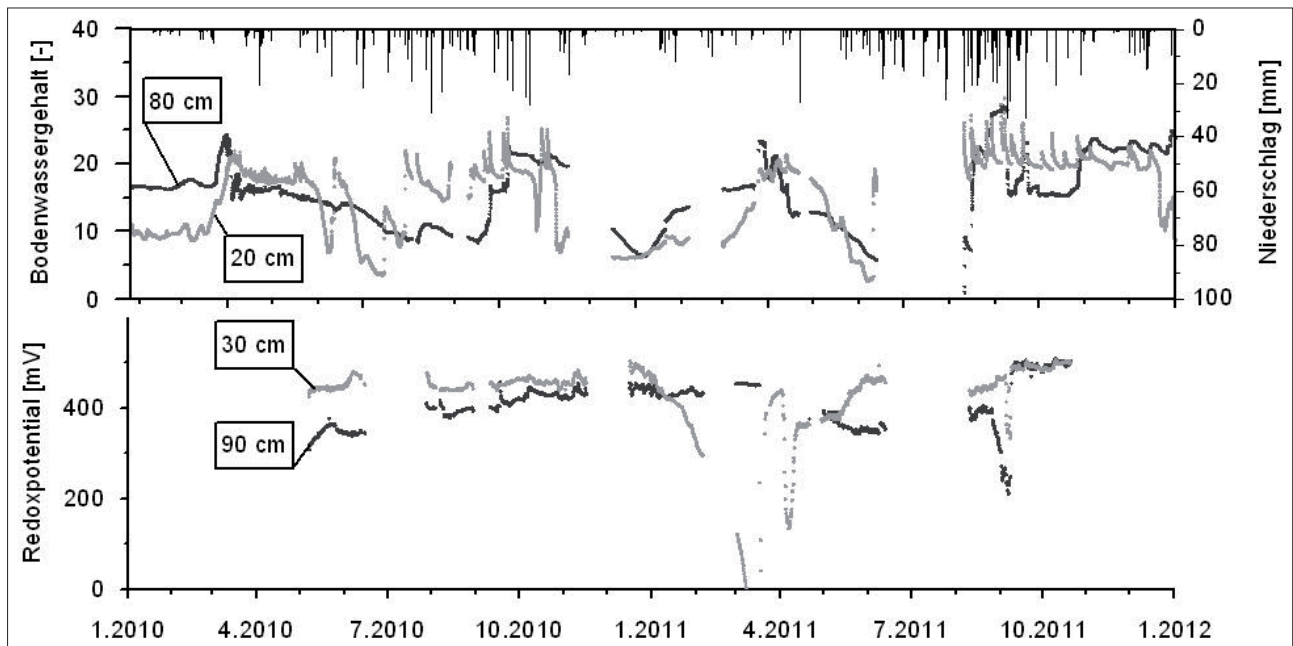


Abbildung 6: Zeitreihen des Bodenwassergehalts und Redoxpotentials in zwei Tiefen von Lysimeter 4. Gehalte für Niederschlag (P) stammen von der Klimastation Gardermoen, 2 km südlich des Testfelds.

Fluss einen wesentlichen Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit zu haben, da die höhere Infiltrationsrate in 2011 nicht nur einen höheren Stoffaustag sondern auch einen schnelleren und steileren Anstieg der Konzentrationen zur Folge hatte (Daten nicht dargestellt). Es ist anzunehmen, dass ein vergleichsweise geringer Wasser- und Stofftransport in L2 und L6 auf eine insgesamt niedrigere hydraulische Leitfähigkeit zurückzuführen ist. Bedingt, zum einen, durch die Ausprägung spezifischer Bodenstrukturen und zum anderen, durch die Mächtigkeit einzelner Horizonte und deren Korngrößenverteilung. So weist L2 die für ein Aufschüttungsmaterial typische Horizontierung auf und L6 besitzt in 70-100 cm Tiefe einen vergleichsweise sehr hohen Anteil an Schluff. Eine mögliche Ursache für die reduzierte hydraulische Leitfähigkeit in L7 im Jahr 2011 gegenüber 2010 und dem daraus resultierenden geringen Wasser- und Stofftransport stellt das Clogging des Porenraums mit frischen Eisenoxiden dar.

Einfluss der EM auf das natürliche Redoxsystem

Trotz kurzer Verweilzeit und geringen Bodentemperaturen wird Formiat unmittelbar nach Infiltration in den Boden effizient abgebaut und kaum in tiefere Bodenschichten verlagert. Im Gegensatz dazu weist der simultane Durchbruch von PG und Bromid auf einen eingeschränkten mikrobiellen Abbau von PG während der Schneeschmelze hin. Dies macht noch einmal die starke Temperaturabhängigkeit des PG-Abbaus deutlich, die zusammen mit hohen Infiltrationsraten die Verlagerung von PG in tiefere Bodenschichten verstärkt. Der aerobe Abbau der EM, im Besonderen Formiat, im Frühjahr und eine zunehmende Bodenwassersättigung führen zu einer Zehrung des im Sickerwasser enthaltenen Sauerstoffs. Folglich kommt es während des Durchbruchs

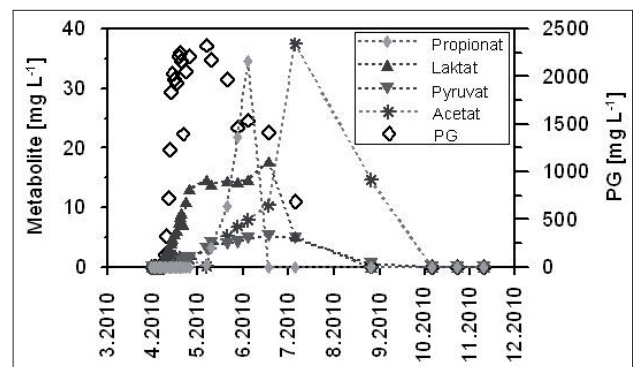


Abbildung 7: Konzentrationsverlauf von PG und dessen Metabolite im Sickerwasser von Lysimeter 8 (2010).

der EM im Boden zu einem kurzzeitigen Absinken des Redoxpotentials. Das gemessene Potential von nur 130 mV spricht dabei für eine komplette Sauerstoffzehrung und ein mangan- als auch eisenreduzierendes Milieu. Geringe Konzentrationen anaerober Abbauprodukte von PG (Propionat und Acetat) bestätigen diese Annahme. Da im Sickerwasser von L4 jedoch Sauerstoff detektiert wurde, scheint das Redoxpotential im Boden kleinräumigen Schwankungen zu unterliegen. Es ist wahrscheinlich, dass die längere Verweilzeit der Stoffe in Bereichen mit matrix-dominiertem Fluss das Redoxpotential stärker absinken lässt als entlang präferenzialer Fließwege. Mit nachlassenden Sickerwasserströmen gegen Ende des Frühjahrs bleibt ein Großteil des PGs in den oberen Bodenschichten zurück und wird während der Sommermonate vollständig abgebaut. Obwohl im Sommer aufgrund des geringen Bodenwassergehalts eine bessere Belüftung des Bodens gegeben ist, kommt es zur Reduktion von Mangan- und später auch Eisenoxiden. Dies weist auf den anaeroben Abbau von PG im immobilen Porenraum

und einen eingeschränkten Austausch mit atmosphärischem Sauerstoff hin. Entlang präferenzierter Fließwege kommt es zu einer Re-Oxidation speziell von Fe, was anhand der Ausprägung redoxmorpher Merkmale im Bodenprofil erkennbar ist. Unter extremen Bedingungen verstopft die Ausfällung von Oxiden vermutlich Teile des Porenraums und beeinflusst so die hydraulischen Eigenschaften des Bodens. Ein weiterer Teil des mobilisierten Mn als auch Fe wird mit einsetzender Infiltration im Spätsommer tiefenverlagert.

Seit Inbetriebnahme des Flughafens Gardermoen konnte bereits ein signifikanter Anstieg der Mn- und Fe Konzentrationen im Grundwasser beobachtet werden, was die Anfälligkeit des natürlichen Redoxsystems auf den kontinuierlichen Eintrag großer Mengen EM deutlich macht. Langfristig kann es zu einer Minderung der Abbaueffizienz und Veränderungen physico-chemischer Bodeneigenschaften kommen. Die Entwicklung effizienter Sanierungsstrategien ist daher unerlässlich.

Danksagung

The study was supported by the European Commission's 7th Framework Project SoilCAM (212663) on monitoring contaminated soil (www.soilcam.eu). Special thanks to Bioforsk (Norway) and the Gardermoen airport for their support during field work.

Literatur

- CLOTHIER, B.E., S.R. GREEN, et al., 2008: Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science* 59(1): 2-13.
- FRENCH, H.K., S. VAN DER ZEE, et al., 2001: Transport and degradation of propyleneglycol and potassium acetate in the unsaturated zone. *Journal of Contaminant Hydrology* 49(1-2): 23-48.
- HELLSTEN, P. and T. NYSTEN, 2003: Migration of alternative de-icers in unsaturated zone of aquifers - in vitro study. *Water Science and Technology* 48(9): 45-50.
- HELLSTEN, P.P., J.M. SALMINEN, et al., 2005: Use of potassium formate in road winter deicing can reduce groundwater deterioration. *Environmental Science & Technology* 39(13): 5095-5100.
- JAESCHE, P., K.U. TOTSCHKE, et al., 2006: Transport and anaerobic biodegradation of propylene glycol in gravel-rich soil materials. *Journal of Contaminant Hydrology* 85(3-4): 271-286.
- JARVIS, N.J., 2007: A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science* 58(3): 523-546.
- KLECKA, G.M., C.L. CARPENTER, et al., 1993: Biodegradation of Aircraft Deicing Fluids in Soil at Low Temperatures. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 25(3): 280-295.
- SCHOTANUS, D., M.J. VAN DER PLOEG, et al., 2012: Quantifying heterogeneous transport of a tracer and a degradable contaminant in the field, with snowmelt and irrigation. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(8): 2871-2882.
- VELTMAN, S., T. SCHOENBERG, et al., 1998: Alcohol and acid formation during the anaerobic decomposition of propylene glycol under methanogenic conditions. *Biodegradation* 9(2): 113-118.
- WEJDEN, B. and J. OVSTEDAL, 2006: Contamination and degradation of de-icing chemicals in the unsaturated and saturated zones at Oslo Airport, Gardermoen, Norway. *Urban Groundwater Management and Sustainability* 74: 205-218.
- Willetts, A., 1979: Bacterial metabolism of propane-1,1-Diol. *Biochimica Et Biophysica Acta* 588(3): 302-309.