

Bodenphysikalische Aspekte im Hinblick auf den Gewässerschutz

Andreas Klik^{1*} und Andreas Schwen¹

Einleitung

Böden stellen ein wichtiges Glied im globalen und regionalen Wasserkreislauf dar und erfüllen damit wichtige ökologische Funktionen. Hierzu zählen insbesondere die Funktionen als Puffer, Filter und Speicher für Wasser sowie Nähr- und Schadstoffe. Die Erhaltung oder Verbesserung der Qualität des Oberflächen- und Grundwassers hat eine zunehmende Priorität in unserer Gesellschaft und wurde seitens der Europäischen Union durch die EU Wasserrahmenrichtlinie manifestiert. Die Belastung von Gewässern entsteht durch ober- oder unterirdischen Eintrag von Nähr- oder Schadstoffen. Während einige Stoffe im Bodenwasser gelöst transportiert werden, werden andere Stoffe an Bodenpartikel oder andere Bodeninhaltsstoffe adsorbiert und können mit diesen verlagert werden. Die Art des Transportes hängt sowohl von den Eigenschaften des Stoffes als auch von den bodenhydraulischen Bedingungen ab. Hierbei sind der Porenanteil und die Porengrößenverteilung sowie die Tortuosität und Konnektivität des Porennetzwerkes, die damit verbundene Wasserleitfähigkeit, aber auch die Lagerungsdichte und Aggregatstabilität von großer Bedeutung.

Auftreten und Gründe für Bodenverdichtung

Die Verdichtung stellt eine der größten Gefahren für landwirtschaftlich oder forstwirtschaftlich genutzte Böden dar. Es kann von einer schadhafte Verdichtung gesprochen werden, wenn der Boden bestimmte ökologische Funktionen nicht mehr im notwendigen Umfang erfüllen kann. Prinzipiell entsteht die Verdichtung von Böden durch mechanische Auflast. Die Anfälligkeit eines Bodens für Verdichtung hängt neben der Textur (Korngrößenverteilung) und der Struktur (Gefüge und Aggregatstabilität) insbesondere vom Wasseranteil zum Zeitpunkt der mechanischen Belastung ab. Es lassen sich zwei grundsätzliche Ausprägungen auf land- und forstwirtschaftlich genutzte Böden beobachten: In der Forstwirtschaft führt die Befahrung von Wirtschaftswegen in den Wintermonaten zur Verdichtung unterhalb der Wege, was häufig an Lackenbildung zu erkennen ist. Die Befahrung im Zuge der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung führt oberflächennah ebenfalls zur lokalen Verdichtung unterhalb der Fahrspuren. Diese Form der Verdichtung ist besonders vom Wasseranteil abhängig und tritt in der Landwirtschaft besonders als Folge der Ernte von Zuckerrüben auf. Bei modernen selbstfahrenden Rübenvollerntern werden meistens sechs Reihen gleichzeitig geerntet. Das Leergewicht dieser Maschinen übersteigt 30 t. Mit einem Bunkervolumen von 40 m³ erreichen sie ein Gesamtgewicht von beinahe 60 t. Bereits bei „optimalen“ (d.h. niedrigen)

Bodenwassergehalten während der Ernte bedeutet der Einsatz dieser Geräte eine extreme Belastung für die Böden, bei ungünstigen d.h. hohen Bodenwassergehalten kommt es zu katastrophalen Folgen. Andererseits erzeugt die regelmäßige Bodenbearbeitung mittels Pflug unterhalb des aufgelockerten Bereiches eine Zone erhöhter Verdichtung, die als Pflugsohle bezeichnet wird.

Durch die Verdichtung kommt es zu einem schlechteren Gasaustausch zwischen dem Boden und der Atmosphäre und infolgedessen nimmt die biologische Aktivität im Boden stark ab. Nährstoffe werden schlechter fixiert oder nicht mehr pflanzenverfügbar umgesetzt, wodurch eine Nährstoffauswaschung verstärkt werden kann. Verdichtung von oberflächennahen Schichten führt zu einer Abnahme der Infiltrationsrate, zu einer Veränderung der hydraulischen Bedingungen und infolgedessen auch zu veränderten Abflussprozessen. In diesem Beitrag werden daher verschiedene bodenphysikalische Aspekte (Bodenverdichtung, Bodenbearbeitung) im Hinblick auf den Austrag von Nähr- und Schadstoffen in Grund- und Oberflächenwasser dargestellt.

Genaue Angaben über das Flächenausmaß verdichtungsgefährdeter Böden in Europa liegen nicht vor. Studien über die Anfälligkeit von Böden gegenüber Verdichtung geben an, dass etwa 36% der Unterböden in Europa stark bzw. sehr stark anfällig sind (JONES et al. 2003, VAN VAMP et al. 2003). CRESCIMANNO et al. (2004) weisen 32% der Böden als sehr gefährdet und 18% als mäßig gefährdet aus. Anderen Quellen ist zu entnehmen, dass 33 Mill. ha von Verdichtung betroffen sind, das entspricht etwa 4% der Fläche Europas (VAN OUWERKERK und SOANE 1995). Bisher konnten Schäden, welche infolge Bodenverdichtung entstehen, nicht quantifiziert und monetär bewertet werden. On-site Schäden umfassen vorwiegend landwirtschaftliche Ertragsverluste. Durch Verdichtung des Oberbodens können Ernteerträge bis zu 13% zurückgehen, wogegen durch Dichtlagerung des Unterbodens diese Rückgänge in extrem trockenen bzw. feuchten Jahren bis zu 35% ansteigen können (VAN CAMP et al. 2004). Off-site Schäden umfassen zum Beispiel eine reduzierte Infiltration von Regenwasser in den Boden. Damit ist ein geringerer Wasserrückhalt in der Landschaft und ein erhöhter Oberflächenabfluss verbunden, was die erosive Abschwemmung wertvollen Oberbodens und die Verschlammung der Bodenoberfläche zur Folge haben kann. Ein weiterer off-site Schaden ist eine erhöhte Emission von Treibhausgasen (insb. N₂O und Methan) infolge mangelhafter Bodendurchlüftung.

¹ Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: ao. Univ.Prof. DI Dr. Andreas Klik, andreas.klik@boku.ac.at



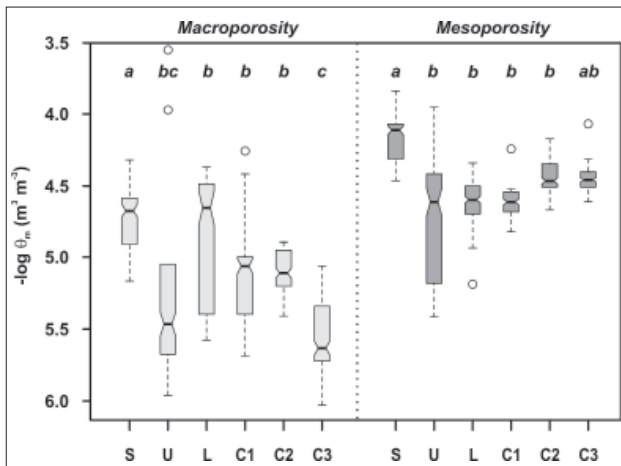


Abbildung 1: Anteile an hydraulisch effektiven Makro- und Mesoporen bei unterschiedlich starker Unterbodenverdichtung nach Schwen et al. (2011). Die untersuchten Varianten sind: S: unverdichteter Oberboden, U: Kontrollvariante (unverdichteter Unterboden), L: Tiefengelockerte Variante, C1-C3: Zunehmend starke Unterbodenverdichtung durch Befahrung mit einer Walze.

Auswirkungen der Verdichtung auf die Struktur der Bodenporen

Je nach Größe (Äquivalentdurchmesser) erfüllen Bodenporen verschiedene Aufgaben im Wasserkreislauf auf der Profil- und Einzugsgebietsskala. Große Poren (Makroporen) und sogenannte präferenzielle Fließwege gewährleisten die rasche Infiltration von Niederschlagswasser und dessen Tiefensickerung. Damit wird bei starken Niederschlagsereignissen eine hohe Infiltration ermöglicht und der ober-

flächige Abfluss bzw. die Bildung von Lacken minimiert. Makroporen und präferenzielle Fließwege haben einen Äquivalentdurchmesser > 1 mm und meist biologische und physikalische Ursachen: Sie entstehen durch Regenwurmgänge, abgestorbene Pflanzenwurzeln, aber auch durch Quellung und Schrumpfung in tonig-lehmigen Böden und durch Frostsprengung (Frost-/Tauzyklen). Grobporen sind nur nach intensiven Niederschlägen kurzzeitig mit Wasser gefüllt und dienen danach der Durchlüftung des Bodens und dem Gasaustausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre. Aus ökologischer Sicht stellen Makroporen und präferenzielle Fließwege aber auch eine Gefahr dar, da in ihnen gelöste Nähr- und Schadstoffe ohne Interaktion mit dem Boden (Retention oder Abbau) rasch in tiefere Bodenschichten (unterhalb des durchwurzelten Bereiches) bzw. in grundwasserführende Schichten gelangen können. Mittel- und Feinporen dienen der Speicherung des für die Pflanzenentwicklung nutzbaren Wassers sowie von Nährstoffen. Durch die Retention von Nähr- oder Schadstoffen erfüllen sie eine ökologisch bedeutsame Funktion. Neben der Größe und der Verteilung der Poren ist vor allem ihre Kontinuität und Tortuosität ausschlaggebend für Infiltrations- und Transportprozesse im Boden.

In einem Feldversuch auf einem Ackerstandort in der Ebene von Canterbury (Südinsel von Neuseeland) haben SCHWEN et al. (2011) die Auswirkungen unterschiedlich starker Unterbodenverdichtung auf das Porengefüge untersucht. Dazu wurde der Oberboden (0-0.20 m) entfernt und unterschiedliche Varianten einer homogen ausgeprägten Unterbodenverdichtung durch Auflockerung bzw. Befahrung mit einer Straßenwalze erzeugt. Aus Infiltrationsexperimenten mit Tensionsinfiltrometern konnte die Veränderung der hydraulisch wirksamen Poren abgeleitet werden. Die Studie zeigte, dass die zunehmende Verdichtung des Unterbodens

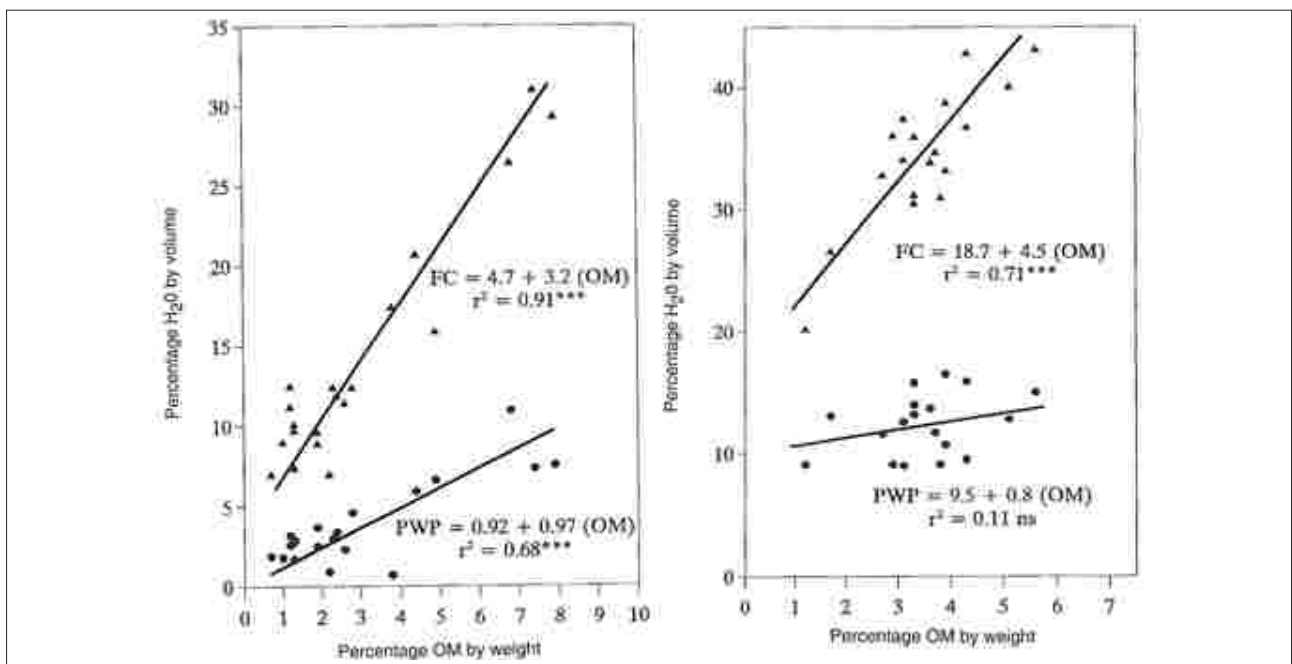


Abbildung 2: Einfluss von organischer Substanz auf Feldkapazität und Welkepunkt bei einem Sand (links) und einem schluffigen Lehm (rechts) (aus: Hudson, 1994).

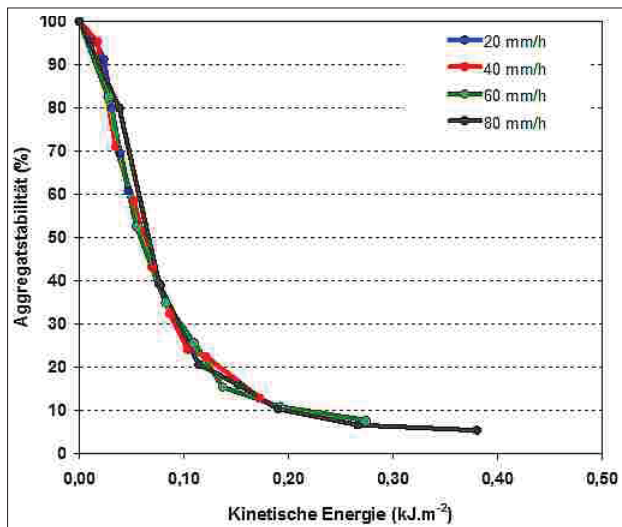


Abbildung 3: Einfluss unterschiedlicher kinetischer Energien auf die Aggregatstabilität eines schluffigen Lehms.

eine Reduktion der Makroporen und eine Zunahme der Mesoporen zur Folge hatte. Es zeigte sich außerdem, dass die Konnektivität des Porennetzwerkes mit zunehmender Verdichtung stark eingeschränkt wurde. Somit reduziert sich das Infiltrationsvermögen und die Gefahr einer Verlagerung von Nähr- und Schadstoffen mit dem Bodenwasser in tiefere Regionen und das Grundwasser. Andererseits belegte die Studie, dass besonders an Standorten in Hanglage die verminderte Infiltrationskapazität den erosiven Bodenabtrag (und damit die laterale Verlagerung und Auswaschung von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln) erhöhen kann.

Einfluss der organischen Substanz

Die organische Substanz im Boden vermag – bezogen auf ihre Masse – große Wassermengen zu speichern. Daher führt eine Erhöhung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff zu einer verbesserten Wasserspeicherfähigkeit von Böden (Abbildung 2). Dies resultiert einerseits in geringerem Oberflächenabfluss und andererseits in verringertem Verlagerungsrisiko von Nähr- und Schadstoffen durch Abfluss aber auch Perkolatation. Andererseits beeinflusst der Gehalt an organischem Kohlenstoff jedoch über das Mineralisierungspotenzial auch die Auswaschung von Nitrat.

Neben diesen direkten Effekten auf die Stoffretention verbessern höhere Kohlenstoffgehalte in Böden auch die Stabilität von Bodenaggregaten gegenüber erosiven Kräften wie Wasser und Wind. Böden mit hoher Aggregatstabilität verschlammten weniger leicht, wodurch ihre Infiltrationsfähigkeit und ihr Widerstand gegen Erosionsprozesse erhalten bleiben. Maßgebend für die Zerstörung der Aggregate ist dabei die kinetische Energie ausgedrückt durch die Dauer und die Intensität des Niederschlags bzw. die Windgeschwindigkeit des Ereignisses (Abbildung 3).

Einfluss der Bodenbearbeitung

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die Form der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung einen Einfluss auf die Aggregatstabilität und Kohlenstoffakkumulation und damit die Anfälligkeit gegenüber Erosion und Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen hat. In *Abbildung 4* ist die Auswirkung eines simulierten Niederschlags mit 30 mm.h⁻¹ Regenintensität auf die Aggregatgrößen eines schluffigen Lehms dargestellt. Der konventionell bearbeitete Boden weist eine geringe Aggregatstabilität auf. Die großen Aggregate > 4 mm werden innerhalb von 5 min von einem Anteil über 70% auf 19% zerschlagen. Bei Mulchsaat führt dagegen erst ein 20-minütiger Starkregen zu dieser Abnahme. Das bedeutet, dass dieser Boden vier Mal länger der erosiven Kraft Widerstand leistet. Der mit Direktsaat bestellte Boden weist eine noch höhere Aggregatstabilität auf. Nach 20 min Starkregen nimmt der Anteil der Aggregate > 4 mm auf 32% ab und erreicht hiermit jenen Wert, der bei Mulchsaat nach 5 min erreicht wird. Durch die Bearbeitung und die dadurch entstehenden Aggregatbruchflächen werden freigelegte Kohlenstoff- und Nährstofffraktionen der Mineralisation zugänglich und können rasch abgebaut werden. Eine naturnahe Entwicklung des obersten Bodenhorizontes durch Weglassen von intensiven Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Direktsaat) führt langfristig zu einer Reduktion von Grobporen, einer Zunahme der Bodendichte und einer Erhöhung der Aggregatstabilität. Kohlenstoff wird in kleinere Aggregatfraktionen eingelagert und ist so der schnellen direkten Mineralisation entzogen. Durch diese Veränderung in der Aggregatarchitektur wird eine Mineralisationsbarriere geschaffen, die langfristig zu einer Kohlenstoffakkumulation im Boden führt.

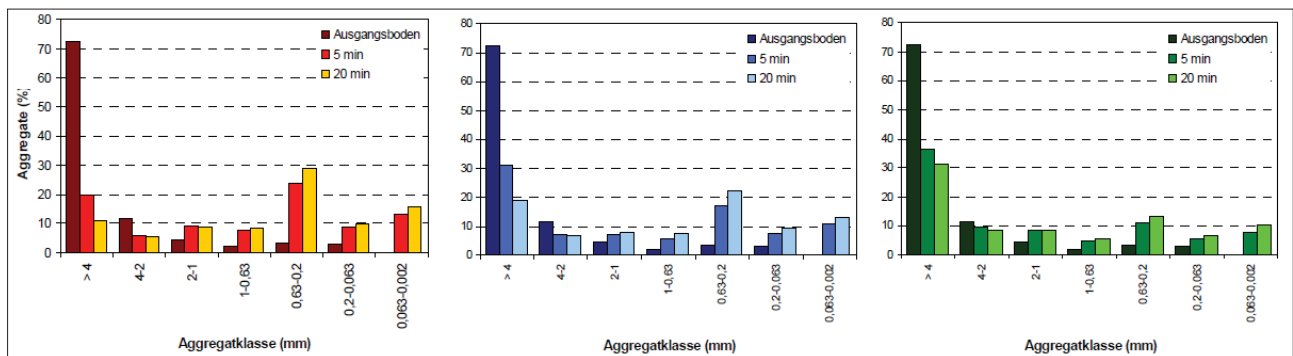


Abbildung 4: Veränderung der Aggregate unterschiedlicher Größe eines schluffigen Lehms mit konventioneller Bearbeitung (links), Mulch- (Mitte) und Direktsaat (rechts) bei einem fünf- bzw. 20-minütigen Regenereignis mit 30 mm.h⁻¹ Intensität.

Auswaschung von Nährstoffen

Da die höchsten Nährstoffgehalte im obersten Bodenhorizont vorliegen liegt es nahe, dass für die oberflächliche Verlagerung von Nährstoffen wie Stickstoff und vor allem Phosphor der Wassergehalt dieser oberflächennahen Schicht maßgebend ist. Entlang eines Hanges können

verschiedene bodenhydrologische Zustände auftreten und einen großen Einfluss auf den Nährstofftransport ausüben. Diese Zustände können von Infiltration über gesättigte Verhältnisse bis hin zur Exfiltration – insbesondere am Hangfuß – reichen. ZHENG et al. (2003) untersuchten in einem Labor-Regensimulatorversuch den Einfluss unterschiedlicher oberflächennaher bodenhydraulischer Zustände

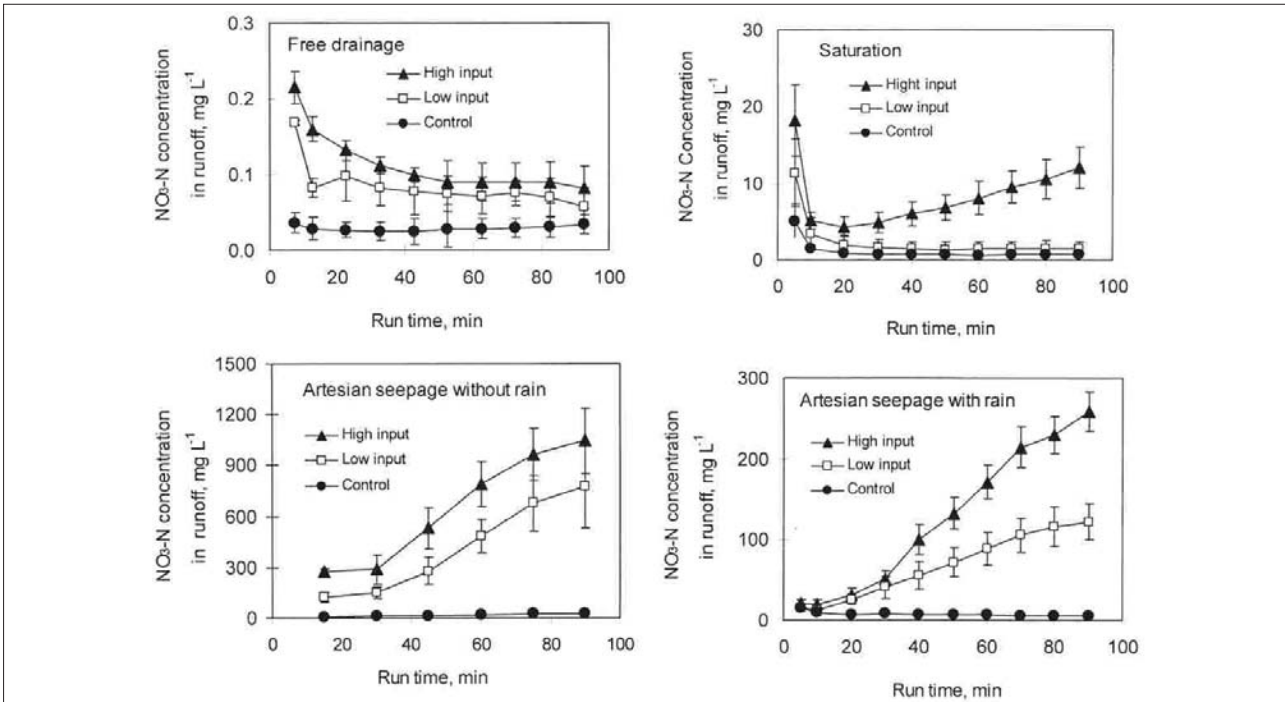


Abbildung 5: NO₃-N Konzentrationen im Abfluss während eines 90-min Regenereignisses mit unterschiedlichen hydraulischen Zuständen (aus: Zheng et al., 2003).

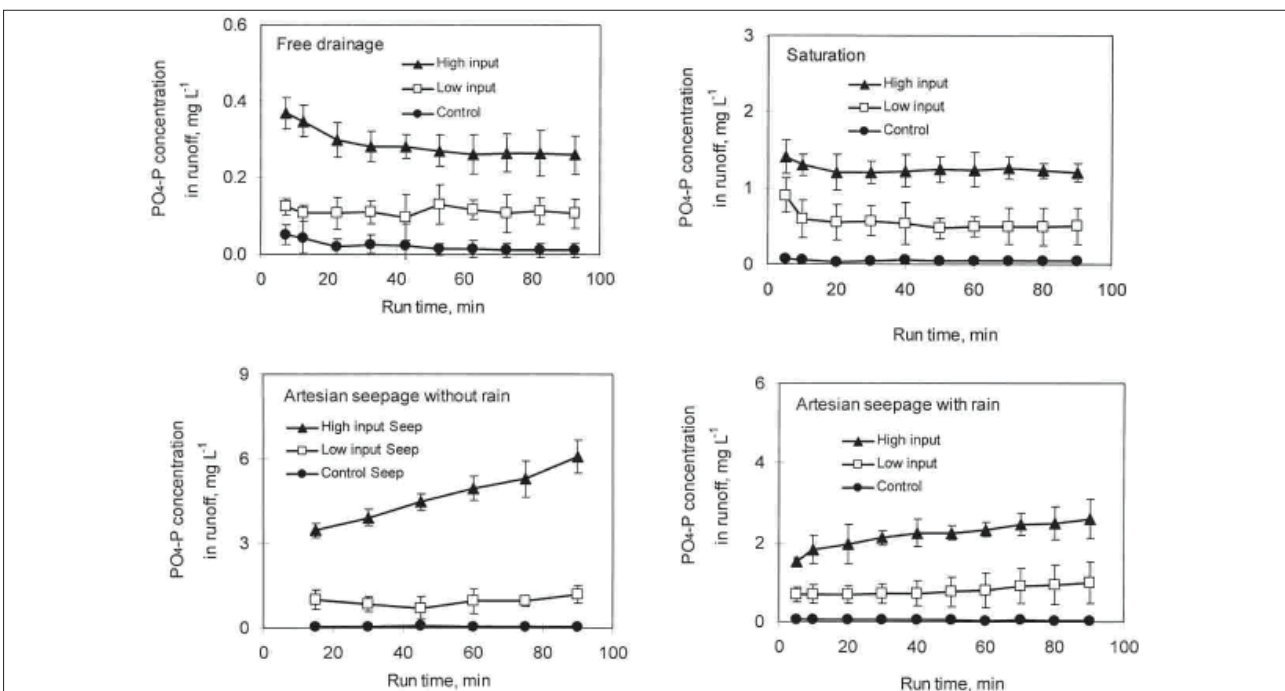


Abbildung 6: PO₄-P Konzentrationen im Abfluss während eines 90-min Regenereignisses mit unterschiedlichen hydraulischen Zuständen (aus: Zheng et al., 2003).

auf die Nährstoffkonzentrationen im Oberflächenabfluss. Die Ergebnisse zeigten, dass bei niedriger Nährstoffgabe ($40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) die mittleren NO_3^- -Konzentrationen bei 0,08 (freie Entwässerung), 2,20 (gesättigte Verhältnisse), 529,5 (Exfiltration ohne Regeneinfluss) und $71,8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (Exfiltration mit Regeneinfluss) lagen. Die entsprechenden PO_4^{3-} -Konzentrationen betragen 0,11, 0,54, 0,91 und $0,72 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (Abbildungen 5 und 6). Bei freier Entwässerung wurden nur 0,01% der applizierten Stickstoffmenge abgeschwämmt, bei Exfiltration dagegen bis zu 16%.

Auswaschung von Pestiziden

Das Auswaschungspotenzial von Pflanzenschutzmitteln (PSM, z.B. Pestizide) hängt einerseits von der Art der Substanz ab, andererseits aber von Bodeneigenschaften. Dazu zählen vor allem die Bodentextur bzw. die Größe der aktiven Oberflächen (Ton), der Gehalt an organischer Substanz sowie der pH-Wert. Die organische Substanz im Boden ermöglicht vielfältige Bindungsmöglichkeiten für PSM und vermindert somit die Auswaschungsgefährdung. Die Textur eines Bodens beeinflusst die Geschwindigkeit des Wassertransportes und somit auch die Kontaktzeit der Agrochemikalie mit dem Boden. Der pH-Wert wirkt sich bei zahlreichen Pestiziden auf deren chemische Eigenschaften aus. Bei sinkendem pH-Wert werden PSM mehr an Tonpartikel gebunden und somit aus dem Perkolationswasser gefiltert. Darüber hinaus sind PSM bei niedrigeren pH-Werten üblicherweise weniger stark löslich. Der Einfluss des pH-Wertes auf die Mobilität von PSM ist jedoch geringer als jener der organischen Substanz und der Textur. Entscheidend ist jedoch auch das Zeitintervall zwischen der Applikation und dem ersten Niederschlagsereignis, welches zu Abfluss oder Infiltration führt (WENDROTH et al. 2011).

KLIK und TRUMAN (1997) untersuchten die Auswirkung von zwei Böden mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung auf den Transport von Pflanzenschutzmitteln. Die beiden Böden unterschieden sich bei annähernd gleichem Tongehalt im Sand- und Schluffgehalt. Bei den applizierten

Tabelle 1: Bodeneigenschaften von zwei unterschiedlichen Böden sowie die Verluste durch Abfluss und Infiltration von 2,4-D und Chlorpyrifos (ausgedrückt in % der Applikationsmenge) bei simulierten Starkregen mit 90 Minuten Dauer (I = 40 und $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$).

Parameter	Pyhra		Greenville	
Sand (%)	37		64	
Schluff (%)	41		15	
Ton (%)	22		21	
C_{org} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	28		12	
pH	7,4		5,0	
Regenintensität ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	41	60	36	60
Abflusskoeffizient (%)	29	38	28	56
Verluste an 2,4-D				
im Abfluss (%)	0,5	2,6	7,2	15,8
in Infiltration (%)	0,0	0,0	0,1	0,1
Verluste an Chlorpyrifos				
im Abfluss (%)	0,04	0,1	0,06	0,3
in Infiltration (%)	0,0	0,0	0,02	0,02

Pestiziden handelte es sich um einen leicht wasserlöslichen Wirkstoff (2,4-D; Löslichkeit $890 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, $K_{\text{oc}} 20 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$) und ein wenig mobiles Mittel (Chlorpyrifos, Löslichkeit $0,4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, $K_{\text{oc}} 6070 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$), welches stark an den aktiven Bodenoberflächen adsorbiert wird. Während eines simulierten Regenereignisses von 90 min Dauer und einer Intensität von 40 bzw. $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ wurden beim Boden aus Pyhra zwischen 0,5 und 2,6% der aufgetragenen 2,4-D Menge mit dem Abfluss abgetragen, beim Greenville Boden dagegen zwischen rd. 7 und 16% (STEINBERGER 2001, STICKLER 1996). Die Chlorpyrifos-Verluste im Abfluss lagen aufgrund der starken Adsorption nur zwischen 0,1 und 0,3%. Die Pestizidverluste durch Infiltration bzw. leaching betragen bei beiden Wirkstoffen dagegen nur max. 0,1% der Aufwandsmenge.

Fazit

Die Erhaltung bzw. Verbesserung der Speicher-, Filter- und Pufferfunktion unserer Böden ist eine wichtige Voraussetzung für den Schutz unserer Oberflächen- und Grundwässer. Die bodenhydrologischen sowie Struktureigenschaften eines Bodens bestimmen, in welcher Höhe und auf welchem Pfad Nähr- aber auch Schadstoffe am bzw. im Boden verlagert und abgetragen werden. Bodenschonende und nachhaltige Bewirtschaftung leisten einen wichtigen Beitrag zum Gewässerschutz.

Literatur

- CRESCIMANNO, G., M. LANE, P. OWENS, B. RYDEL, O. JACOBSEN, O. DÜWEL, H. BÖKEN, J. BERÉNYI-ÜVEGES, V. CASTILLO and A. IMESON, 2004: Final Report, Working Group on Soil Erosion, Task Group 5: Links with organic matter and contamination working group and secondary soil threats. Brussels: European Commission, Directorate-General Environment.
- DRESSEL, J., 1992: Ergebnisse langjähriger Lysimeterversuche zur Stickstoffversickerung bei verschiedenen Anbausystemen und unterschiedlicher Düngung. In: Praktische Ergebnisse aus der Arbeit mit Lysimetern. Bericht über die 2. Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, 1-12.
- HUDSON, B.D., 1994: Soil organic matter and available water capacity. Journal of Soil and Water Conservation 49(2), 189-194.
- JONES, R.J.A., R. HIEDERER, E. RUSCO, P.J. LOVELAND and L. MONTARANELLA, 2003: Topsoil organic carbon in Europe. Proceedings of the 4th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, 17-20 June 2003, Bologna, Emilia Romagna, Direzione Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa, Servizio Geologico.
- KLIK, A. and C.C. TRUMAN, 1997: Rainfall Intensity and Soil Texture Effects on Water, Sediment, and Pesticide Losses. In: SAN JOSE, R. und C.A. BREBBIA (Hrsg.). Measurements and Modelling in Environmental Pollution. Computational Mechanics Publication, Southampton, 441-450.
- SCHWEN, A., G. HERNANDEZ-RAMIREZ, E.J. LAWRENCE-SMITH, S.M. SINTON, S. CARRICK, B.E. CLOTHIER, G.D. BUCHAN and W. LOISKANDL, 2011: Hydraulic Properties and the Water-Conducting Porosity as Affected by Subsurface Compaction Using Tension Infiltrometry. Soil Science Society of America Journal 75(3), 822-831.
- STEINBERGER, P., 2001: Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Transportverhaltens von ausgewählten Pestiziden unter Erosionsbedingungen. Diplomarbeit. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 86 S.

- STICKLER, Th., 1996: Laboruntersuchungen des Transportes von unterschiedlichen Pestiziden durch Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Diplomarbeit. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 196 S.
- VAN-CAMP, L., B. BUJARRABAL, A.-R. GENTILE, R.J.A. JONES, L. MONTARANELLA, C. OLAZÁBAL and S.-K. SELVARADJOU, 2004: Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection, EUR 21319 EN/1- Working Group on Research, p. 179.
- VAN OUWERKERK, C. and B.D. SOANE, (eds.), 1995: Soil compaction and the environment. Special issue, *Soil and Tillage Research* 35, 1-113.
- WENDROTH, O., V. VASQUEZ, C.J. MATOCHA, 2011: Field experimental approach to bromide leaching as affected by scale-specific rainfall characteristics. *Water Resour. Res.* 47(12); doi: 10.1029/2011WR010650.
- ZHENG, F., C. HUANG and L.D. NORTON, 2004: Effects of Near-Surface Hydraulic Gradients on Nitrate and Phosphorus Losses in Surface Runoff. *Journal of Environmental Quality* 33, 2174-2182.