

Auswirkung der Weideintensität auf bodenphysikalische und -chemische Parameter und Vegetation

Ittner, S., Zeitz, J. und Drexler, S.

Humboldt-Universität zu Berlin

Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften

Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin

ittnerso@hu-berlin.de

Einleitung und Problemstellung

Seit einigen Jahren besteht in der Tierhaltung ein ausgeprägter Trend zur Stallhaltung. Dabei kann die Weidehaltung unter dem Aspekt des Tierwohles und der Tiergesundheit, in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Milchviehbetriebe und unter Berücksichtigung der ökologischen Landschaftsfunktionen des Grünlandes eine wichtige Rolle spielen. Neben der Bereitstellung von Futtermitteln gehören zu den wichtigsten Ökosystemleistungen des Grünlandes Wasserregulationsfunktionen und Bodenerosionsschutz, zudem das Potenzial zur Klimaregulierung über vermehrte Kohlenstoffspeicherung und der Schutz biotischer Ressourcen über den Erhalt und der Erhöhung der Biodiversität. Wie sich diese Ökosystemleistungen auf intensiv genutzten Weidestandorten mit steigender Nutzungsintensität und Trittbelastung verändern, ist bisher wenig erforscht. Das Verbundprojekt „Ökonomische, ökologische und Tierwohlaspekte der Weidehaltung von Hochleistungskühen“ (ÖKOTAWEK; gefördert 2013–2017 von der BLE) analysiert neben den ökonomischen und Tierwohlaspekten auch das ökologische Wirkungsgefüge der intensiven Weidehaltung. Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen erfolgten anhand von drei ausgewählten Praxisbetrieben in Norddeutschland. Es wurden drei Trittintensitätsklassen auf verschiedene bodenphysikalische und -chemische Parameter, sowie auf ihre Vegetationszusammensetzung, Trockenmasseerträge und Qualitätsmerkmale untersucht. Vorgestellt werden die Ergebnisse des Teilprojektes Bodenökologie aus dreijähriger Projektarbeit.

Material und Methoden

Die drei intensiv beprobten Praxisbetriebe unterscheiden sich in ihren geologischen und klimatischen Standortvoraussetzungen und werden bodenkundlich folgendermaßen eingeordnet: Betrieb A: Knickmarsch (Niedersachsen), Betrieb B: Parabraunerde (Mecklenburg-Vorpommern) und Betrieb C: übersandetes Erdniedermoor (Brandenburg).

Effekte der Beweidung wirken sich innerhalb einer Weidefläche aufgrund der unterschiedlichen Verweildauer der Tiere auf den Flächen räumlich unterschiedlich aus. Um dieser räumlichen Variabilität bei der Analyse gerecht zu werden, wurde innerhalb des ÖKOTAWEK-Projektes ein Kartierschlüssel auf Grundlage der Arbeiten von Singleton und Addison (1999) sowie von Singleton *et al.* (2000) erarbeitet (Tabelle 1). Anhand der Narbenlückigkeit, dem Deckungsgrad von trittanzeigenden Pflanzen und dem Vorhandensein deutlich sichtbarer Klauenabdrücke mit einhergehenden Narbenverletzungen wurden auf jeder Untersuchungsfläche die folgenden drei Trittbelastungsklassen (TBK) flächendeckend kartiert: „durchschnittlich betreten“ (D), „erhöht betreten“ (E) und „stark betreten“ (S). Für jede Klasse wurden folgende Parameter in drei Tiefenstufen (T1: 0–5 cm, T2: 5–10 cm und T3: 10–15 cm) untersucht: Trockenrohdichte (TRD), Gesamtporenvolumen (PV), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) Gesamtstickstoff (N_t), organischer Kohlenstoff (C_{org}), doppellaktatlöslicher Phosphor (PDL), doppellaktatlösliches Kalium (KDL) und der pH-Wert (pH). Im Weiteren wurden an vier Terminen Ertragsmessungen durchgeführt und Qualitätsmerkmale mit Hilfe der Weender Futtermittelanalyse bestimmt. Einmalig wurden die Vegetationszusammensetzung und eine Ertragsanteilschätzung nach KLAPP/STÄHLIN am 3. Termin ermittelt.

Die Datenauswertung mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) erfolgte mit Hilfe der Statistiksoftware R und der Funktion *principal*. Falls als sinnvoll erachtet, wurde die Berechnung der Hauptkomponenten (HK) unter Verwendung der Varimax-Rotation durchgeführt. Die Varianzanalyse (ANOVA) basiert auf dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

Bei signifikanten Ergebnissen der ANOVA wurde im Anschluss ein Post-hoc-Test durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten zu überprüfen.

Tabelle 1: Kartierschlüssel zur Unterscheidung der drei Trittbelastungsklassen „durchschnittlich betreten“ (D), „erhöht betreten“ (E) und „stark betreten“ (S)

TBK	Indikatoren
D	Narbenlückigkeit < 10 %; Deckungsgrad Trittanzeiger < 10 %; kaum Trittbelastung am Oberflächenrelief erkennbar
E	Narbenlückigkeit > 10 %; Deckungsgrad Trittanzeiger > 10 %; Trittbelastung deutlich am Oberflächenrelief erkennbar
S	Narbenlückigkeit > 50 %; Deckungsgrad Trittanzeiger > 50 %

Der Bodenkohlenstoffvorrat wurde über die TRD und der Konzentration an C_{org} mittels nachfolgender Gleichung für die Fläche eines Hektars berechnet.

$$C_{org}[t\ ha^{-1}] = C_{org} [10\ mg\ g^{-1}] * TRD [g\ cm^{-3}] * M [cm]$$

Die C-Speichermengen wurden für jede Tiefenstufe (Mächtigkeit (M) = 5 cm) einzeln berechnet und die Gesamtspeichermenge in 0–15 cm über Addition der drei Einzelwerte bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird eine Auswahl an Ergebnissen der Betriebe A und B näher vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse von Betrieb C werden im Vortrag ergänzt.

Auswirkungen der Weideintensität auf bodenphysikalische – und chemische Kennwerte

Das Ergebnis der PCA für Betrieb A zeigt, dass durch die ersten beiden HK 89 % der gesamten Varianz des Datensatzes erklärt werden können (Tabelle 2). Die physikalischen Parameter weisen eine enge Korrelation mit HK 1 auf, während die chemischen Parameter eng mit HK 2 korrelieren. Das Ergebnis der ANOVA zeigt in Bezug auf HK 1 signifikante Unterschiede zwischen den Tiefenstufen, jedoch keine Unterschiede zwischen den TBK (Tabelle 3). Erwartungsgemäß nehmen hier das Porenvolumen, die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität mit der Tiefe ab, während die Trockenrohddichte mit der Tiefe zunimmt (hier nicht dargestellt). Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass sich vor allem die Tiefe 0–5 cm von den beiden anderen Tiefen unterscheidet. Signifikante Unterschiede zwischen den TBK sind nur in Bezug auf HK 2 zu finden, wobei sich die Klassen „E“ und „S“ nicht scharf voneinander abgrenzen lassen. Auf den Flächen mit erhöhter und starker Trittbelastung sind die Werte aller chemischen Parameter höher, als auf den durchschnittlich betretenen Flächen.

Durch die Beweidungsintensität werden am Standort A in erster Linie die Bodenchemie und hier Nährstoffe, wie Kalium und Phosphor sowie die organische Substanz beeinflusst. Mit steigender Aufenthaltsdauer der Tiere auf einer Fläche kann auf einen erhöhten Nährstoffeintrag (N, C, P, K) geschlossen werden. Auch Hilder (1964) und Schuhman *et al.* (1999) konnten mit steigender Beweidungsintensität einen erhöhten Nährstoffeintrag über Exkremente und Urin und eine Akkumulation von organischem Kohlenstoff und Stickstoff im Vergleich zu naturbelassenen oder extensiv genutzten Flächen beobachten. Es konnte keine Verdichtung des Oberbodens durch erhöhte Trittintensität nachgewiesen werden. Auch Singleton *et al.* (2000) haben in ihrer Studie gezeigt, dass die Trockenrohddichte, das Gesamtporenvolumen und die Porengrößenverteilung nicht immer gute Indikatoren für Veränderungen durch Beweidung darstellen. Die Resistenz gegenüber Verdichtungen durch Tritt kann auf die individuellen Standortvoraussetzungen zurückgeführt werden. Standort A weist einen hohen Jahresniederschlag auf.

Auf der Untersuchungsfläche finden wir vorwiegend Knickmarschen, welche durch Stau- und Haftnässe geprägt sind. Es ist daher davon auszugehen, dass hier häufig Verhältnisse mit hoher Bodenfeuchte oder sogar Wassersättigung vorliegen.

Die Art der Bodenveränderungen infolge von Trittbelastungen ist primär von der Bodenfeuchte abhängig. Bei hoher Bodenfeuchte oder Wassersättigung treten vermehrt "pugging" oder "poaching" auf (Bilotta *et al.* 2007). Diese Prozesse führen weniger zu einer Verdichtung des Oberbodens mit einer einhergehenden Verringerung des Porenvolumens, als vielmehr zu einer Deformation der Bodenstruktur und elastischen Bodenverformung. Im Falle von trockenen Bodenverhältnissen sind Marschböden aufgrund ihres hohen Tongehaltes ebenfalls sehr schwer zu bearbeiten und auch hier weniger verdichtungsanfällig.

Tabelle 2: Ergebnis der PCA für Betrieb A und B. Gezeigt werden die Korrelationen (Werte >0,5) der untersuchten Parameter mit der 1. Hauptkomponente (HK1) und der 2. Hauptkomponente (HK2) und der Anteil der erfassten Varianz im Datensatz, welcher durch die HK erklärt wird

Korrelation mit Hauptkomponenten		
Betrieb A	HK1	HK2
Anteil erfasster Varianz (in %)	45	44
PV	0,94	
nFK	0,91	
TRD	-0,89	
LK	0,85	
K _{DL}		0,88
pH		0,85
P _{DL}		0,85
N _t		0,83
C _{org}		0,80
Betrieb B	HK1	HK2
Anteil erfasster Varianz (in %)	39	35
nFK	0,89	
C _{org}	0,89	
PV	0,88	
N _t	0,87	
pH		0,88
P _{DL}		0,88
K _{DL}		0,83
LK		-0,58
TRD		0,54

Das Ergebnis der PCA für Betrieb B zeigt, dass durch die ersten beiden HK 74 % der gesamten Varianz des Datensatzes erklärt werden können (Tabelle 2). HK 1 korreliert mit wichtigen Kennwerten der organischen Substanz. HK 2 korreliert sowohl mit bodenphysikalischen als auch mit bodenchemischen Parametern. Mit Hilfe der ANOVA konnte auch für Betrieb B ein signifikanter Unterschied zwischen den Tiefenstufen in Bezug auf HK 1 festgestellt werden, jedoch keine Unterschiede zwischen den TBK (Tabelle 4). Die korrelierten Parameter nehmen alle mit der Tiefe ab (hier nicht dargestellt). Signifikante Unterschiede zwischen den TBK sind in Bezug auf HK 2 zu finden (Tabelle 4). Die korrelierten Parameter unterscheiden sich vor allem zwischen den stark betretenen Flächen und den erhöht bzw. durchschnittlich betretenen Flächen. Die TBK „D“ und „E“ lassen sich nicht scharf voneinander abgrenzen. Während der pH-Wert, der Gehalt an Phosphor und Kalium sowie die Trockenrohdichte mit erhöhter Trittbelastung zunehmen, nimmt die Luftkapazität ab.

Die Weideintensität beeinflusst am Standort B sowohl bodenchemische als auch bodenphysikalische Parameter. Ähnlich wie am Standort A wurde mit steigender Aufenthaltsdauer der Kühe auf der Fläche ein erhöhter Phosphor- und Kaliumgehalt nachgewiesen. Die erhöhten Werte hängen vermutlich auch hier mit vermehrten Exkrementablagerungen zusammen (Hilder 1964, Schuhman *et al.* 1999). Der zunehmende pH-Wert mit steigender Trittsintensität kann auf den erhöhten Eintrag von Urin zurückgeführt werden (Singh *et al.* 2013).

Im Gegensatz zu Betrieb A konnte auf der untersuchten Fläche am Standort B mit steigender Trittsbelastung eine Verdichtung des Oberbodens festgestellt werden. Standort B weist einen geringeren Jahresniederschlag auf, zudem ist die Bodenart von einem hohem Sandgehalt geprägt (lehmi-ger Sand). Es ist hier daher oft mit geringen Bodenfeuchteverhältnissen zu rechnen. Daraus lässt sich schließen, dass hier der Prozess „Compaction“ als Folge der Trittsbelastung dominiert. „Compaction“ beschreibt die Verdichtung von trockenem Boden im klassischen Sinne, einhergehend mit einer Verringerung des Porenvolumens (Bilotta *et al.* 2007, Singleton und Addison 1999, Singleton *et al.* 2000).

Auch andere Studien konnten verringerte Trockenrohdichten mit steigender Trittsbelastung aufzeigen (Willatt und Pullar 1984, Singleton und Addison 1999, Singleton *et al.* 2000, Steffens 2008). Wie auch schon Singleton und Addison (1999) und Opitz von Boberfeld (2007) untersucht haben, ist hier vor allem der Anteil weiter Grobporen (Luftkapazität) betroffen. Diese Porengröße kann maßgeblich die Wasserleitfähigkeit und die Durchlüftung des Bodens und damit auch wasserregulierende Prozesse sowie das Pflanzenwachstum beeinflussen.

Tabelle 3: Ergebnis der ANOVA mit angeschlossenem Post-hoc-Test zur Überprüfung der Effekte der Faktoren TBK und Beprobungstiefe auf HK 1 und HK 2 für Betrieb A

Effekt	Signifikanz
1. Hauptkomponente	
TBK	0,44
Beprobungstiefe	< 0,0001 ***
2-1	< 0,001 **
3-1	< 0,0001 ***
3-2	0,09
2. Hauptkomponente	
TBK	< 0,0001 ***
E-D	0,08
S-D	< 0,0001 ***
S-E	< 0,0001 ***
Beprobungstiefe	0,69

Tabelle 4: Ergebnis der ANOVA mit angeschlossenem Post-hoc-Test zur Überprüfung der Effekte der Faktoren TBK und Beprobungstiefe auf HK 1 und HK 2 für Betrieb B

Effekt	Signifikanz
1. Hauptkomponente	
TBK	0,24
Beprobungstiefe	< 0,0001 ***
2–1	< 0,001 **
3–1	< 0,0001 ***
3–2	0,14
2. Hauptkomponente	
TBK	< 0,0001 ***
E–D	< 0,001 **
S–D	< 0,0001 ***
S–E	0,09
Beprobungstiefe	0,12

Kohlenstoffhaushalt

Vorge stellt werden hier beispielhaft die Ergebnisse von Betrieb B. Neben der Weidefläche wurde hier eine angrenzende Ackerfläche beprobt und die Kohlenstoffspeichermengen verglichen. Es zeigte sich eine deutliche Differenzierung hinsichtlich der Kohlenstoffkonzentrationen zwischen den Nutzungstypen. Insbesondere in der ersten Beprobungstiefe liegt die mittlere Kohlenstoffkonzentrationen der Weidefläche mit 2,48 % deutlich über dem Mittel der Ackerfläche mit 1,15 %.

Die ANOVA bestätigt einen signifikanten Einfluss der Nutzung als auch der Beprobungstiefe auf die Kohlenstoffkonzentration. Die Änderung der Kohlenstoffkonzentration mit der Tiefe ist für die Weidefläche stärker ausgeprägt (Weide: T1: 2,48 %, T2: 1,7 %, T3: 1,28 %; Acker: T1: 1,15 %, T2: 1,09 %, T3: 1,03 %). Der Unterschied zwischen den Nutzungen verringert sich mit zunehmender Beprobungstiefe.

Die Trockenrohdichte liegt im Mittel auf der Ackerfläche in 0–5 cm bei 1,43 g cm⁻³ und auf der Weide bei 1,38 g cm⁻³.

Sie nimmt mit der Tiefe ab und gleicht sich zwischen den Nutzungsformen an (T3: 1,52 g cm⁻³). Die Gesamtspeichermenge an organischem Kohlenstoff auf der Ackerfläche in 0–15 cm beträgt im Mittel rund 24 t ha⁻¹ (Abbildung 1). Diese liegt deutlich unter der Kohlenstoffspeicherung der Grünlandfläche mit einer mittleren Speichermenge von 39 t ha⁻¹. Die ANOVA bestätigt einen signifikanten Einfluss der unterschiedlichen Nutzungen auf den Gesamtkohlenstoffvorrat in 0–15 cm. Neben dem möglichen Einfluss der Bodenart konnte durch die räumliche Nähe der beiden untersuchten Flächen auch der Einfluss des Klimas auf den Kohlenstoffspeicher ausgeschlossen werden. Die Unterschiede sind daher allein auf die Nutzung zurückzuführen. Der Acker wird konservierend bearbeitet, die Fruchtfolge wird von Mais und Winterweizen dominiert. Hingegen den Erwartungen unterscheidet sich die Trockenrohdichte nicht signifikant zwischen Weide und Acker. Grund hierfür könnte zum einen die intensive Nutzung der Weide und die damit verbundenen hohen Trockenrohdichten sein. Zum anderen könnte die konservierende Bodenbearbeitung des Ackerstandortes den Aufbau eines stabilen Bodengefüges fördern und folglich eine höhere Tragfähigkeit im Vergleich zu konventionell bearbeiteten Böden führen (Carter 1992).

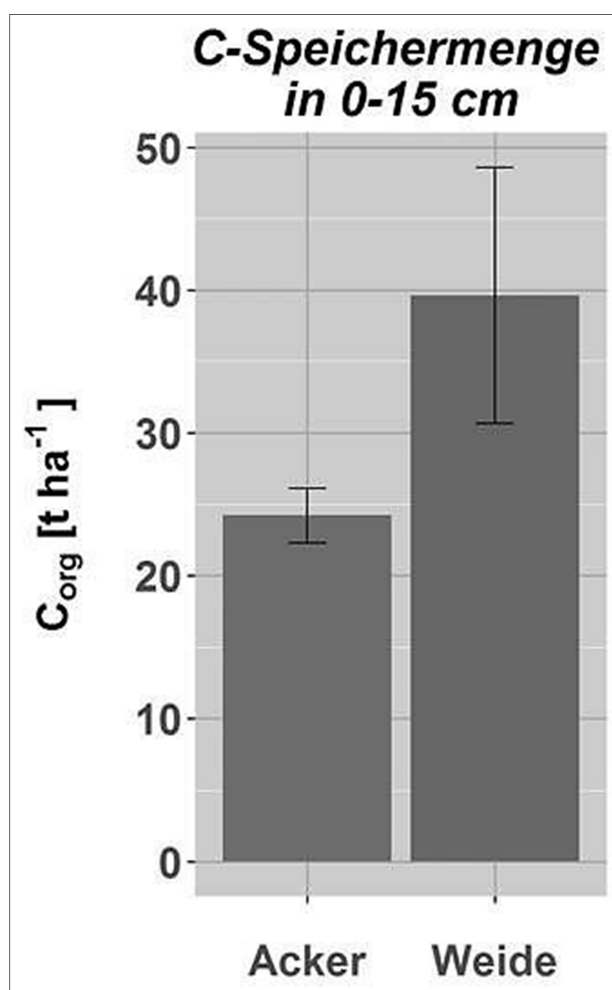


Abbildung 1: Mittlerer Bodenkohlenstoffvorrat in t ha⁻¹ in 0–15 cm mit zugehöriger Standardabweichung für Betrieb B (ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, n= Stichprobenanzahl)

Die Unterschiede in der Kohlenstoffkonzentration zwischen Grünland und Acker können auf einen verringerten anthropogenen Eingriff bei Grünlandbewirtschaftung, der grünlandspezifische Vegetation und dem Eintrag über Exkremente zurückgeführt werden. Der Kohlenstoffvorrat der Ackerfläche in 0–15 cm ist mit einer mittleren Differenz von circa 15 t C ha⁻¹ knapp 40 % geringer als der Gesamtkohlenstoffvorrat der Weidefläche. Freibauer *et al.* (2015) stellten bei den bisher ausgewerteten Beprobungspunkten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft innerhalb einer Bodenklasse in allen untersuchten Tiefenstufen 20 bis 30 % geringere Kohlenstoffvorräte unter Acker im Vergleich zu Grünland fest. Chen *et al.* (2009) ermittelten 44 % höhere Bodenkohlenstoffvorräte in 0–20 cm Tiefe im Vergleich zu den untersuchten Ackerstandorten.

Einfluss der Beweidung auf die Vegetation

Die Ergebnisse der Ertragsanteilschätzung zeigen, dass die Trittintensität die Artenzusammensetzung verändern kann (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnisse der Ertragsanteilschätzung für Betrieb B

TBK	Gräser [%]	Leguminosen [%]	Kräuter [%]	Lücken [%]	Futterwertzahl	Artenzahl
D	77,0	0,5	22,5	2,3	6,2	11
E	85,8	0,5	13,8	13,8	6,6	15
S	66,0	0,5	33,5	28,8	5,3	12

Durch die zunehmende lückenhafte Grasnarbe wird die Etablierung von trittunempfindlichen Kräutern begünstigt. Die Artenzahl kann dadurch zum Teil erhöht werden, jedoch nimmt der Futterwert gleichzeitig ab. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass vor allem durch starke Trittbelastungen mit einem hohen Ernteverlust zu rechnen ist. Über die betrachtete Weideperiode konnten mit vier Schnitten auf den durchschnittlich betretenen Flächen in der Summe ein Ertrag von 104 dt ha⁻¹ ermittelt werden, während auf den stark betretenen Flächen insgesamt nur 37 dt ha⁻¹ geerntet werden konnten. Auch die Netto-Energie-Laktation, als ein wichtiges Qualitätsmerkmal, nimmt im Mittel mit steigender Trittbelastung ab („D“: 6,8; „E“: 6,5; „S“: 5,9).

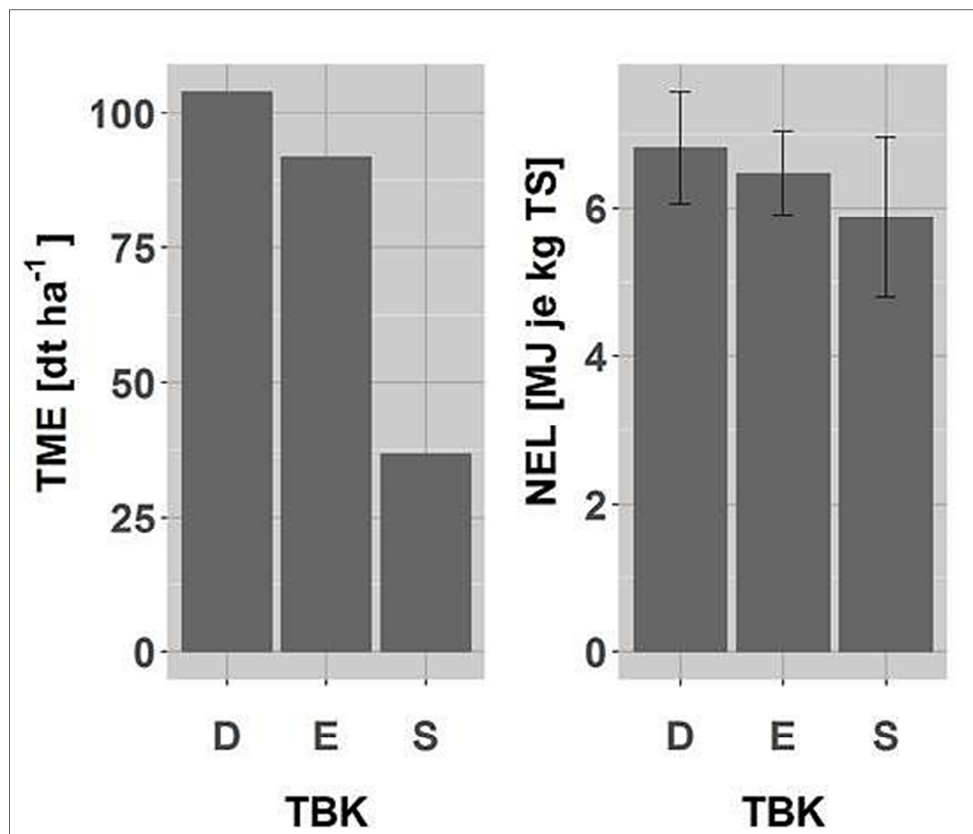


Abbildung 2: Summierter Trockenmasseertrag über vier Schnitte (links) und mittlere Netto-Energie-Laktation (rechts) mit zugehöriger Standardabweichung für die drei untersuchten Trittbelastungsklassen am Standort B (n= Stichprobenzahl)

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die standörtlichen Voraussetzungen eine bedeutende Rolle spielen, um den Einfluss intensiver Beweidung auf bodenphysikalische Eigenschaften bewerten zu können. Grundsätzlich kann über die Kombination der Bodenart und den Bodenfeuchteverhältnissen auf die tragenden Prozesse („pugging“, „poaching“ und „compaction“) und damit auf die Verdichtungsanfälligkeit gegenüber Trittbelastungen geschlossen werden. Der Nährstoffeintrag ist auf den stark betretenen Flächen sehr hoch und unabhängig vom Standort. Da die stark beanspruchte Grasnarbe auf diesen Flächen oft lückenhaft ist, wird der Nährstoffüberschuss kaum durch das Pflanzenwachstum ausgeglichen. Hinzu kommt das steigende Erosionspotenzial, welches bei entsprechender Hangneigung zum Tragen kommt. In solchen Fällen ist mit einem erhöhten Stoffaustrag in das umliegende Gewässersystem zu rechnen. Die stark betretenen und potenziell gefährdeten Flächen machen allerdings nur einen kleinen prozentualen Anteil an den beweideten Flächen aus.

Insgesamt ist das große ökologische Potenzial auch intensiv genutzter Weiden wegen ihres Regulierungspotenziales und durch ihren Beitrag zur vermehrten Kohlenstoffspeicherung und Biodiversität im Vergleich zu Ackerflächen hervorzuheben.

Literatur

- Bilotta, G.S., Brazier, R.E. und Haygarth, P.M. (2007): The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in agronomy* 94, 237–280.
- Carter, M.R. (1992): Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macroaggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate. *Soil and Tillage Research* 23(4), 31–372.
- Chen, H., Marhan, S., Billen, N., und Stahr, K. (2009): Soil organic-carbon and total nitrogen stocks as affected by different land uses in Baden-Württemberg (southwest Germany). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172(1), 32–42.
- Freibauer, A., Heidkamp, A., Prietz, R. und Vos, C. (2015): Der Humuszustand der landwirtschaftlichen Böden in Deutschland. Erste Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft. In: Böden – Lebensgrundlage für Pflanze und Tier. Kongressband 2015 Göttingen, VDLUFA-Schriftenreihe 71, 50–57.
- Hilder, E.J. (1964): The distribution of plant nutrients by sheep at pasture. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production* 5, 241–248.
- Opitz von Boberfeld, W., Schlimbach, G. und Schröder, D. (2007): Zum Einfluss der Winterbeweidung auf bodenphysikalische Merkmale. *Pflanzenbauwissenschaften* 11(1), 20–27.
- Schuman, G.E., Reeder, J.D., Manley, J.T., Hart, R.H. und Manley, W.A. (1999): Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological applications* 9(1), 65–71.
- Singh, J., Kunhikrishnan, A., Bolan, N.S. und Saggari, S. (2013): Impact of urease inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine. *Science of the total Environment* 465, 56–63.
- Singleton, P.L. und Addison, B. (1999): Effects of cattle treading on physical properties of three soils used for dairy farming in the Waikato, North Island, New Zealand. *Soil Research* 37(5), 891–902.
- Singleton, P.L., Boyes, M. und Addison, B. (2000): Effect of treading by dairy cattle on topsoil physical conditions for six contrasting soil types in Waikato and Northland, New Zealand, with implications for monitoring. *New Zealand journal of Agricultural research* 43(4), 559–567.
- Steffens, M., Kölbl, A., Totsche, K.U. und Kögel-Knabner, I. (2008): Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (PR China). *Geoderma* 143(1), 63–72.
- Willatt, S.T. und Pullar, D.M. (1984): Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Soil Research* 22(3), 343–348.