Belastungsklassen für Technik zur Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland

Classes of Load-input for Agricultural Machinery Working on Fen Grasslands

Annette Prochnow, Sven Kraschinski, Rainer Tölle und Jürgen Hahn
Fachgebiet Technik in der Pflanzenproduktion, Humboldt-Universität zu Berlin

Kurzfassung: Für eine angepaßte Nutzung von Niedermoorstandorten ist die Befahrbarkeit von zentraler Bedeutung. Umfangreiche standortkundliche und verfahrenstechnische Untersuchungen bilden die Grundlage für die Bestimmung der standortspezifischen Tragfähigkeit von Niedermoorgrünland und für die Ermittlung der zulässigen mechanischen Belastung beim Befahren. Zur Kennzeichnung der Tragfähigkeit von Niedermoorgrünland werden die ermittelten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit von Biotoptyp, Bewuchsdichte und Bodenfeuchte verwendet. Das Befahren mit Technik erfordert bestimmte Scherfestigkeiten, die mittels Regressionsfunktion aus Belastungskennzahlen berechnet und den tatsächlich vorhandenen Scherfestigkeiten gegenübergestellt werden können. Auf der Grundlage der berechneten erforderlichen Scherfestigkeiten für zahlreiche Technikvarianten der Grünlandbewirtschaftung erfolgt die Bildung von Belastungsklassen. Sie ermöglicht die Abschätzung der mechanischen Belastung beim Befahren aus leicht verfügbaren technischen Daten und die Zuordnung des möglichen Einsatzbereiches auf Niedermoorgrünland. Damit können die Belastungen durch Technik auf die Tragfähigkeit der Fahrbahn abgestimmt und Empfehlungen zu Technikauswahl und -einsatz abgeleitet werden. Die Erhaltung der Niedermoore erfordert eine ganzjährig ausreichende Wasserversorgung und damit die standortspezifische Begrenzung von Radlasten und Zugkräften sowie angepaßte Bereifungen.
Deskriptoren: Niedermoor, Befahrbarkeit, Tragfähigkeit, Bodenbelastung

Abstract: *Trafficability is of central importance for the appropiate use of fens. Based on extensive field trials site-specific load-bearing capacity of fen grassland as well as permissible load input by machinery can be estimated. Measured shearing strength is used to characterize load-bearing capacity of the ground depending on type and density of vegetation and soil moisture content. The required shearing strength for the passage of vehicles can be calculated from figures of load input by a regression function and compared with the given site-specific shearing strength. Classes of load input are established on the base of the calculated required shearing strength for many variants of machinery working on grassland. They make it possible to estimate load-inputs of machinery from easily available technical data and to derive the site conditions required on fen grasslands. In this way load input by machinery can be adapted to load-bearing capacity of the ground and recommendations on selection and use of machinery can be given. Preservation of fens requires a sufficient water supply over the whole year and consequently site-specific limitation of wheel loads and pull, as well as adapted tyres.*
Keywords: *fens, trafficability, load-bearing capacity, load input*

1 Erfordernisse zur Erhaltung von Niedermooren

Niedermoore nehmen in Deutschland eine Fläche von etwa 1 Mio ha ein, darunter 450.000 ha in Nordostdeutschland. Diese Standorte erfüllen wichtige ökologische Funktionen als Wasser- und Nährstoffspeicher sowie als Lebensraum für Pflanzen- und Tierarten. Die Erhaltung der Niedermoore erfordert ganzjährig eine ausreichende Wasserversorgung mit Grundwasserflurabständen von höchstens 30 cm und Bodenfeuchten von $\varphi_B \geq 70$ Vol.-%. Für angepaßte Formen der gegenwärtig vorherrschenden Grünlandbewirtschaftung ist die Befahrbarkeit von zentraler Bedeutung. Die Belastung der Standorte beim Befahren mit Technik ist auf die standortspezifische Tragfähigkeit der Fahrbahn abzustimmen.

2 Kenntnisstand

2.1 Tragfähigkeit der Fahrbahn Niedermoorgrünland

Beim Befahren wird der Boden mechanisch belastet. Diese Belastung darf die Tragfähigkeit der Fahrbahn nicht überschreiten und soll keine unzulässigen Schäden verursachen [14].

Die Tragfähigkeit der Fahrbahn ist eine komplexe, standortspezifische Größe und kann durch bodenmechanische Kennwerte beschrieben werden.

Bewachsene organische Böden sind hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit im Unterschied zu mineralischen Ackerböden dadurch charakterisiert, daß sich an der Oberfläche eine durchwurzelte Schicht mit hoher Festigkeit befindet, während der darunter liegende Torf eine geringere Festigkeit aufweist [15, 21, 25, 31, 32]. Die Zerstörung der Grasnarbe durch mechanische Belastung führt daher zu einer erheblichen Abnahme der Tragfähigkeit und ist sowohl aus fahrmechanischen als auch aus ökologischen Gründen zu vermeiden. Die kritische Fahrspurtiefe, bei der die Grasnarbe durchbricht, ist abhängig von der Tiefe der durchwurzelten Schicht und beträgt auf Niedermoorgrünland in der Mehrheit der Fälle $t_F = 7$ cm [5, 15].

Die Stabilität der Fahrbahn Niedermoorgrünland ist sowohl von der Vegetation als auch vom Boden abhängig. Als festigkeitsbestimmende Bodeneigenschaften werden in der Literatur die Bodenfeuchte, die Torfart, der Zersetzungsgrad und das Bodenentwicklungsstadium angegeben [20]. Die Bodenfeuchte ist in vielen Gebieten über Meliorationseinrichtungen regulierbar. Bodenfeuchten im Bereich von $\varphi_B \geq 85$ Vol.-% sind in der Regel mit voller Wassersättigung verbunden. Für die weitgehende Vermeidung der Torfmineralisation werden Bodenfeuchten von $\varphi_B \geq 70$ Vol.-% gefordert. Bei Bodenfeuchten von $\varphi_B < 60$ Vol.-% sind Niedermoorstandorte extrem trocken.

Bei der Vegetation sind die Artenzusammensetzung und die Bewuchsdichte für die Festigkeit von Bedeutung [6]. Wird Niedermoorgrünland als Wiese oder Mähweide genutzt und damit befahren, kommen im wesentlichen die fünf Biotoptypen Flutrasen, arme Feuchtwiese, reiche Feuchtwiese, Frischwiese und Seggenried vor [11].

2.2 Mechanische Belastung beim Befahren von Niedermoorgrünland

Die mechanische Belastung beim Befahren umfaßt vertikale und horizontale Komponenten.

Die vertikale Belastung der Fahrbahn erfolgt durch Radlasten und Druck in der Kontaktfläche von Reifen und Boden. Bei Überschreitung kritischer Werte führt sie zur Bodenverformung durch Verdichtungs- und Verlagerungsprozesse. Es entstehen Fahrspuren bis hin zum Durchbruch der Grasnarbe. Die Verdichtung nimmt mit steigender Bodenfeuchte, sinkender Ausgangslagerungsdichte und wachsendem Kontaktflächendruck zu [26, 27, 28]. Die Tiefenwirkung steigt mit der Bodenfeuchte und der Radlast [26, 27]. Mit zunehmender Anzahl von Überrollungen wird der Multi-Pass-Effekt wirksam. Die genannten Wirkungen treten bei wiederholter Belastung in abgeschwächter Form auf, da sich nachlaufende Räder in vorgeformten Spuren bewegen [3]. Auch wenn die zusätzliche Beanspruchung des Bodens mit jeder weiteren Überrollung abnimmt, kann jedes Rad die Überschreitung einer kritischen Belastung bewirken.

In der Literatur finden sich verschiedene Methoden zur Bestimmung der kritischen Belastung auf bewachsenen organischen Standorten, die alle als gemeinsamen Ausgangspunkt die Vermeidung des Durchbruchs der Grasnarbe benutzen. Ein Ansatz besteht in der Berechnung der kritischen Einsinktiefe und Durchbruchlast anhand von bodenmechanischen Kennwerten und Modellen [31, 32]. Andere Methoden beinhalten die empirische Ableitung der maximal möglichen Bodenfeuchte für das Befahren ausgewählter Standorte mit bestimmten Radlasten [21, 24] bzw. beliebigen Radlasten und Reifenbreiten [15].

Bei der Betrachtung der Verdichtungsproblematik sind auf Niedermoorstandorten verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Aufgrund der jahrzehntelangen starken Entwässerung sind die meisten Niedermoore vorgeschädigt, da einerseits Schrumpfung und Sackung direkt zu pedogener Verdichtung führen und andererseits das hierdurch ermöglichte Befahren mit hoher Belastung technogene Verdichtungen verursacht. Die ganzjährige Einhaltung geringer Grundwasserflurabstände auf Niedermooren beugt einer schädlichen Unterbodenverdichtung dadurch vor, daß die Tragfähigkeit der Fahrbahn für ein Befahren mit hohen Radlasten nicht ausreicht. Untersuchungen zur Verdichtung von organischen Böden durch Befahren sind nur für umgebrochene Standorte bekannt. Bei Radlasten von $m_R = 3 \ldots 4{,}8$ t tritt eine Verdichtung im Ober- und Unterboden auf [1, 2, 22]. Aussagen für die vorherrschende Nutzungsform Dauergrünland sind kaum abzuleiten.

Die horizontale Belastung der Fahrbahn erfolgt durch das Aufbringen von Zugkräften, die von den Triebrädern über den Boden abgestützt werden. Der dabei entstehende Schlupf trägt in Abhängigkeit von seiner Höhe ebenfalls zu Bodenverdichtung und Fahrspurbildung bei [18] und führt zum horizontalen Abscheren der Grasnarbe [8, 13, 15, 23]. Letzteres setzt in Abhängigkeit von der Fahrzeugvariante bei einem Schlupf von $\sigma = 10 \ldots 20$ % ein, so daß Zugkräfte entsprechend zu beschränken sind. Damit verbundene maximal zulässige Zugkraftbeiwerte ermöglichen die Berechnung des Zugkraftvermögens für Traktoren, das durch den Zugkraftbedarf von Anhängern und Arbeitsmaschinen nicht überschritten werden darf [15].

Es fehlen umfassende und ausreichend differenzierte Untersuchungen der sehr variablen Fahrbahneigenschaften von Niedermoorgrünland sowie Befahrversuche mit einem weiten Spektrum an unterschiedlichen Kombinationen der Belastungsparameter. Die Kenntnisse zur Bewertung der Befahrbarkeit von Niedermoorgrünland sind somit unzureichend.

3 Ziel und Aufgabe

Als ein Beitrag zu den Bemühungen um die Erhaltung von Niedermooren sind direkt umsetzbare Erkenntnisse zur Befahrbarkeit dieser Standorte bereitzustellen. Dies erfordert zunächst praktisch anwendbare Methoden zur Bewertung der Befahrbarkeit anhand einfach verfügbarer technischer und standortbezogener Daten. Für die Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland sind Belastungsklassen zu erarbeiten, die eine Abschätzung der Belastung durch beliebige Technikvarianten und die Ableitung des zulässigen Einsatzbereiches ermöglichen.

4 Material und Methoden

In umfangreichen standortkundlichen und verfahrenstechnischen Untersuchungen wurde die Befahrbarkeit von Niedermoorgrünland als Ergebnis der Wechselwirkungen von Fahrbahn und Fahrzeug ermittelt. Dafür war zum einen die Bestimmung der vorhandenen Tragfähigkeit der Fahrbahn bei unterschiedlichen Standortbedingungen erforderlich. Zum anderen wurde die erforderliche Tragfähigkeit der Fahrbahn bei unterschiedlichen mechanischen Belastungen durch das Befahren mit Technik ermittelt.

Zur Bestimmung der vorhandenen Tragfähigkeit von Niedermoorgrünland wurden vier repräsentative Versuchsflächen im Land Brandenburg ausgewählt [4, 6]. Die Versuchsflächen unterschieden sich bezüglich der Feuchteverhältnisse und Vegetation und befanden sich wie die Mehrheit der Niedermoore in Deutschland in fortgeschrittenen Stadien der Degradierung. Auf den Versuchsflächen wurden während der Bewirtschaftungszeitspannen von Mitte Juni bis Ende Februar in großer Anzahl Scherfestigkeiten, Kegeleindringwiderstände und Druck-Einsinkungs-Kurven gemessen [6, 29, 30] sowie die zugehörigen festigkeitsbestimmenden Parameter Bodenfeuchte, Biotoptyp [nach 11] und Bewuchsdichte erfaßt. Die Messung der Scherfestigkeit erfolgte mit einer Flügelsonde (GEONOR H-704) [6, 12] in der Bodenschicht zwischen 0 und 14 cm mit drei Wiederholungen je Meßpunkt. Insgesamt gingen etwa 2800 Datensätze in die statistische Auswertung ein [4, 7]. Die Scherfestigkeiten wurden nach Biotoptyp, Bewuchsdichte und Bodenfeuchte klassiert. In Abhängigkeit von der vorgefundenen Häufigkeit der Kombinationen dieser Standortbedingungen lagen für die einzelnen Klassen 20 ... 250 Meßwerte vor, aus denen die mittleren Scherfestigkeiten berechnet wurden.

Zur Ermittlung der erforderlichen Tragfähigkeit des Niedermoorgrünlandes für das Befahren mit Technik wurden umfangreiche Befahrversuche in der Nuthe-Nieplitz-Niederung, im Rhinluch und im Osterfeiner Moor durchgeführt. Zwölf Technikvarianten mit unterschiedlichen Radlasten, Bereifungen, Zugkräften und Überrollhäufigkeiten kamen zum Einsatz (**Tabelle 1**). In den Fahrspuren wurden jene Abschnitte aufgesucht, in denen der Durchbruch der Grasnarbe begann und damit die Grenze der Befahrbarkeit erreicht war. An den entsprechenden Stellen wurden im unbefahrenen Bereich die festigkeitsbestimmenden Faktoren wie botanische Zusammensetzung, Bewuchsdichte und Bodenfeuchte erfaßt und die Festigkeit der Fahrbahn mittels Scherflügel, Penetrometer und Druckstempel bestimmt [6, 29, 30].

Somit konnte für jede der untersuchten Fahrzeugvarianten jene Festigkeit der Fahrbahn ermittelt werden, bei der mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % kein Durchbruch der Grasnarbe erfolgt. Anschließend wurde der statistische Zusammenhang zwischen der erforderlichen Festigkeit der Fahrbahn und den Belastungskennzahlen der Fahrzeugvarianten durch Regressionsanalyse quantifiziert. Die Kennzeichnung der Belastung erfolgte dabei durch die Kenngrößen maximale Radlast im Aggregat, maximaler Druckindex im Aggregat, Summe der Druckindizes in einer Fahrspur und Zugkraftbedarf.

Tabelle 1: Untersuchte Technikvarianten und für das Befahren erforderliche Scherfestigkeiten von Niedermoorgrünland
Table 1: Investigated variants of machinery and required shearing strength of fen grassland

Variante Nr.	Maschinen	maximale Radlast t	Druckindex maximal t/m²	Druckindex Summe t/m²	mittlerer Zugkraftbedarf daN	erforderliche Scherfestigkeit gemessen kPa	erforderliche Scherfestigkeit berechnet
1	Hangtraktor, P_N = 47 kW, m_G = 2,4 t, Terrareifen, mit Trommelmähwerk im Frontanbau, b_A = 2,30 m	0,75	2,40	3,80	-	19	19
2	Hangtraktor, P_N = 47 kW, m_G = 2,4 t, Terrareifen, mit Rundballenpresse, Doppelräder, m_G = 1,0 t	0,75	2,40	6,30	80	20	23
3	Standardtraktor, P_N = 52 kW, m_G = 3,8 t, Doppelräder, mit Frontballast	1,04	1,65	2,50	-	23	20
4	Standardtraktor, P_N = 52 kW, m_G = 4,5 t, Doppelräder, mit Scheibenmähwerk und Aufbereiter im Frontanbau, b_A = 2,80 m	1,66	2,55	3,11	-	26	26
5	Standardtraktor, P_N = 52 kW, m_G = 4,2 t, Einzelräder, mit Scheibenmähwerk und Aufbereiter im Frontanbau, b_A = 2,80 m	1,64	4,65	5,30	-	29	31
6	Unimog, P_N = 92 kW, m_G = 8,2 t, Doppelräder, mit Scheibenmähwerk im Heckanbau, b_A = 2,50 m	2,42	2,85	5,35	-	33	31
7	Unimog, P_N = 92 kW, m_G = 7,2 t, Einzelräder, mit beladenem Kippanhänger, m_G = 4,0 t, Einzelräder	2,10	5,30	16,90	400	35	41
8	Standardtraktor, P_N = 52 kW, m_G = 3,3 t, Doppelräder, mit beladenem Kippanhänger, m_G = 4,0 t, Einzelräder	1,04	4,10	10,00	400	36	32
9	Unimog, P_N = 92 kW, m_G = 7,2 t, Einzelräder, mit zwei unbeladenen Kippanhängern, m_G = 7,0 t, Einzelräder	2,12	5,30	18,10	700	38	41
10	Standardtraktor, P_N = 52 kW, m_G = 3,3 t, Doppelräder, mit beladenem Kippanhänger, m_G = 5,5 t, Einzelräder	1,72	6,75	12,90	550	41	38
11	Unimog, P_N = 92 kW, m_G = 7,2 t, Einzelräder, mit zwei beladenen Kippanhängern, m_G = 13,0 t, Einzelräder	2,10	5,20	23,00	1300	46	42
12	Unimog, P_N = 92 kW, m_G = 7,2 t, Einzelräder, mit beladenem Kippanhänger, m_G = 7,8 t, Einzelräder	2,20	8,10	23,90	780	51	45

P_N - Motornennleistung [kW], m_G - Gesamtmasse [t], b_A - Arbeitsbreite [m]

Der Druckindex DI ist definiert als Quotient aus Radlast m_R und Projektionsfläche des Reifens [9, 19]:

$$DI = \frac{m_R}{b_R * d_R} \qquad (1)$$

Der Druckindex korreliert mit dem Kontaktflächendruck, kann mit einfachen Methoden berechnet werden und eignet sich für die empirische Beschreibung von fahrmechanischen Zusammenhängen. Da die Fahrspurtiefe das Ergebnis von zwei bis sechs Überrollungen durch Traktor- und Anhängerräder ist, gehen Radlasten und Reifenabmessungen in ihrer mehrfachen und maximalen Wirkung in die verwendeten Belastungskennzahlen ein.

Die Abstufung der Belastungsklassen erfolgt auf der Grundlage der berechneten erforderlichen Fahrbahnfestigkeit für zahlreiche typische Technikvarianten der Grünlandbewirtschaftung und steht in Beziehung zur ermittelten biotop- und feuchtespezifischen Tragfähigkeit von Niedermoor.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Tragfähigkeit von Niedermoorgrünland

Die Tragfähigkeit degradierten Niedermoorgrünlandes wird vorrangig von der Grasnarbe bestimmt und ist vor allem von der Vegetationsform, der Bewuchsdichte und der Bodenfeuchte abhängig. Zur Kennzeichnung der Tragfähigkeit hat sich im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen die Scherfestigkeit als geeignet erwiesen [4, 6, 30]. Obwohl damit der Anteil des unterhalb des Grasnarbe liegenden Torfes an der Stabilität der Fahrbahn gegenüber vertikaler Belastung nicht erfaßt wird, kann die Tragfähigkeit hinreichend beschrieben werden. Mit dem Kegeleindringwiderstand ist die Kennzeichnung der vegetations- und feuchtebedingten Unterschiede der Tragfähigkeit unter den spezifischen Bedingungen des Niedermoorgrünlandes aufgrund der punktförmigen Messung nicht möglich, weil die Durchwurzelung gerade in der tragfähigkeitsbestimmenden Schicht zu erheblichen Schwankungen auf kleinster Fläche führt und die anderen Einfußfaktoren überlagert. Der Einsatz des Druckstempels ist zu aufwendig für Großzahlmessungen, die aufgrund der Standortheterogenität erforderlich sind [30].

Zwischen den Scherfestigkeiten von Grünlandbiotopen auf Niedermoor bestehen aufgrund der sehr verschiedenartigen Durchwurzelung erhebliche Unterschiede. Die Scherfestigkeiten sind bei Flutrasen am niedrigsten und nehmen über Feuchtwiesen bis zu den Frischwiesen hin zu, um bei Seggenrieden die höchsten Werte zu erreichen. Innerhalb der Biotoptypen steigen die Scherfestigkeiten mit wachsender Bewuchsdichte und sinken mit zunehmender Bodenfeuchte **(Tabelle 2)**.

Die gemessenen mittleren Scherfestigkeiten auf Niedermooren liegen zwischen $\tau = 15$ kPa für wassergesättigte Flutrasen mit geringer Bewuchsdichte und $\tau = 57$ kPa für dicht bewachsene Seggenriede in trockenen Zeitspannen. Die Tendenzen sind innerhalb der Biotoptypen unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei Feuchtwiesen ist die Scherfestigkeit unabhängig von der Bodenfeuchte gleichbleibend gering.

Für die Abschätzung der Tragfähigkeit von Niedermoorgrünland werden im folgenden die Scherfestigkeiten bei mittleren Bewuchsdichten verwendet, da geringe und hohe Bewuchsdichten selten auftreten.

Die ermittelten Scherfestigkeiten gelten für degradierte Niedermoore und damit für die meisten dieser Standorte. So werden die Niedermoore in Nordostdeutschland generell als degradiert bezeichnet [33]. Die angegebenen Scherfestigkeiten sind nicht übertragbar auf kaum noch vorhandene wachsende Niedermoore, wobei diese für das Befahren nicht relevant sind, da Torfwachstum und Grünlandnutzung einander ausschließen. Die Werte treffen für anthropogen stark überprägte Niedermoore wie Sanddeckkulturen oder aufgelassene Torfstiche mit direkt unter der Grasnarbe anstehenden Mudden ebenfalls nicht zu.

5.2 Zulässige Belastungen

Für die untersuchten Technikvarianten liegen die mindestens erforderlichen Scherfestigkeiten vor, bei denen der Durchbruch der Grasnarbe mit einer Eintreffenswahrscheinlichkeit von 80 % vermieden wird (Tabelle 1).

Die mindestens erforderliche Scherfestigkeit der Fahrbahn für das Befahren steht mit den Belastungskennzahlen der eingesetzten Technikvarianten in Verbindung und kann aus diesen mit folgender Regressionsfunktion abgeschätzt werden:

$$\tau_e = x + a * \ln m_{Rmax} + b * \ln DI_{max} + c * \ln SDI + d * \ln F_{ZB} \qquad B = 0{,}87 \qquad (2)$$

Tabelle 2: Mittlere Scherfestigkeiten auf degradiertem Niedermoorgrünland [nach 4, 7]
Table 2: Selected figures for mean shearing strength of degraded fen grassland

	mittlere Scherfestigkeit kPa											
Biotoptyp	**Flutrasen**			**Feuchtwiesen**			**Frischwiesen**			**Seggenriede**		
Bewuchs-dichte [1)] / **Boden-feuchte Vol.-%**	**gering**	**mittel**	**hoch**	**gering**	**mittel**	**hoch**	**gering**	**mittel**	**hoch**	**gering**	**mittel**	**hoch**
< 60	-	***28***	31	21	***23***	27	33	***45***	50	-	***46***	57
60 ... 70	23	***24***	27	21	***23***	27	33	***39***	44	-	***45***	48
70 ... 80	17	***20***	27	21	***23***	27	28	***36***	44	31	***40***	46
> 80	15	***19***	26	-	***23***	27	22	***31***	44	29	***40***	46

1) Flächendeckungsanteile in den Bewuchsdichteklassen, bezogen auf die verbleibende Stoppel:
gering: < 40 %; mittel: 40 ... 80 %; hoch: > 80 %

Die logarithmischen Ansätze für alle einbezogenen Belastungskenngrößen berücksichtigen den Umstand, daß bei gleichmäßiger Erhöhung der Belastung die Auswirkungen in der Fahrbahn nicht proportional steigen. Die maximale Radlast geht mit dem höchsten Koeffizienten ein, es folgt der maximale Druckindex. Die Funktion weist ein genügendes Bestimmtheitsmaß auf und zeigt eine ausreichende Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten (Tabelle 1). Die durchschnittliche Abweichung der berechneten Werte von den gemessenen Werten beträgt 9 %, in 80 % der Fälle liegt die Abweichung unter 13 %.

Die Regressionsfunktion ermöglicht es, für das Befahren von Niedermoorgrünland mit beliebigen Technikvarianten die mindestens erforderliche Scherfestigkeit zu berechnen und der tatsächlich vorhandenen Scherfestigkeit bei gegebenen Standortbedingungen gegenüberzustellen. Vorgehensweise und Ergebnis sollen anhand von Beispielen verdeutlicht werden:

- Für das Befahren von Niedermoorgrünland mit einem sehr leichten Hangtraktor mit Frontmähwerk (Tabelle 1, Variante 1) ist eine gemessene und gleichermaßen berechnete Scherfestigkeit der Fahrbahn von $\tau \geq 19$ kPa erforderlich. Damit sind Niedermoorstandorte ab mittlerer Bewuchsdichte immer befahrbar, da selbst die wenig tragfähigen Flutrasen und Feuchtwiesen bei voller Wassersättigung Scherfestigkeiten von $\tau \geq 19$ kPa aufweisen (Tabelle 2). Lediglich bei kleinräumig vorkommenden geringen Bewuchsdichten ist ein Durchbruch der Grasnarbe zu erwarten.
- Bei einem Standardtraktor mit Einzelrädern und Frontmähwerk (Tabelle 1, Variante 5) beträgt die gemessene erforderliche Scherfestigkeit $\tau \geq 29$ kPa und die berechnete erforderliche Scherfestigkeit $\tau \geq 31$ kPa. Bei mittleren Bewuchsdichten reicht die Tragfähigkeit von Flutrasen und Feuchtwiesen dafür auch bei sehr niedrigen Bodenfeuchten nicht aus, während die tragfähigen Frischwiesen und Seggenriede in allen Feuchtebereichen befahrbar sind (Tabelle 2). Bei Ausstattung des Traktors mit Doppelrädern (Tabelle 1, Variante 4) verringern sich der maximale Druckindex und die Summe der Druckindizes. Damit sinkt sowohl die gemessene als auch die berechnete erforderliche Scherfestigkeit auf $\tau \geq 26$ kPa. Diese Variante ist zusätzlich auf Flutrasen in sehr trockenen Zeitspannen einsetzbar (Tabelle 2).
- Für einen Unimog mit Grünlandreifen und zwei beladenen Kippanhängern (Tabelle 1, Variante 11) liegt die gemessene erforderliche Scherfestigkeit bei $\tau \geq 46$ kPa und die berechnete erforderliche Scherfestigkeit bei $\tau \geq 42$ kPa. Damit ist ausschließlich ein Befahren von Frischwiesen und Seggenrieden in trockenen Zeitspannen möglich (Tabelle 2). Die Differenz zwischen gemessener und berechneter erforderlicher Scherfestigkeit wirkt sich hinsichtlich der Befahrbarkeitsabschätzung lediglich auf diesen beiden Biotoptypen in trockenen Zeitspannen mit Bodenfeuchten von $\varphi_B \leq 70$ Vol.-% aus.

Anhand standortkundlicher und technischer Daten kann somit die Befahrbarkeit von Niedermoorgrünland abgeschätzt werden.

5.3 Belastungsklassen

Anhand der berechneten erforderlichen Scherfestigkeiten für Technikvarianten zur Grünlandbewirtschaftung in Verbindung mit den vegetations- und feuchtebedingt gegebenen Scherfestigkeiten der Niedermoorstandorte erfolgt die Abstufung von Belastungsklassen (**Tabelle 3**). Die erforderlichen Scherfestigkeiten sind vor allem mit bestimmten maximalen Radlasten eng verbunden, so daß diese ergänzend zur Einstufung herangezogen werden können. Die Vermeidung schlupfbedingter Schäden erfordert zusätzlich eine Begrenzung des Zugkraftbedarfs von Anhängern und Arbeitsmaschinen, da dieser auf das Zugkraftvermögen der Traktoren abgestimmt sein muß.

Die Belastungsklassen ermöglichen die Abschätzung der Belastung durch Technikvarianten aus leicht verfügbaren technischen Daten und die Zuordnung des möglichen Einsatzbereiches auf Niedermoorgrünland (**Tabelle 4**).

Die Belastungen in der Klasse 1 sind sehr gering. Damit können wenig tragfähige Biotoptypen wie Feuchtwiesen und Flutrasen bei voller Wassersättigung befahren werden. Diese Standorte sind weniger häufig, oft aber aus naturschutzfachlicher Sicht besonders wertvoll. Da keine nennenswerten Zugkräfte aufgebracht werden können, ist die Bergung des Aufwuchses auf diesen Extremflächen nur mit Handarbeitsverfahren, Bergeplanen oder Ladegabeln am Traktor möglich.

Technik der Klasse 2 ist durch geringe Belastungen gekennzeichnet. Dazu gehört leichte Standardtechnik mit breiten Niederdruckreifen oder Doppelrädern an allen Achsen. Damit können wenig tragfähige Biotoptypen wie Flutrasen und Feuchtwiesen bei torfkonservierenden Bodenfeuchten befahren werden.

Der Klasse 3 ist Technik mit mittleren Belastungen zuzuordnen, die sich für das Befahren der weit verbreiteten Frischwiesen bei voller Wassersättigung sowie von Flutrasen in sehr trockenen Zeitspannen eignet. Um diese Klasse zu erreichen, müssen neben der Begrenzung der Maschinenmassen häufig die Fahrwerke von Anhängern und angehängten Arbeitsmaschinen angepaßt werden.

Der Einsatz von Technik der Klasse 4 ist mit hohen Belastungen verbunden. Die erforderlichen Scherfestigkeiten kommen nur bei den Biotoptypen Frischwiese und Seggenried vor, wobei erstere dann nicht mehr wassergesättigt sind. Infolge hoher Radlasten erreichen nur wenige selbstfahrende Erntemaschinen und Quadergroßballenpressen diese Klasse.

Für den Einsatz von Technik mit sehr hohen Belastungen in Klasse 5 müssen auf den Frischwiesen die Grundwasserstände übermäßig abgesenkt werden, während Feuchtwiesen und Flutrasen selbst in trockenen Zeitspannen nicht die entsprechende Tragfähigkeit aufweisen. Zu dieser Klasse gehören Aggregate mit einachsigen Quadergroßballenpressen, Transporteinheiten mit schweren Kippanhängern, Plattformwagen oder Ballenladewagen sowie die meisten selbstfahrenden Mäher, Feldhäcksler und Quadergroßballenpressen. Der Einsatz dieser Technik auf Niedermoorgrünland kann nur durch starke Absenkung des Grundwassers und damit weitere Degradierung dieser Standorte erzwungen werden.

Mit Aggregaten, deren Belastungskennzahlen die Richtwerte der Klasse 5 überschreiten, sind Niedermoorstandorte auch in trockenen Zeitspannen nicht befahrbar.

Tabelle 3: Belastungsklassen für Technik zur Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland
Table 3: Classes of load input for machinery working on fen grasslands

Belastungsklasse	Bewertung der Belastung	erforderliche Scherfestigkeit der Fahrbahn kPa	maximale Radlast t	mittlerer Zugkraftbedarf daN
1	sehr gering	≤ 20	≤ 0,9	0
2	gering	> 20 ... ≤ 26	> 0,9 ... ≤ 1,2	< 0 ... ≤ 500
3	mittel	> 26 ... ≤ 31	> 1,2 ... ≤ 1,8	> 500 ... ≤ 900
4	hoch	> 31 ... ≤ 36	> 1,8 ... ≤ 2,5	> 900 ... ≤ 1500
5	sehr hoch	> 36 ... ≤ 46	> 2,5 ... ≤ 4,0	> 1500 ... ≤ 2200

Tabelle 4: Ausgewählte Technikvarianten in den Belastungsklassen
Table 4: Selected variants of machinery in classes of load-input

Be-lastungs-klasse	Traktoren, Selbstfahrer	Arbeitsmaschinen, Geräte, Anhänger	Bereifung
1	Standardtraktor, $P_N \leq 50$ kW, $m_G \leq 3$ t, Hangtraktor, $P_N \leq 50$ kW, $m_G \leq 2$ t, Einachstraktoren, Raupenfahrzeuge	Rotationsmähwerk im Frontanbau, $b_A \leq 2{,}50$ m; Rotationsmähwerk im Heckanbau, $b_A \leq 2{,}00$ m; Doppelmessermähwerk, $b_A \leq 5{,}80$ m, Bergeplanen, Ladegabeln	Breit-/Doppelreifen
2	Standardtraktor, $P_N \leq 60$ kW, $m_G \leq 4$ t	Rotationsmähwerk im Frontanbau, $b_A \leq 3{,}00$ m; Rotationsmähwerk im Heckanbau, $b_A \leq 2{,}50$ m	Breit-/Doppelreifen
	Standardtraktor, $P_N \leq 50$ kW, $m_G \leq 3$ t	Rundballenpressen, $m_G \leq 1{,}5$ t; Ladewagen mit Tandemachse, $m_G \leq 2{,}5$ t, $V_L \leq 10$ m³	Breit-/Doppelreifen
3	Standardtraktor, $P_N \leq 80$ kW, $m_G \leq 5$ t	Anhängemähwerke, $b_A \leq 3{,}20$ m; Rotationsmähwerke in Kombination, $b_A \leq 4{,}50$ m	Breit-/Doppelreifen
	Standardtraktor, $P_N \leq 60$ kW, $m_G \leq 4$ t	Rundballenpressen, $m_G \leq 2{,}5$ t; Ladewagen mit Tandemachse, $m_G \leq 4$ t, $V_L \leq 15$ m³	Breit-/Doppelreifen
4	Standardtraktor, $P_N \leq 60$ kW, $m_G \leq 4$ t	zweiachsige Anhänger, $m_G \leq 6{,}5$ t	Breit-/Doppelreifen
	Standardtraktor, $P_N \leq 80$ kW, $m_G \leq 5$ t	Ladewagen mit Tandemachse, $m_G \leq 6{,}5$ t, $V_L \leq 21$ m³	Breit-/Doppelreifen
	Standardtraktor, $P_N \leq 100$ kW, $m_G \leq 6$ t	Quadergroßballenpresse mit Tandemachse, $m_G \leq 6{,}5$ t	Breit-/Doppelreifen
	selbstfahrende Ernte-maschinen, $m_G \leq 7$ t	-	Breitreifen
5	Standardtraktor, $P_N \leq 100$ kW, $m_G \leq 6$ t	Quadergroßballenpressen mit Einzelachse, $m_G \geq 5$ t;	Standard-/Breitreifen
		zweiachsige Anhänger, $m_G \leq 11$ t, auch im Doppelzug;	Standard-/Breitreifen
		Ladewagen mit Tandemachse, $m_G \leq 14$ t, $V_L \leq 30$ m³	Standard-/Breitreifen
	selbstfahrende Ernte-maschinen, $m_G \leq 12$ t	-	Standard-/Breitreifen

P_N - Motornennleistung [kW], m_G - Gesamtmasse [t], b_A - Arbeitsbreite [m], V_L - Ladevolumen [m³] (nach DIN 11741)

5.4 Tendenzen bei der Einstufung in Belastungsklassen

Aufgrund der zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten und unterschiedlichen technischen Daten von Maschinen für die Grünlandbewirtschaftung kann an dieser Stelle nur auf eine beschränkte Auswahl von Technikvarianten eingegangen werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Aggregaten, die bei entsprechender Zusammenstellung und Fahrwerksgestaltung den Grenzbereich der Belastungsklassen verdeutlichen. Im folgenden sollen einige Tendenzen bei veränderten Ausgangsdaten erläutert werden.

In den angeführten Beispielen sind der Antriebsleistungsbedarf der Arbeitsmaschinen und die Motornennleistung der Traktoren aufeinander abgestimmt. So sind z.B. bei der Begrenzung der Arbeitsbreiten von

Mähwerken oder des Ladevolumens bei Ladewagen die Belastungskennzahlen der Arbeitsmaschinen in Verbindung mit denen eines passenden Traktors berücksichtigt. In der Praxis werden dagegen häufig Traktoren mit höherer Motornennleistung eingesetzt als für die gekoppelten Arbeitsmaschinen erforderlich wäre. Aufgrund der damit verbundenen höheren Masse der Traktoren würde eine solche Übermotorisierung zur Einstufung des Aggregats in die nächsthöhere Belastungsklasse führen.

Die Begrenzung der Maschinenmassen in den verwendeten Beispielen sind in Verbindung mit Breit- oder Doppelreifen gültig, durch die die Reifenbreite gegenüber Standardreifen mindestens auf 150 % vergrößert wird. Bei Standardbereifung würden die aufgeführten Technikvarianten in die nächsthöhere Belastungsklasse einzuordnen sein bzw. müßten für den Verbleib in der gleichen Belastungsklasse die Radlasten verringert werden.

Durch Ausstattung von Aggregaten mit Breitreifen wird jedoch nicht zwangsläufig die jeweils niedrigere Belastungsklasse erreicht, da die Radlast in die Regressionsfunktion zur Berechnung der erforderlichen Scherfestigkeit mit der höchsten Wichtung eingeht. Breite Bereifung wird daher nur in Verbindung mit angepaßten Radlasten wirksam. Dies verdeutlichen z.B. die Varianten der Belastungsklasse 5, die aufgrund der hohen Radlasten auch mit breiter Bereifung in diese Klasse einzustufen sind.

Darüberhinaus müssen alle Achsen eines Aggregats ausreichend bereift sein. Arbeitsmaschinen und Anhänger stellen häufig die Räder mit dem maximalen Druckindex und haben erheblichen Anteil an der Summe der Druckindizes. Gerade die leichteren Arbeitsmaschinen wie Wender, Schwader, Anhängemähwerke und Rundballenpressen verfügen oft über zu schmale Räder, die dann trotz geringer Radlasten einsinken. Auch Anhänger sind häufig ungenügend bereift.

Die Begrenzung der maximalen Radlasten in den einzelnen Belastungsklassen schließt gleichzeitig die Entstehung dauerhafter schlupfbedingter Schäden aus. Der Zugkraftbedarf der Anhänger und Arbeitsmaschinen liegt unter dem Zugkraftvermögen, das Allradtraktoren auf Niedermoorgrünland mit dem maximal zulässigen Zugkraftbeiwert von $\kappa = 0{,}49$ erreichen. Das gilt sowohl bei Rollwiderstandsbeiwerten von $\rho = 0{,}39$ bei geringer und mittlerer Tragfähigkeit der Fahrbahn, die bis zur Belastungsklasse 3 vorhanden ist, als auch bei Rollwiderstandsbeiwerten von $\rho = 0{,}1$ bei hoher Tragfähigkeit der Fahrbahn, wie sie ab Belastungsklasse 4 gegeben sein muß [15].

Die höchsten Belastungen beim Befahren von Niedermoorgrünland werden durch die Transportaggregate verursacht. Neben den maximalen Radlasten tragen hier auch die sonst oft untergeordneten Belastungen durch Mehrfachüberrollung und Aufbringen von Zugkräften in erheblichem Maße zur kritischen Gesamtbelastung bei. Die möglichen maximalen Radlasten sind daher meist niedriger als bei Aggregaten mit Arbeitsmaschinen oder bei Selbstfahrern. Um die möglichen Lademassen innerhalb einer Belastungsklasse auszuschöpfen, muß die Gesamtmasse auf möglichst viele Räder verteilt werden. Ladewagen, Ballenladewagen oder sonstige Anhänger sollten daher nicht mit einachsigen Fahrwerken eingesetzt werden.

5.5 Betrachtungen zur Technikauswahl

Die Belastungsklassen bilden eine Grundlage für die funktionelle Bewertung von Verfahren zur Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland. Fundierte Empfehlungen zur Technikauswahl erfordern eine umfassende Gesamtbewertung, die neben der Funktionsbewertung auch eine Leistungs- und Aufwandsbewertung beinhaltet [10, 15, 16].

Eine standortspezifische Begrenzung der mechanischen Belastung beim Befahren von Niedermoorgrünland limitiert gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Aggregate. Damit erhöhen sich zum einen die Lohnkosten infolge des zunehmenden Arbeitszeitaufwandes. Zum anderen können insbesondere in Großbetrieben auch die Maschinenkosten steigen, weil für die Erfüllung des gleichbleibenden Kapazitätsanspruches mehr Aggregate benötigt werden, die dann einen geringeren jährlichen Einsatzumfang haben. Die Anpassung von Fahrwerken z.B. durch Ausstattung mit Tandemachsen und Breitreifen trägt ebenfalls zur Erhöhung der Maschinenkosten bei [10, 15, 16].

Die Möglichkeit zur Senkung der Verfahrenskosten begründet den nach wie vor ungebrochenen Trend zum Einsatz von Technik mit wachsender Leistungsfähigkeit und immer höheren Belastungskennzahlen. So ist der vorhandene Technikbestand landwirtschaftlicher Betriebe in großen Niedermoorgebieten Brandenburgs überwiegend den Belastungsklassen 4 und 5 zuzuordnen und verursacht hohe bis sehr hohe Belastungen [17]. Damit besteht zwangsläufig die Notwendigkeit zur starken Absenkung der Grundwasserstände während der Bewirt-

schaftungszeitspannen mit den entsprechenden negativen Folgen für die Niedermoorstandorte.

Ein verbesserter Schutz von Niedermooren durch die Sicherung einer ganzjährig ausreichenden Wasserversorgung erfordert die Anpassung der Bewirtschaftungstechnik an die veränderten Standortbedingungen. Die Verfahrenskosten sind bisher nur teilweise bestimmt und werden im Rahmen der administrativen Regelungs- und Fördermaßnahmen unzureichend berücksichtigt. Auf der Grundlage der vorliegenden Belastungsklassen kann nun die Kalkulation der Verfahrenskosten für die unterschiedlichen Biotoptypen und Vernässungsstadien erfolgen und in Konzepte für den Schutz und die Nutzung von Niedermooren eingehen.

Die Technik zur Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland ist in landwirtschaftliche Betriebe mit unterschiedlichen Strukturen, natürlichen Standortbedingungen und Nutzungsformen der Niedermoorflächen einzuordnen. Empfehlungen zur Technikausstattung für landwirtschaftliche Betriebe erfordern daher eine Gesamtbewertung der Verfahren auf betrieblicher Ebene [16].

6 Schlußfolgerungen

Belastungsklassen für Technik zur Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland ermöglichen die Abschätzung der mechanischen Belastung beim Befahren und die Ableitung der erforderlichen Standortbedingungen. Sie bilden eine Grundlage für die funktionelle Bewertung von Verfahren. Der Einsatz der gegenwärtig praxisüblichen leistungsfähigen Technik auf Niedermoorgrünland ist überwiegend mit hohen und sehr hohen Belastungen verbunden und meist nur unter Inkaufnahme der weiteren Degradierung dieser Standorte möglich. Die Erhaltung der Niedermoore erfordert ganzjährig eine ausreichende Wasserversorgung und damit eine standortspezifische Begrenzung von Radlasten und Zugkräften sowie angepaßte Bereifungen. Die damit verbundenen Aufwendungen sind zu quantifizieren und in eine Gesamtbewertung von Verfahren der Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland einzubeziehen.

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Maßeinheit
b_A	Arbeitsbreite	[m]
b_R	Reifenbreite	[m]
B	Bestimmtheitsmaß	-
d_R	Reifendurchmesser	[m]
DI	Druckindex	[t/m²]
DI_{max}	maximaler Druckindex im Aggregat	[t/m²]
φ_B	Bodenfeuchte	[Vol.-%]
F_{ZB}	Zugkraftbedarf	[kN, daN]
κ	Zugkraftbeiwert	-
m_G	Gesamtmasse	[t]
m_R	Radlast	[t]
m_{Rmax}	maximale Radlast im Aggregat	[t]
P_N	Motornennleistung	[kW]
ρ	Rollwiderstandsbeiwert	-
σ	Schlupf	[%]
SDI	Summe der Druckindizes in einer Fahrspur	[t/m²]
t_F	Fahrspurtiefe	[cm]
τ	Scherfestigkeit	[kPa]
τ_e	erforderliche Scherfestigkeit der Fahrbahn	[kPa]
V_L	Ladevolumen	[m³]

Literatur

[1] Alakukku, L.: Persistance of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. in: Soil and Tillage Research 37 (1996), S. 211 ... 222

[2] Alakukku, L.: Persistance of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. in: Soil and Tillage Research 37 (1996), S. 223 ... 238

[3] Bekker, M.G.:Introduction to terrain-vehicle systems. Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1969, 846 S.

[4] Knieper, M.; Zeitz, J.; Lehramp, H. Arbeitsunterlagen, Berlin, 1999, unveröff.

[5] Kraschinski, S.; Prochnow, A.; Tölle, R.: Assessing trafficability of fens by ground and vehicle parameters. in: Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, Part 2, Oslo, 1998, S. 752 ... 753

[6] Kraschinski, S.; Prochnow, A.; Tölle, R.; Hahn, J.: Standort- und fahrzeugspezifische Grenzwerte für das Befahren von Niedermoorgrünland. in: Tagung Landtechnik 1998 Garching, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 197 ... 202

[7] Kraschinski, S.; Prochnow, A.; Tölle, R.: Arbeitsunterlagen, Berlin, 1999, unveröff.

[8] Krieger, R.; Klose, H.-U. : Ackerschleppertreibradreifen für den Universaleinsatz mit besonderer Grünlandeignung. in: LANDTECHNIK 1991, Kurzfassung der Vorträge, Braunschweig, 1991, S. 112 ... 115

[9] Kuipers, H.; van de Zande, J.C.: Quantification of traffic systems in crop production. in: Soane, B.D.; van Ouwerkerk, C.: Soil compaction in crop production. Elsevier Science, Amsterdam, 1994, S. 417 ... 445

[10] Müller, M.; Prochnow, A.: Zur Bewertung von Maschinen und Verfahren in der Pflanzenproduktion. Agrartechnische Forschung 2 (1996) 1, S. 70 ... 77

[11] N.N.: Biotopkartierung Brandenburg - Kartierungsanleitung. 2. Auflage, Hrsg. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 1995, 128 S.

[12] N.N.: Operating Instructions 14.08 Medium Weight Vane Tester, Eijkelkamp Agrisearch Equipment, NL-6987 Giesbeek

[13] Ott, A.: Schlupf auf Wiesen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), FAT-Berichte, Nr. 403, 1991

[14] Petelkau, H.: Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen. in: Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlußfolgerungen für die gute fachliche Praxis. KTBL-Arbeitspapier Nr. 266, Darmstadt, 1998, S. 56 ... 79

[15] Prochnow, A.: Verfahrenstechnische Grundlagen für die großflächige Landschaftspflege am Beispiel der Nuthe-Nieplitz-Niederung. Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 265, Dissertation, Berlin, 1994

[16] Prochnow, A.; Bednarz, H.; Hahn, J.: Bewertung von Technik und Verfahren für die Bewirtschaftung von Niedermoorgrünland. in: Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung– Methoden, Indikatoren, Fallbeispiele. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 21, Potsdam-Bornim, 1998, S. 62 ... 69

[17] Prochnow, A.: Bewertung des Technikbestandes landwirtschaftlicher Betriebe in großen Niedermoorgebieten Brandenburgs. in Vorbereitung

[18] Raghavan, G.S.V.; McKyes, E.; Chasse, M.: Effect of wheel slip on soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research 22 (1977) 1, S. 79 ... 83

[19] Renius, T., zitiert in Bolling, I.: Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. in: Landtechnik 39 (1984) 10, S. 449 ... 452

[20] Schmidt, W.: Zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Torfen und Mudden. in: Wissenschaftlich-Technische Informationen für das Meliorationswesen, Heft 61, Bad Freienwalde, 1980, S. 28 ... 41

[21] Schmidt, W.; Rohde, S.: Untersuchungen zur Befahrbarkeit von Niedermoorgrasland. in: Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 30 (1986) 1, S. 25 ... 35

[22] Schmidt, W.; Rohde, S.: Untersuchungen zur Wirkung von Raddruck auf die Lagerungsdichte von Niedermoorboden. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 30 (1986) 1, S. 37 ... 44

[23] Schmidt, W.; Rohde, S.: Wechselbeziehungen zwischen dem Roll- und Zugkraftverhalten großvolumiger Niederdruckreifen und Fahrbahneigenschaften von Niedermoorgrasland. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 30 (1986) 1, S. 45 ... 49

[24] Schmidt, W.: Einfluß der Wiedervernässung auf physikalische Eigenschaften des Moorkörpers der Friedländer Großen Wiese. in: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 36 (1995) 3, S. 107 ... 112

[25] Soane, B.D.:The role of organic matter in soil compaction. Journal of the Science of Food and Agriculture 45 (1988) 2, S. 134 ... 135

[26] Söhne, W.: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. in: Grundlagen der Landtechnik 3 (1952), S. 51 ... 59

[27] Söhne, W.: Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. in: Grundlagen der Landtechnik 5 (1953), S. 49 ... 63

[28] Söhne, W.: Wechselbeziehungen zwischen Fahrzeuglaufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn. in: Grundlagen der Landtechnik 13 (1961), S. 21 ... 34

[29] Tölle, R.; Prochnow, A.; Kraschinski, S.: Meßverfahren für Bodenbelastung und Befahrbarkeit von Grünland auf Moor. (in russ. Sprache), in: Mechanisazija prozessow w rastenijewodstwe i kormoproiswodstwe - sbornik nautschnych trudov, Teil 2, Novosibirsk, 1998, S. 7...11

[30] Tölle, R.; Prochnow, A.; Kraschinski, S.; Hahn, J.: Meßverfahren zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Niedermoorgrünland. in Vorbereitung

[31] Wong, J.Y.; Garber, M.; Radforth, J.R.; Dowell, J.T.: Characterization of the mechanical properties of muskeg with special reference to vehicle mobility. in: Journal of Terramechanics 16 (1979) 4, S. 163 ... 180

[32] Wong, J.Y.; Radforth, J.R.; Preston-Thomas, J.: Some further studies on the mechanical properties of muskeg in relation to vehicle mobility. in: Journal of Terramechanics 19 (1982) 2, S. 107 ... 127

[33] Zeitz, J.; Vogel, I.; Tölle, R.; Lehrkamp, H.: Entwicklung eines Bewertungsverfahrens und Erarbeitung von Richtlinien zum Schutz der Bodenfunktionen in Niedermooren Brandenburgs. Ökologische Hefte der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin, Heft 8, Berlin, 1997, 154 S.

Das Projekt "Befahrbarkeit von Niedermoorflächen bei Maßnahmen zu deren Schutz und angepaßter Nutzung" wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.
Die Autoren danken für die Unterstützung der Untersuchungen mit Leihmaschinen durch die Firmen Aebi, Kalinke, Krone, John Deere, New Holland, Reform und Welger.