

**„Bedeutung des Mikroreliefs für das Bodenfeuchteregime,  
die floristische Artenvielfalt, den Futterwert und den  
Ertrag von intensiv genutztem Feuchtgrünland auf  
Moorböden in Nordwestdeutschland - FeuMoN“**

**FKZ: 37342/01 und /02**

**Ergebnisbericht für den Zeitraum 1.5.21 – 30.04.23**

**und Endbericht**

Prof. Dr. C. Leuschner, A. Mroncz

Lehrstuhl Pflanzenökologie, Universität Göttingen

Prof. Dr. J. Isselstein

Lehrstuhl Graslandwissenschaft, Universität Göttingen

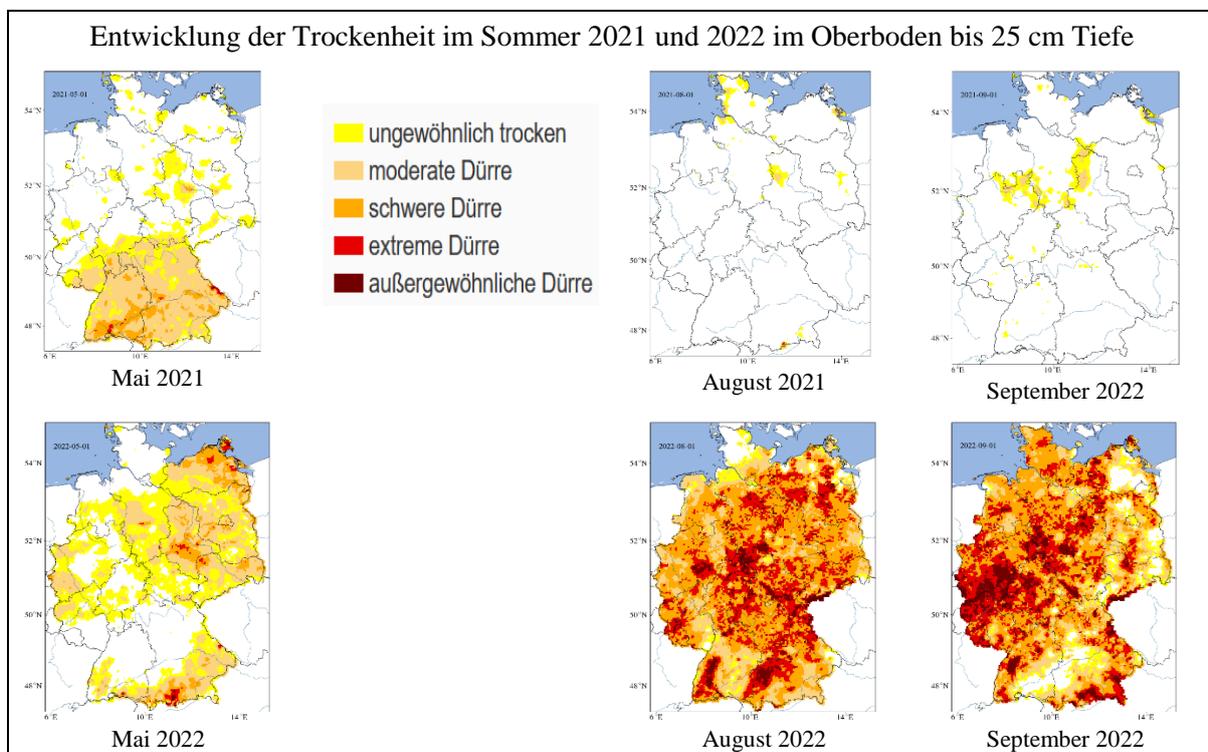
30.06.2023

# Inhalt

<b>1. Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>	3
<b>2. Untersuchungsgebiete</b>	4
<b>3. Arbeitspakete und angewendete Methoden</b>	5
3.1 AP1 - Kartierung des Mikroreliefs und Bodenfeuchtemessung	8
3.2 AP2 - Vegetationsaufnahme, Ertragsmessung und Futterqualitätsanalyse	9
<b>3.3 Auswertung der Daten</b>	10
<b>4. Ergebnisse und Diskussion</b>	12
4.1 Standörtliche Variation innerhalb der Schläge	12
4.2 Einfluss von Geländehöhe und Bodenfeuchte auf den Aufwuchs	16
4.3 Kartographische Darstellung der kleinräumigen Standortvariabilität	22
4.4 Einfluss von pflanzlicher Diversität und Aufwuchsmenge auf die Qualität des Aufwuchses	28
<b>5. Zusammenfassende Bewertung</b>	29
<b>Anhang I: Workflow in R-Studio</b>	33
<b>Anhang II: Workflow in Agisoft Metashape Professional</b>	34
<b>Anhang III: Workflow in ArcGIS Pro</b>	35
<b>Anhang IV: Verhältnis Gräser-Kräuter-Leguminosen auf den Flächen 7/1, 7/3 und 12/2+3 für 2021</b>	36
<b>Anhang V: Gesamtartenliste für die Flächen 7/1, 7/3, 12/2 &amp; 12/3 in 2022</b>	37
<b>Anhang V: Wissenschaftliche Veröffentlichung aus dem Projekt (Mroncz et al.)</b>	45

## 1. Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das übergreifende Ziel des FeuMoN-Projektes war es zu untersuchen, ob bzw. in welchem Maß das Mikorelief das Bodenfeuchteregime, die floristische Artenvielfalt, den Ertrag und die Futterqualität im intensiv genutzten Feuchtgrünland Norddeutschlands beeinflusst. Diese Fragestellung wurde insbesondere nach den schweren Trockenschäden im Grünland während der extremen Trockenheit in den Sommern 2018 und 2019 aufgeworfen, die viele Landwirte vor große Probleme bei der Grünlandbewirtschaftung gestellt hat. Grundlage der in FeuMoN durchzuführenden Untersuchungen war es, zunächst das Mikorelief möglichst genau in den einzelnen Versuchsflächen kartographisch darzustellen. Die folgenden bodenkundlichen, botanischen und agronomischen Detailuntersuchungen in den Grünlandparzellen wurden in den beiden Sommern 2021 und 2022 erfolgreich durchgeführt und haben die kleinräumige Heterogenität in den Schlägen eindrucksvoll dokumentiert. Der Sommer 2021 war ausgesprochen feucht, so dass lokale Oberbodenaustrocknung kaum auftrat. Der Sommer 2022 dagegen war in ganz Deutschland vor allem in der zweiten Sommerhälfte durch ausgeprägte Bodentrockenheit gekennzeichnet, so dass ein direkter Vergleich zwischen einem ausgesprochen feuchten und einem trockenen Sommer möglich war. Die Entwicklung der Trockenheit im Oberboden im Sommer 2021 und 2022 über die jeweiligen Messmonate hinweg wird aus *Abb. 1* deutlich.



**Abbildung 1:** Dürremonitoring für Deutschland im Oberboden bis 25 cm für die Sommermonate Mai, August und September 2021|22. Quelle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ-Dürremonitoring (2022).

## 2. Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete befinden sich in Nordwestniedersachsen in der Wesermarsch und umfassen 11 bzw. 4 Grünlandflächen von zwei Betrieben auf Moorboden mit hohem organischen Kohlenstoffgehalt im Oberboden. Die landwirtschaftliche Nutzung ist intensiv. Die beiden ausgewählten Betriebe liegen östlich von Bremen in der Nachbarschaft von Bremervörde (im folgendem als Betrieb 7 und Betrieb 12 bezeichnet). Die Grünlandflächen von Betrieb 7 haben eine leichte Gruppen-Struktur, die eher charakteristisch für Marschböden ist, während die Flächen des Betriebes 12 eher eben sind, jedoch auch schwache Höhengradienten aufweisen. In *Tab. 1* sind die Untersuchungsflächen (UF) mit ihren Bezeichnungen und nahegelegenen Ortschaften sowie deren Größe [in ha] aufgelistet. Im Sommer 2022 wurde die Beprobung auf die Flächen 7/1, 7/3, 12/2 und 12/3 reduziert, da sich bereits im Zwischenbericht vom Mai 2022 diese Flächen als weitgehend repräsentativ für das Flächenensemble und das ausgeprägte Relief herausgestellt haben. Diese Untersuchungsflächen sind in *Tab. 1* noch einmal **fett** hinterlegt.

**Tabelle 1:** Auflistung der Untersuchungsflächen (UF) mit ihren jeweiligen Bezeichnungen und nahegelegenen Ortschaften sowie deren GPS-Koordinaten und Größen in Hektar

	Bezeichnung der UF	Nahegelegene Ortschaft	GPS-Koordinaten	Größe der UF [ha]
Moor mit Marschcharakter	<b>Betrieb 7/1</b>	<b>Fahrendahl</b>	<b>9,0428827°O 53,4241236°N</b>	<b>0.34</b>
	Betrieb 7/2	Oberklenkendorf	9,0963046°O 53,4056303°N	0.35
	<b>Betrieb 7/3</b>	<b>Oberklenkendorf</b>	<b>9,0971419°O 53,4065186°N</b>	<b>0.34</b>
	Betrieb 7/4	Minstedt	9,1090443°O 53,4279558°N	0.3
	Betrieb 7/5	Minstedt	9,1090057°O 53,4282636°N	0.34
Moor	Betrieb 12/1	Gnarrenburg	9,0670331°O 53,4093771°N	0.20
	<b>Betrieb 12/2</b>	<b>Gnarrenburg</b>	<b>9,0658187°O 53,4105896°N</b>	<b>0.17</b>
	<b>Betrieb 12/3</b>	<b>Gnarrenburg</b>	<b>9,0651161°O 53,4113803°N</b>	<b>0.20</b>
	Betrieb 12/4	Klenkendorf	9,0464366°O 53,3930206°N	0.16
	Betrieb 12/5	Klenkendorf	9,0382020°O 53,3952284°N	0.29
	Betrieb 12/6	Gnarrenburg	9,0680458°O 53,4098570°N	0.18

### **3. Arbeitspakete und angewendete Methoden**

Auf den 11 bzw. 4 Untersuchungsflächen der zwei Betriebe wurden folgende Erhebungen durchgeführt: Bodenfeuchtemessungen im Oberboden, Vegetationsaufnahmen, Futterqualitätsschnitte und Höhenmessungen des Reliefs in einem festgelegten Rasterbeprobungssystem. Zusätzlich erfolgte eine Befliegung mit einer Drohne im Sommer 2021, um RGB-Aufnahmen von den jeweiligen Flächen anzufertigen.

#### *Untersuchungsjahr 2021*

Es wurden insgesamt 4 Messkampagnen in der Vegetationsperiode 2021 zur gravimetrischen Ermittlung der Feuchte des Oberbodens durchgeführt. Die jeweiligen Zeiträume waren 26. bis 29. Mai, 1. bis 3. Juli, 5. bis 9. August und 23. bis 25. September 2021. Die Futterqualitätsschnitte wurden an drei Terminen im Mai, Juli und August, jeweils kurz vor der Beerntung der Schläge durch die Landwirte/-innen, vorgenommen. Die Vegetationsaufnahmen wurden einmalig im Juli von Dr. Anja Schmitz (Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Abt. Graslandwissenschaft) und die Drohnenbefliegung der Flächen im August von Christiane Münter (Technische Mitarbeiterin, Abt. Pflanzenbau) durchgeführt. Die Einmessungen der Probestellen (XYZ-Werte) wurden ebenfalls einmalig im August durchgeführt. Diese Einmessungen wurden zudem als Grundlage für die Monate Mai, Juli und September 2021 genutzt, was jedoch zu einigen Ungenauigkeiten führte. Das Wetter vor und während der ersten Messkampagne im Mai war sehr regenreich, so dass teilweise das Wasser auf den Versuchsflächen stand. Im Juli, August und September waren die Wetterverhältnisse wechselnd regnerisch oder heiter. Unmittelbar vor den Messkampagnen lagen jedoch stets regenreiche Tage, die für feuchte bis nasse Verhältnisse auf den Versuchsflächen sorgten, in denen teilweise das Wasser mehrere Zentimeter oberhalb der Geländeoberkante stand. Die genauen Werte zu Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Sonnenscheindauer in den jeweiligen Versuchsmonaten 2021 können der *Tab. 2* entnommen werden.

#### *Untersuchungsjahr 2022*

Im Sommer 2022 wurden insgesamt 3 Messkampagnen zur gravimetrischen Ermittlung der Feuchte im Oberboden durchgeführt. Die entsprechenden Zeiträume waren 04. bis 06. Mai, 16. bis 17. August und 12. bis 13. September 2022. Die Futterqualitätsschnitte wurden im Mai und im August vorgenommen. Die Schnitte im August erfolgten jedoch etwa 1-2 Wochen nach der letzten Beerntung durch die Landwirte/-innen, so dass die Ernteerträge, aufgrund der niedrigen

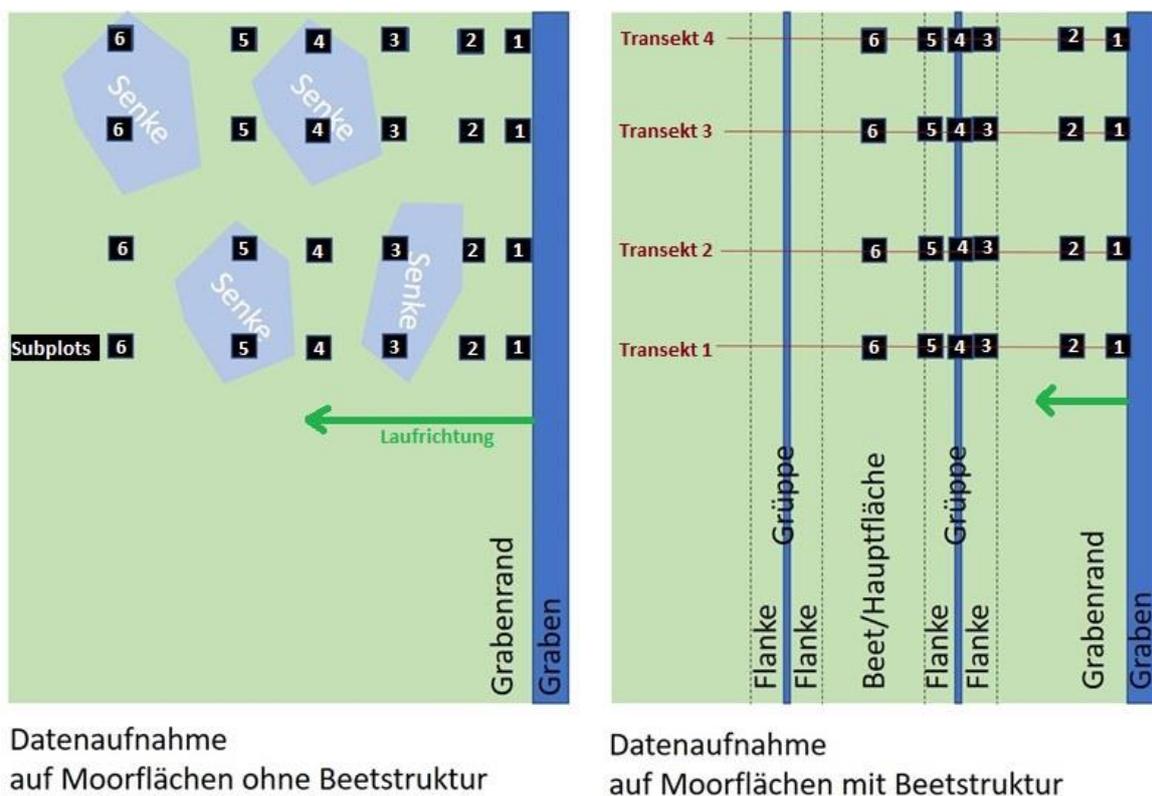
Schnitthöhe, im Vergleich nur relativ niedrig ausgefallen sind. Die Vegetationsaufnahmen wurden einmalig im September von Sally Lott (Doktorandin, Abt. Pflanzenökologie und Ökosystemforschung) durchgeführt. Die Einmessungen der Probepunkte (XYZ-Werte), an denen Boden für die gravimetrische Ermittlung der Feuchte entnommen wurde, erfolgte 2022 an allen Messkampagnen, da sich herausstellte, dass eine exakte Beprobung der stets gleichen Aufnahmepunkte nicht konstant möglich ist. Durch vorherige Einstechlöcher, abgemähte Markierungsstäbe durch die Landwirte/-innen und/oder das erschwerte Einmessen der Flächen, Transekte und Subplots in den homogenen Grünlandflächen variieren die Probepunkte etwas. Hierbei handelt es sich allerdings um wenige Zentimeter, die jedoch auf die Mikroreliefierung und somit auf die Höhenunterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten einen Einfluss haben könnten. Die Wetterverhältnisse vor und während der ersten Messkampagne im Mai waren relativ trocken und mild. Die Bodenaustrocknung nahm bis zum letzten Messtermin im September immer weiter zu, so dass im August und September sehr klare und sonnenreiche bis heiße Wetterlagen vorherrschten. Die genauen Werte zu Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und Sonnenscheindauer in den jeweiligen Versuchsmonaten 2022 können ebenfalls der *Tab. 2* entnommen werden.

**Tabelle 2:** Klimadaten zur mittleren Temperatur [°C], Niederschlag [mm] und Sonnenscheindauer [h] für die benachbarte Stadt Bremervörde in den Untersuchungsmonaten Mai, Juli, August und September 2021/22 (Wetterkontor, 2021/22)

	Bremervörde (nahe der Untersuchungsflächen)		
Zeitraum	Mittlere Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Sonnenscheindauer [h]
2021/05	10,4	120,4	126
2021/07	18,5	79,4	190,3
2021/08	16,1	115,1	134,5
2021/09	14,9	41,5	120,1
2022/05	13,1	53,8	222,2
2022/8	19,4	20,8	270,7
2022/09	13,5	k.A.	150,1

Das Versuchsdesign wurde, wie in *Abb. 2* dargestellt, so gewählt, dass einerseits möglichst gut das vorhandene Mikrorelief in den Flächen erfasst werden konnte und andererseits das Datenmaterial eine geeignete statistische Auswertung ermöglichte. Hierfür wurden pro Fläche 4 etwa 100 m lange Transekte jeweils vom Grabenrand zur Feldmitte verlaufend festgelegt. Entlang der Transekte wurden jeweils 6 Subplots (Aufnahmequadrate von 0,25 m<sup>2</sup>) dauerhaft

eingrichtet. *Abb. 3* stellt das Versuchsdesign exemplarisch (Aufnahmezeitpunkt: 16. August 2022, auf Versuchsfläche 7/3) dar und verdeutlicht zugleich die Strukturunterschiede innerhalb einer Untersuchungsfläche. Während am Grabenrand (Subplot 1 bis 2) kaum Gras vorhanden ist und dieser Bereich hauptsächlich durch vertrocknete Vegetation und kahle Flecken geprägt ist, ist ab Subplot 3 Richtung Feldinneres eine viel üppigere Grasvegetation vorhanden. Zudem ist in *Abb. 3* direkt hinter dem Transekt eine große Senke zu erkennen, die durch üppige und dunkelgrüne Grasvegetation gekennzeichnet ist. Inmitten dieser Senke befindet sich eine kahle Stelle. Während der Messkampagnen im Sommer 2021 war diese Senke fast dauerhaft mit Wasser gefüllt. Außerdem lässt sich noch erkennen, dass eine generelle Neigung vom erhöhten Grabenrand in Richtung Feld vorhanden ist.



**Abbildung 2:** Versuchsdesign. Untersuchung von 4 Transekten pro Untersuchungsfläche (pro Transekt jeweils 6 untersuchte Subplots à 0,25 m<sup>2</sup>) in den unterschiedlichen Mikrorelief-Strukturen des Grünlandes. Links das Vorgehen bei der Datenaufnahme auf den Flächen mit eher ebener Oberfläche und rechts das Vorgehen bei reliefierten Flächen mit linearen Strukturen (Beete und Grüppen).



**Abbildung 3:** Versuchsdesign und Strukturunterschiede auf der Fläche 7/3 (Foto: Angelika Mroncz, 16.08.2022).

### 3.1 AP1 - Kartierung des Mikroreliefs und Bodenfeuchtemessung

Für die Erfassung der Bodenfeuchte wurde die gravimetrische Messmethode verwendet, da sich die ursprünglich angedachte TDR-Messmethode mit dem System *UMP-1 BTime* nach einem Testlauf im Feld als zu fehlerbehaftet für die humusreichen Böden im Moor mit starker Vernässung sowie Austrocknung herausstellte. Bei der gravimetrischen Messung wurden mit einem Stechzylinder Bodenproben aus dem Oberboden entnommen und in verschleißbare, luftdichte 1 L-Plastiktüten überführt. Der verwendete Stechzylinder besitzt einen Durchmesser von 6,5 cm und eine Länge von 10 cm, so dass sich ein Volumen von 332 cm<sup>3</sup> ergibt. Am Ende des Beprobungstages wurden die entnommenen Bodenproben mit einer Standwaage im frischen Zustand gewogen und bis zur Trocknung im Institut kühl gelagert. Im Mai und im Juli 2021 wurden insgesamt 12 Bodenproben je Fläche entnommen; die Beprobung erfolgte hier auf je sechs Subplots von zwei Transekten je Fläche. Im August und September 2021 wurden alle 4 Transekte je Fläche beprobt, so dass in Summe 24 Bodenproben je Fläche gezogen wurden. Im Mai, August und September 2022 wurden alle vier Transekte mit ihren insgesamt 24 Subplots pro Fläche beprobt. Für die Bestimmung des Wasseranteils in den Bodenproben wurden die Proben für 24 h bei 105 °C getrocknet und anschließend ein weiteres Mal gewogen. Über die Differenz der Massen konnte dann auf die Bodenfeuchte im frischen Zustand der Probe und anhand des Volumens des Stechzylinders auf den volumetrischen Wassergehalt rückgerechnet werden. Zusätzlich wurden die Einstichlöcher der Bodenproben einmalig im August 2021 und für alle 3 Messzeiträume im Sommer 2022 mit einem DGPS (Differential

Global Positioning System) eingemessen, um einerseits die Treffgenauigkeit der Messungen für spätere Analysen zu erhöhen und andererseits die Höhenposition der Messpunkte präzise zu erfassen. Die erhobenen Daten der gravimetrischen Messung wurden anschließend mit dem Statistikprogramm *R* aufbereitet und ausgewertet.

### **3.2 AP2 - Vegetationsaufnahme, Ertragsmessung und Futterqualitätsanalyse**

In allen 0,25m<sup>2</sup>-Plots wurden im Juli 2021 die Artenzusammensetzung und Deckung der Vegetation erfasst (Anhang VI & VII). Im September 2022 wurde in den Transekten 2 und 4 auf Fläche 7/1 und in den Transekten 1 und 3 auf der Fläche 12/3 sowie in allen Transekten auf Fläche 7/1 und 12/2 eine Vegetationsaufnahme mit Ermittlung der Artenzahl durchgeführt. Die Futterqualitätsschnitte wurden mit einem 50 x 50 cm großen Metallrahmen und einer elektrischen Rasenschere händisch entnommen und in Tüten verpackt. Die Schnitte wurden an denselben Stellen durchgeführt, an denen zuvor die Bodenproben entnommen wurden. Die Futterqualitätsschnitte wurden noch am selben Tag auf das Frischgewicht gewogen und anschließend kühl gelagert. Es wurden im Sommer 2021 je Fläche 12 Futterqualitätsschnitte vorgenommen, jeweils 6 auf 2 Transekten. Lediglich auf den Flächen 12/1, 12/2 und 12/3 wurden im Mai 2021 24 Proben je Fläche entnommen. Im Sommer 2022 wurden im Mai und August auf allen Transekten der jeweiligen Flächen (also 24 Futterqualitätsschnitte pro Fläche) entnommen. Für die Bestimmung des Wassergehalts der Biomasseproben wurden diese für 48 h bei 60 °C getrocknet und anschließend ein weiteres Mal gewogen, so dass auf die Wassergehalte der Biomasse im frischen Zustand rückgeschlossen werden konnte. Nach Trocknung der Biomasse wurde diese in einem zweistufigen Verfahren zunächst auf einen Siebdurchgang von 4 mm und dann auf 1 mm vermahlen und anschließend mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie (NIRsystems 6500 scanning monochromator, Foss, Silver Spring, Maryland, USA) die Futterqualität ermittelt. Folgende Merkmale wurden untersucht: Rohnährstoffe: Rohasche (XA), Rohprotein (XP), Rohfaser (XF), Rohfett (XL). Faserbestandteile: NDFom (Hemizellulose plus Lignozellulose, ein Maß für den Zellwandanteil der Futterprobe), ADFom (Lignozellulose). Weitere bestimmte Qualitätseigenschaften waren: Gasbildung im Hohenheimer Futterwerttest (Gb, Indikator für die Schätzung der Energiekonzentration des Futters), Enzymunlöslichkeit der organischen Substanz (Eulos, Maß für den Anteil der nicht verdaulichen Bestandteile des Futters), Fruktankonzentration (wichtiger Kohlenhydratbestandteil).

### 3.3 Auswertung der Daten

#### *Workflow in R*

Der Workflow zur Auswertung der Daten in R-Studio ist in Anhang I dargestellt. Für die Auswertung der jeweiligen Messungen wurden im ersten Schritt die Daten aufbereitet und in die räumlichen Ebenen Fläche, Transekt und Subplots unterteilt. Im zweiten Schritt wurden die laboranalytischen Daten hinzugefügt und aufbereitet und anschließend graphisch anhand von Korrelationsdiagrammen dargestellt. Mit Hilfe von Korrelationsanalysen sowie Linear Mixed Effects Models wurden anschließend die Beziehungen der Variablen zueinander untersucht.

#### *Workflow in Agisoft Metashape*

Die Anzahl der Drohnenaufnahmen schwankte je nach Größe der Untersuchungsfläche zwischen 200 und 700 Bildern pro Fläche. Diese Rohdaten mussten im ersten Arbeitsschritt miteinander verschnitten werden, um die Gesamtbilder für die einzelnen Flächen erstellen zu können. Insgesamt wurden 11 Bildmosaike aus den RGB-Aufnahmen aus 2021 erstellt. Für das Zusammenführen der Drohnenaufnahmen zu einem Gesamtbild wurde mit dem Programm *Agisoft Metashape Professional* gearbeitet. In Anhang II ist die Vorgehensweise schematisch dargestellt und die wesentlichen Befehle sind aufgelistet.

#### *Workflow in ArcGIS Pro*

Nach dem Zusammenführen der Drohnenaufnahmen für die einzelnen Flächen in Orthomosaike wurden diese im nächsten Bearbeitungsschritt zusammen mit den zuvor gemessenen Feld- und Labordaten als Grundlage für weitere Analysen aus dem Jahr 2021 in ArcGIS Pro verwendet. Insgesamt wurden für jede Untersuchungsfläche 12 Karten erstellt. Für das Jahr 2022 wurden keine Orthomosaike mehr erstellt. Dennoch wurde in diesem trockenen Jahr ein großer Messumfang durchgeführt, so dass insgesamt 14 Karten pro Fläche erstellt wurden. Alle Karten beinhalten Informationen zum Aufbau der Experimentflächen mit ihren Transekten und Subplots, die genaue Position der Messpunkte bzw. Subplots (hinterlegt durch die GPS-Daten), die Befliegungsrouten der Drohne, eine Höhenmodellkarte, sowie Karten zur räumlichen Verteilung der Messgrößen Wassergehalt im Oberboden [in Vol.%],  $\alpha$ -Diversität (Shannon-Index) bzw. Artenanzahl, Wassergehalt der Biomasse [in Gew.%], Trockenmasse [in g pro 0,25 m<sup>2</sup> bzw. g pro m<sup>2</sup>], Rohprotein- und Rohfasergehalte [in Gew.% der Trockenmasse] sowie eine visuelle Zeitreihenanalysen zu den einzelnen Parametern im Zeitraum Mai bis September 2021 und 2022. Die Höhenmodellkarte wurde auf Basis der zuvor

eingemessenen Subplots erstellt. Hierbei wurden neben den Koordinaten (Längengrad und Breitengrad) auch die jeweiligen Höhen über Normal-Null erfasst und anschließend als Grundlage für die Höhenmodellkarte verwendet. Für die flächenhafte Abbildung der Höhen auf der gesamten Untersuchungsfläche wurde mit dem Interpolationswerkzeug *Empirical Bayesian Kriging (EBK)* gearbeitet. Diese geostatistische Interpolationsmethode erzeugt mittels statistischer Rechenverfahren eine räumliche Vorhersage. EBK ist besonders für kleinere Datenmengen geeignet. Ursprünglich war vorgesehen, dass die Höhenmodellkarten aus den Digitalen Höhenmodellen (DEM) der Drohnenbilder erstellt werden. Diese erwiesen sich jedoch als ungeeignet, da das GPS der Drohne eine für den Zweck der Studie zu große Messungengenauigkeit von etwa 30-50 cm besitzt, die je nach Witterungsbedingungen verstärkt werden kann, so dass das Mikrorelief kaum abgebildet werden konnte. Das verwendete DGPS, das zum Einmessen der Subplots im Feld verwendet wurde, misst hingegen genau im Zentimeterbereich, so dass auf diese Messungen zurückgegriffen wurde. Für alle weiteren Karten wurde als Interpolationsmethode *Inverse Distance Weighting (IDW)* verwendet. Bei dieser Interpolationsmethode wird eine Raster-Oberfläche anhand von Punkten interpoliert. Dabei werden Zellenwerte mit einer linear gewichteten Kombination verschiedener Referenzpunkte ermittelt (ArcGISPro, 2022). Bei dieser Methode wird angenommen, dass ein zugeordneter Wert mit zunehmendem Abstand von seiner Referenzposition an Einfluss verliert. Dennoch bleiben die ausgegebenen Werte der Interpolation im Bereich der hinterlegten Werte und können diese nicht unter- oder überschreiten. Für eine möglichst gute Abbildung der Verteilungen auf den Untersuchungsflächen wird bei dieser Interpolationsmethode empfohlen, die Probepunkte möglichst dicht und gleichmäßig zu legen. Durch das angestrebte Messschema der gleichmäßig verteilten Transekte und Subplots konnte diese Voraussetzung größtenteils erfüllt werden. Für die Karten zur Interpolation des Bodenwassergehaltes, der  $\alpha$ -Diversität, des Wassergehaltes in der Biomasse, des Gewichtes der Trockenmasse sowie der Rohprotein- und Rohfasergehalte wurde aufgrund der „weicheren Übergänge“ bewusst die IDW- und nicht die EBK-Interpolationsmethode gewählt. Die Karten aus 2022 unterschieden sich in einigen Punkten von den Karten aus 2021. Zum einen wurde in den Höhenmodellen von 2022 eine Beschreibung der Messpositionen in Senken oder Geländekuppen hinzugefügt. Diese wurden zuvor im Feld notiert und dienten der Überprüfung der eingemessenen Höhen mit dem DGPS. Zum anderen wurde im September 2022 lediglich die Zahl der Pflanzenarten notiert und diese in Gräser, Kräuter und Leguminosen differenziert. Diese Zählungen wurden anstelle des Shannon-Biodiversitätsindex (wie in 2021 geschehen) in

die Karten eingetragen, die zur Darstellung der Vegetation dienen. In Anhang III wird die Vorgehensweise in ArcGIS Pro schematisch dargestellt.

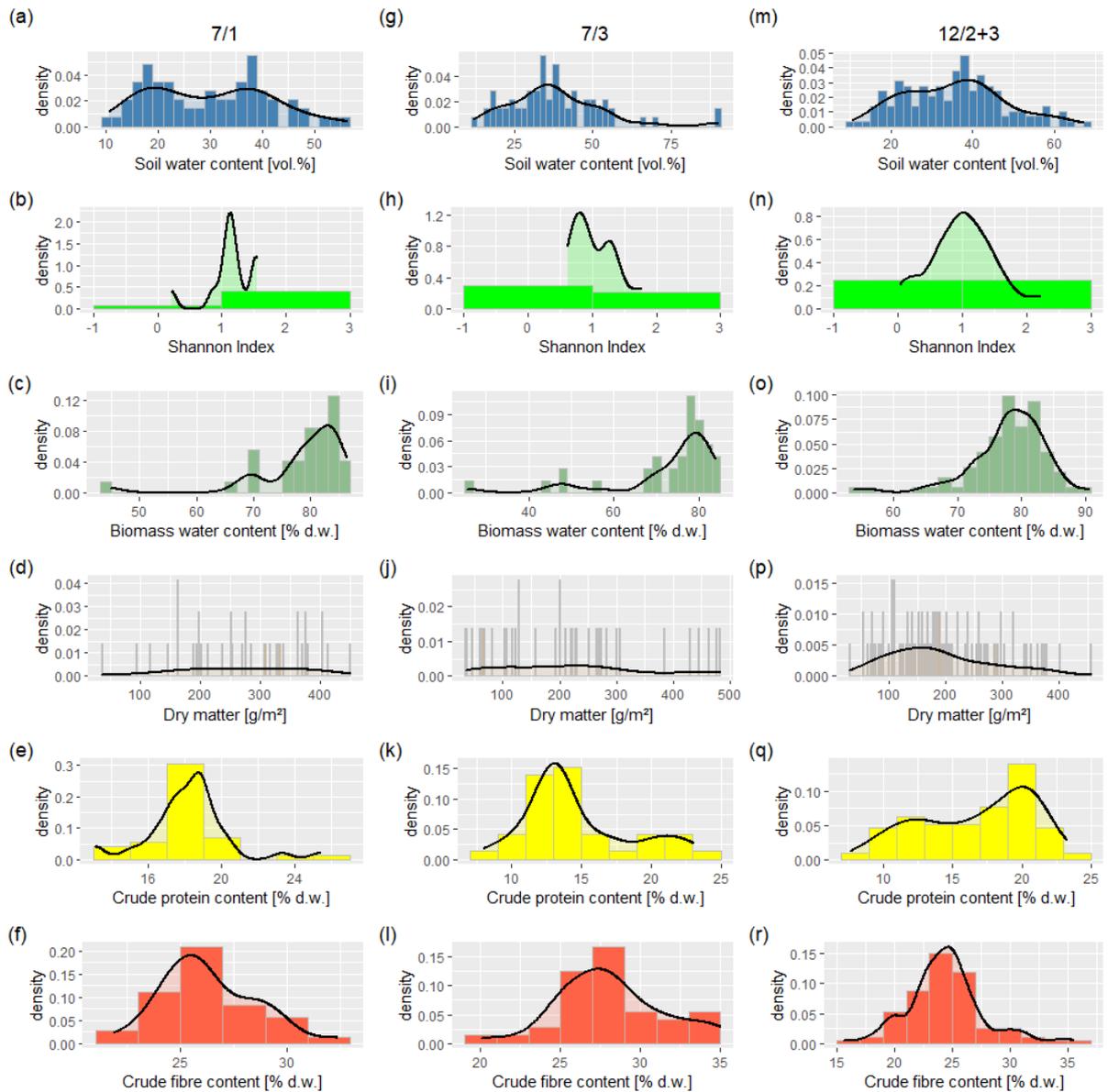
## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Standörtliche Variation innerhalb der Schläge

Aus der Fülle des Daten- und Kartenmaterials wurden jeweils vier Flächen (7/1, 7/3, 12/2 und 12/3) aus 2021 und 2022 für diesen Bericht ausgewählt, weil sie ein ausgeprägtes Relief aufweisen und die Ergebnisse als weitgehend repräsentativ für das Flächenensemble angesehen werden. Die folgenden Häufigkeitsdiagramme der Einzelwerte demonstrieren die erhebliche Heterogenität der Umweltbedingungen wie auch der Grasnarbe innerhalb der Grünlandschläge (*Abb. 4 & 5*). Das gilt nicht nur für den Bodenwassergehalt, sondern auch für den Shannon-Diversitätsindex, die Artenanzahl, den Wassergehalt in der Biomasse, die produzierte Trockenmasse (TM) bzw. den Ertrag und den Rohfaser- und Rohproteingehalt. Trotz der sehr feuchten Bedingungen im Untersuchungsjahr 2021 und der trockenen Bedingungen im Untersuchungsjahr 2022 sowie der auf den ersten Blick recht einheitlich wirkenden Schläge konnten große Streuungen in den gemessenen Werten der jeweiligen Untersuchungsjahre festgestellt werden. Diese Variationsbreite der Messwerte wird in *Abb. 4 & 5* grafisch dargestellt und in *Tab. 3* mit den Kennzahlen Mittelwert, Standardabweichung, Varianzkoeffizient sowie Minimal- und Maximalwert, die die Streuung der Daten widerspiegeln, hinterlegt.

#### *Untersuchungsjahr 2021*

Die Untersuchungsfläche 7/3 (*Abb. 4g-l, Tab. 3g-l*) weist über den Messzeitraum Mai-September 2021 hinweg (mit Ausnahme der Variablen Shannon-Diversitätsindex und Rohproteingehalt) die größte Variation in den Daten auf. Beim Shannon-Index und im Rohproteingehalt befindet sich die größte Streuung hingegen auf den beiden Flächen 12/2+3 (*Abb. 4n & q, Tab. 3n & q*). Die Verteilung der Messwerte zum Wassergehalte im Oberboden ist auf allen Schlägen über den Bereich von 15 Vol. % bis 70 Vol. % breit verteilt (*Abb. 4a, g, m*), der Wassergehalt in der Biomasse streut hingegen relativ wenig und liegt recht einheitlich im Bereich von 80 Gew. % liegt (*Abb. 4c, i, o*). Eine hohe Variabilität innerhalb der Schläge



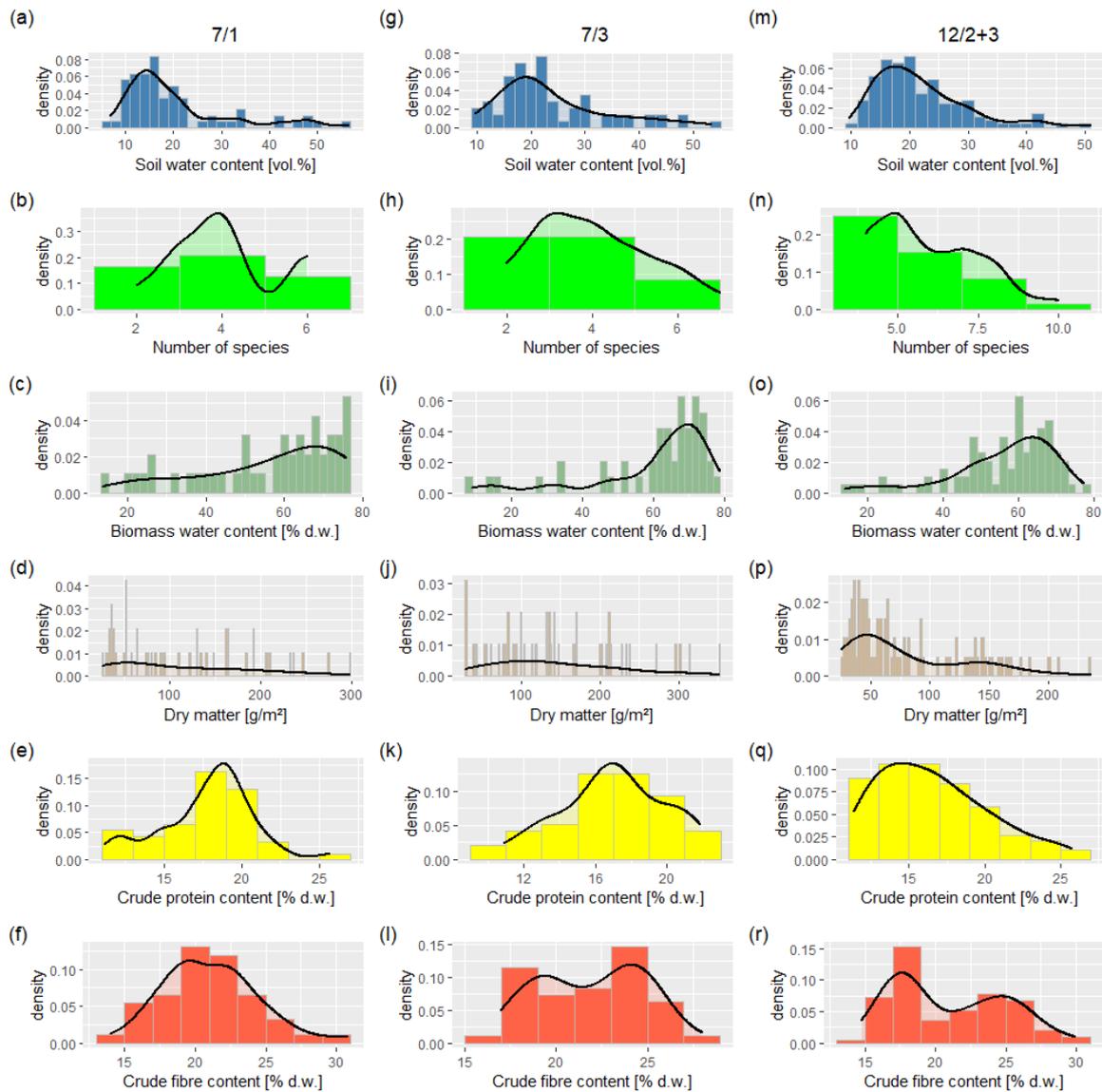
**Abbildung 4:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte der standortkundlichen und ertragsrelevanten Größen für die Flächen 7/1, 7/3 und 12/2+3 im Sommer 2021 (alle Termine gepoolt).

weist zudem der Ertrag (Aufwuchs) auf (*Abb. 4d, j, p, Tab. 3d, j, p*). Auch zwischen den einzelnen Schlägen differieren die Erträge erheblich. Ebenso weist die Futterqualität, also der Rohprotein- (*Abb. 4e, k, q, Tab. 3e, k, q*) und der Rohfasergehalt (*Abb. 4f, l, r, Tab. 3f, l, r*), erhebliche Variabilität innerhalb der Schläge wie auch zwischen den Flächen auf.

#### *Untersuchungsjahr 2022*

Obwohl auch im trockenen Untersuchungsjahr 2022 die Messwerte der Parameter im Feld kleinräumig stark streuen (*Abb. 5*), weisen Bodenwassergehalt, Wassergehalt der Biomasse und der Ertrag erwartungsgemäß wesentlich kleinere Mittelwerte auf als im feuchten Jahr 2021. Die mittleren Rohprotein- und Rohfasergehalte unterscheiden sich hingegen nicht wesentlich von denen des Vorjahres. Die Oberboden-Wassergehalte variieren auf allen Schlägen zwischen <10 bis maximal 50 Vol.% mit den meisten Werten im Bereich von 20 Vol.% (*Abb. 5a,g,h*). Anders als im feuchten Sommer 2021 weisen jedoch die Biomasse-Feuchte und der Ertrag eine deutlich größere kleinräumige Wertestreuung auf (*Abb. 5c,j,o und d,j,p*).

Bemerkenswert ist, dass die Biomasse-Feuchte in bestimmten Plots auf Werte <20 % TW sinkt, während wie im Vorjahr Höchstwerte von 80% erreicht werden. Im trockenen Sommer 2022 sind zudem die Unterschiede zwischen den Schlägen größer: Während auf den beiden Schlägen 7/1 und 7/3 die meisten Biomasse-Feuchtwerte im Bereich 60 - 80 % TW liegen und nur wenige Plots <60 % Feuchte aufweisen, verteilen sich die Werte auf den Schlägen 12/2+3 auf die breitere Spanne von 40 bis etwa 75 % TW. Entsprechend groß sind die Schlagunterschiede hinsichtlich der mittleren Erträge, die auf geringerem Niveau als 2021 liegen und dennoch kleinräumig stark variieren. Auf den Schlägen 12/2+3 lässt sich eine Häufung bei niedrigen Werten im Bereich von 50 g/m<sup>2</sup> erkennen (Mittelwert: 80.2 g/m<sup>2</sup>), während die Schläge 7/1 und 7/3 deutlich höhere Mittelwerte (112 und 145 g/m<sup>2</sup>) aufweisen und gleichzeitig die kleinräumige Ertragsvariabilität höher ist (*Tab. 3*). In beiden Messjahren sind die Erträge im Mittel auf den Flächen 7/1 und 7/3 höher als in den Schlägen 12/2+3. Die Artenanzahl pro Aufnahme­fläche war dagegen in den Schlägen 12/2+3 mit maximal 10 Arten größer als auf den Schlägen 7/1 und 7/3 (maximal 6 Arten; *Abb. 5b,h,n*). Während die Rohproteingehalte im



**Abbildung 5:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte der standortkundlichen und ertragsrelevanten Größen für die Flächen 7/1, 7/3 und 12/2+3 (über alle Termine aus 2022 gepoolt).

trockenen Sommer 2022 in einem ähnlichen Wertebereich wie im Vorjahr liegen (Mittelwerte im Bereich 14.6 – 18.2 % TW, *Abb. 5e,k,q & f,l,r*), wurden im trockenen Sommer 2022 auf allen Schlägen reduzierte Rohfasergehalte gemessen (Tabelle 3). Die Ergebnisse aus den

Jahren 2021 und 2022 zeigen, dass trotz einheitlicher Schnittregime und Düngungsintensitäten eine große kleinräumige Variabilität in den Zielgrößen vorhanden ist, und zwar sowohl zwischen als auch innerhalb der Schläge. Sie sind Ausdruck des Reliefs und der räumlich variablen Bodenfeuchteregime. Diese Heterogenität konnte anhand der Physiognomie und Farbe der Vegetation auch innerhalb der Bestände beobachtet werden. Die Fotos in Abb. 6 geben einen Eindruck der Heterogenität der Vegetation auf kleinem Raum. Die Fotos zeigen die gesamte Spanne von üppigem Aufwuchs bis hin zu aufgrund von Trockenheit fast vegetationsfreiem Boden.



**Abbildung 6:** Vegetationsdecke auf ausgewählten Subplots im August 2022.

#### 4.2 Einfluss von Geländehöhe und Bodenfeuchte auf den Aufwuchs

##### *Untersuchungsjahr 2021*

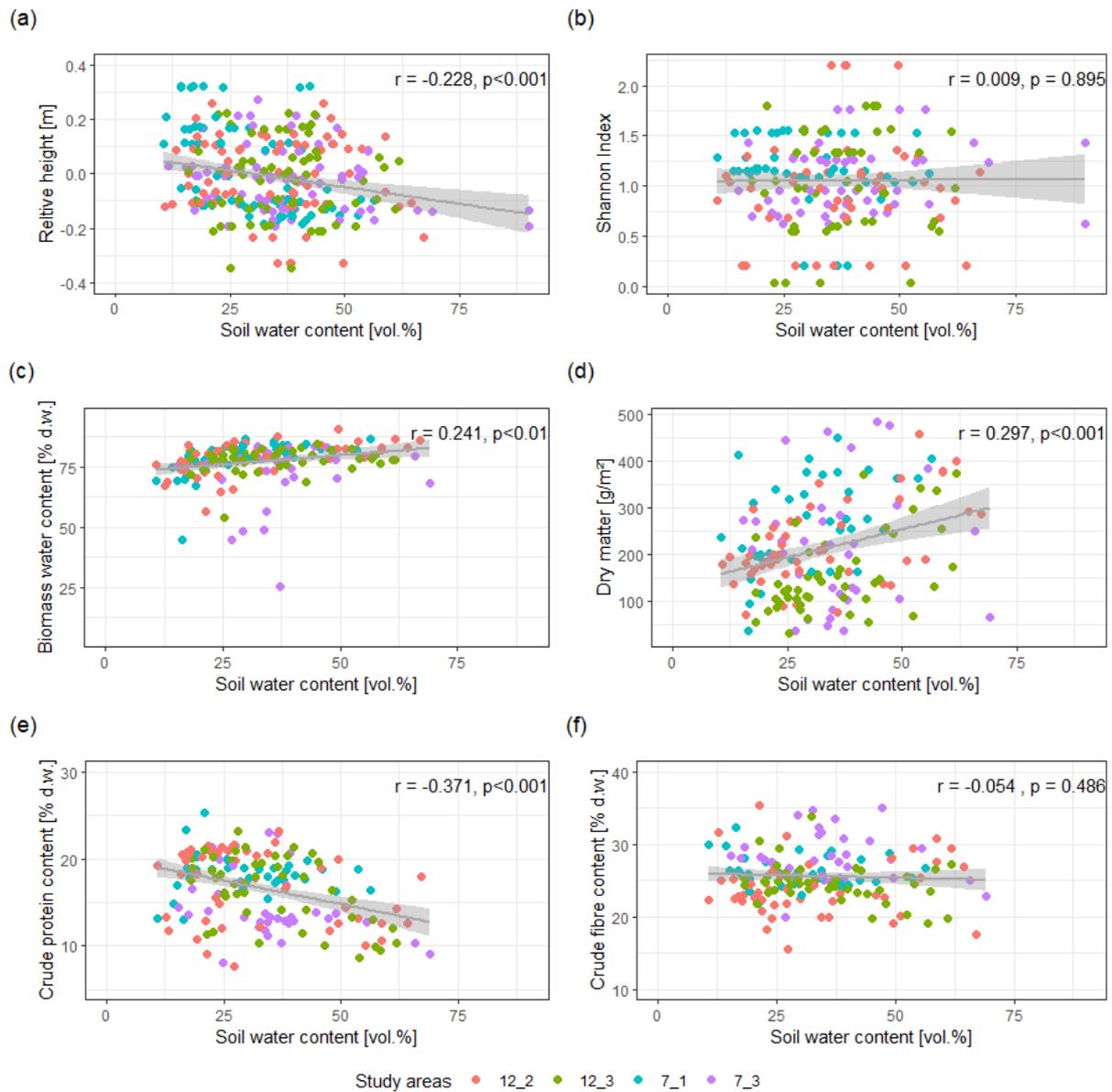
Die Grafiken in *Abb. 7* zeigen, dass der Bodenwassergehalt einen erheblichen Einfluss auf den Ertrag (Aufwuchs) und die Futterqualität hat. Feuchtere Teilflächen erzielten eine

größere Aufwuchs-Trockenmasse als trockenere. Wie zu erwarten, steigt der Wassergehalt der frischen Biomasse mit der Bodenfeuchte an (*Abb. 7c*).

**Tabelle 3:** Mittelwerte, Standardabweichung und Wertespanne der Variablen Bodenwassergehalt [vol.%], Shannon-Diversitätsindex, Artenzahl, Biomasse-Wassergehalt [% d.w.], Trockenmasseproduktion (Aufwuchs) [g/m<sup>2</sup>], Crude protein und Crude fibre-Gehalt [% d.w.] für die Flächen 7/1, 7/3, 12/2+3, gemittelt über alle Termine in 2021 und 2022. Die Buchstaben in Klammern stehen für die entsprechenden Graphen in Fig. 4 und 5.

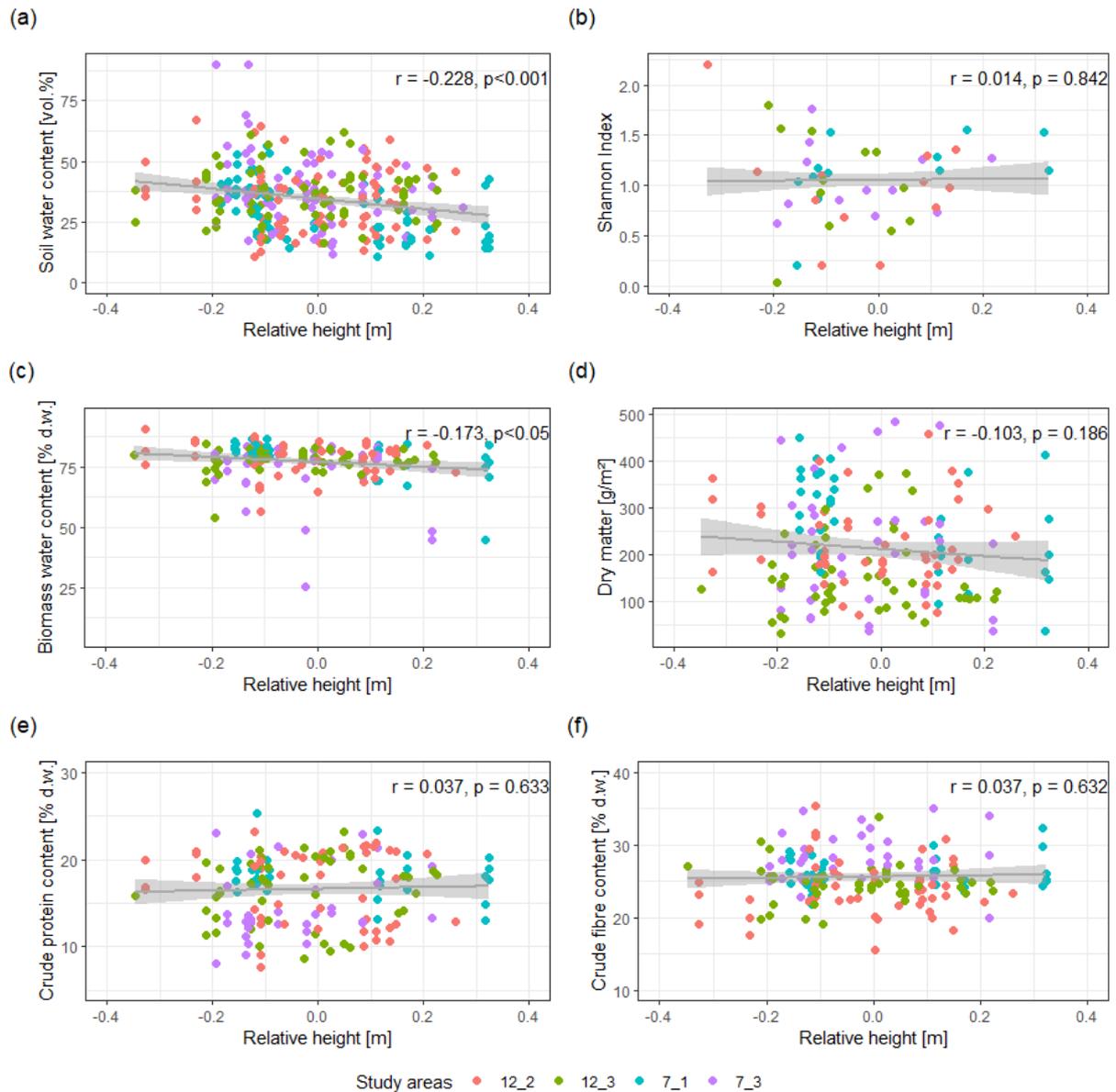
Fläche 7/1												
	Soil water content (a)		Shannon-Index (b)	Number of species (b)	Biomass water content(c)		Dry matter (d)		Crude protein content (e)		Crude fibre content (f)	
year	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
mean	29.86	20.06	1.14	4.08	78.86	56.14	269.06	111.57	18.17	17.82	26.32	21.09
sd	11.47	10.96	0.35	1.31	7.81	17.68	101.17	74.57	2.29	2.96	2.22	3.40
range	10.66-56.40	6.83-56.49	0.21-1.55	2-6	44.85-86.41	13.33-75.85	36.4-449.6	26-297.2	13.07-25.34	11.18-25.63	21.84-32.37	13.97-30.74
Fläche 7/3												
	Soil water content (g)		Shannon-Index (h)	Number of species (h)	Biomass water content(i)		Dry matter (j)		Crude protein content (k)		Crude fibre content (l)	
year	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
mean	37.85	23.69	1.05	4.00	73.09	60.65	217.6	144.65	14.63	16.93	28.11	21.95
sd	15.08	9.95	0.33	1.38	12.81	16.84	131.28	80.83	3.84	2.86	3.33	2.92
range	11.75-90	9.66-53.30	0.62-1.76	2-7	25.62-83.74	8.75-78.95	34.8-482.4	29.2-351.2	8-23.06	10.93-21.87	20.03-35	16.97-27.99
Fläche 12/2+3												
	Soil water content (m)		Shannon-Index (n)	Number of species (n)	Biomass water content (o)		Dry matter (p)		Crude protein content (q)		Crude fibre content (r)	
year	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
mean	35.41	21.65	1.008	5.92	78.07	56.01	189.12	80.15	16.73	16.57	24.37	20.96
sd	12.26	7.71	0.51	1.63	5.85	13.66	92.16	49.87	4.05	3.57	3.27	3.95
range	10.69-67.10	9.57-50.98	0.04-2.205	4-10	53.75-90.61	13.75-77.17	29.6-456.76	25.2-234.8	7.60-23.26	11.38-25.73	15.54-35.47	14.75-29.95

Im Mittel über alle Flächen nimmt der Rohproteingehalt der Biomasse mit der Bodenfeuchte ab, während der Rohfasergehalt unabhängig von der Bodenfeuchte ist (Abb. 7e & f). Feuchtere Flächen erzeugten 2021 zwar mehr Aufwuchs, aber die Futterqualität war 2021 tendenziell auf den trockeneren Flächen höher, weil proteinreicher. Die Shannon-Diversität änderte sich entlang des Bodenfeuchtegradienten nicht (Abb. 7b). Die Linearen Gemischten Modelle zeigen, dass die Beziehungen zwischen



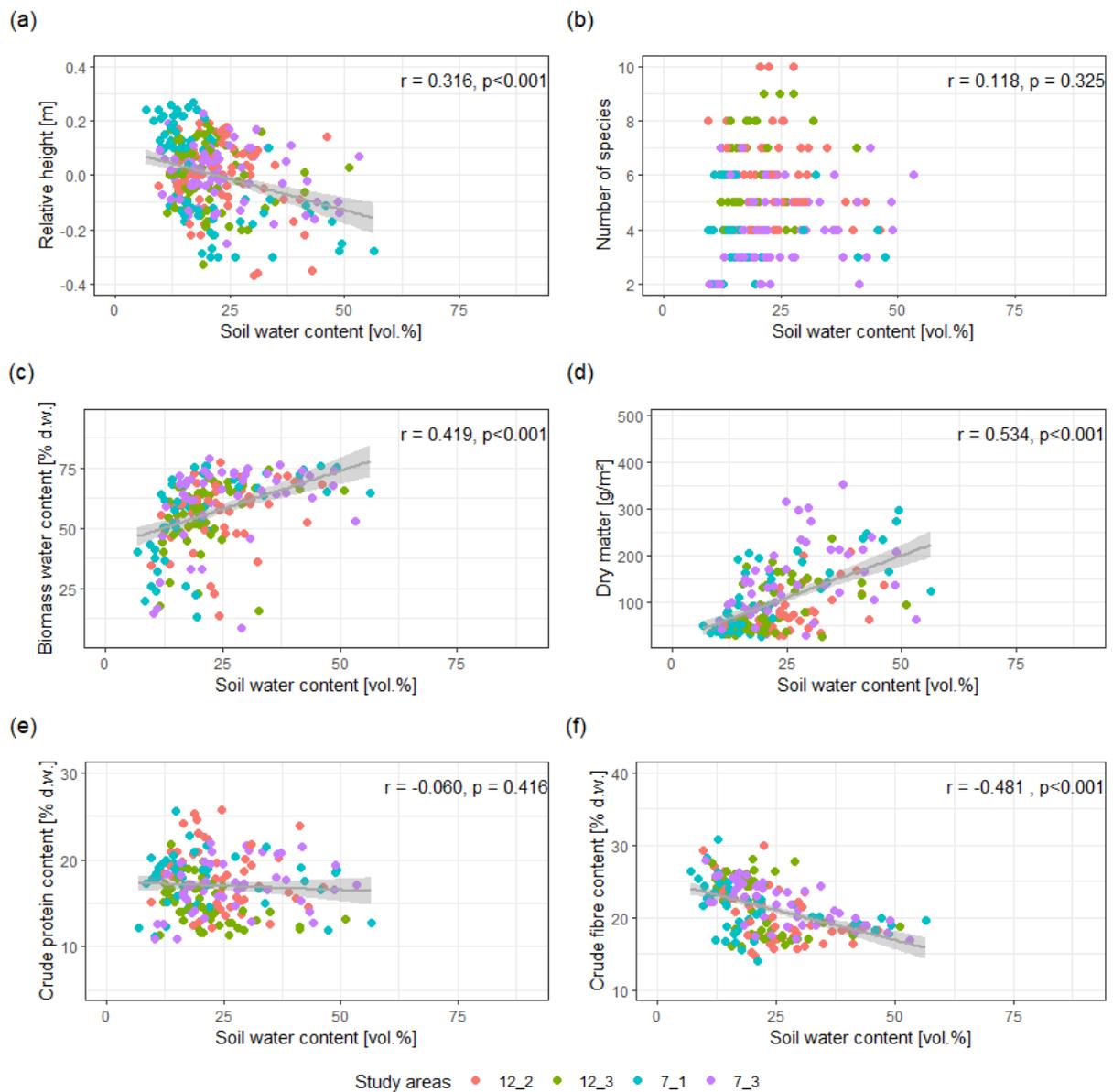
**Abbildung 7:** Beziehung zwischen Soil water content [vol.%] und den Variablen Relative height [m], Shannon-Index, Biomass water content [% d.w.], Dry matter [ $g/m^2$ ], Crude protein und Crude fibre content [% d.w.], gemittelt über alle Termine und Flächen, in 2021.

Bodenfeuchte und Diversität, Ertrag und Qualität des Aufwuchses sehr stark von den Eigenschaften der einzelnen Flächen beeinflusst werden, sich also in Abhängigkeit von Höhenlage, Bodendichte und Bewirtschaftung deutlich verändern. Regionale Eigenheiten der Flächen müssen also bei der Bewertung der Ergebnisse besondere Berücksichtigung finden. Drückt man die abhängigen Variablen (Diversität, Ertrag, Aufwuchsqualität) als Funktion der

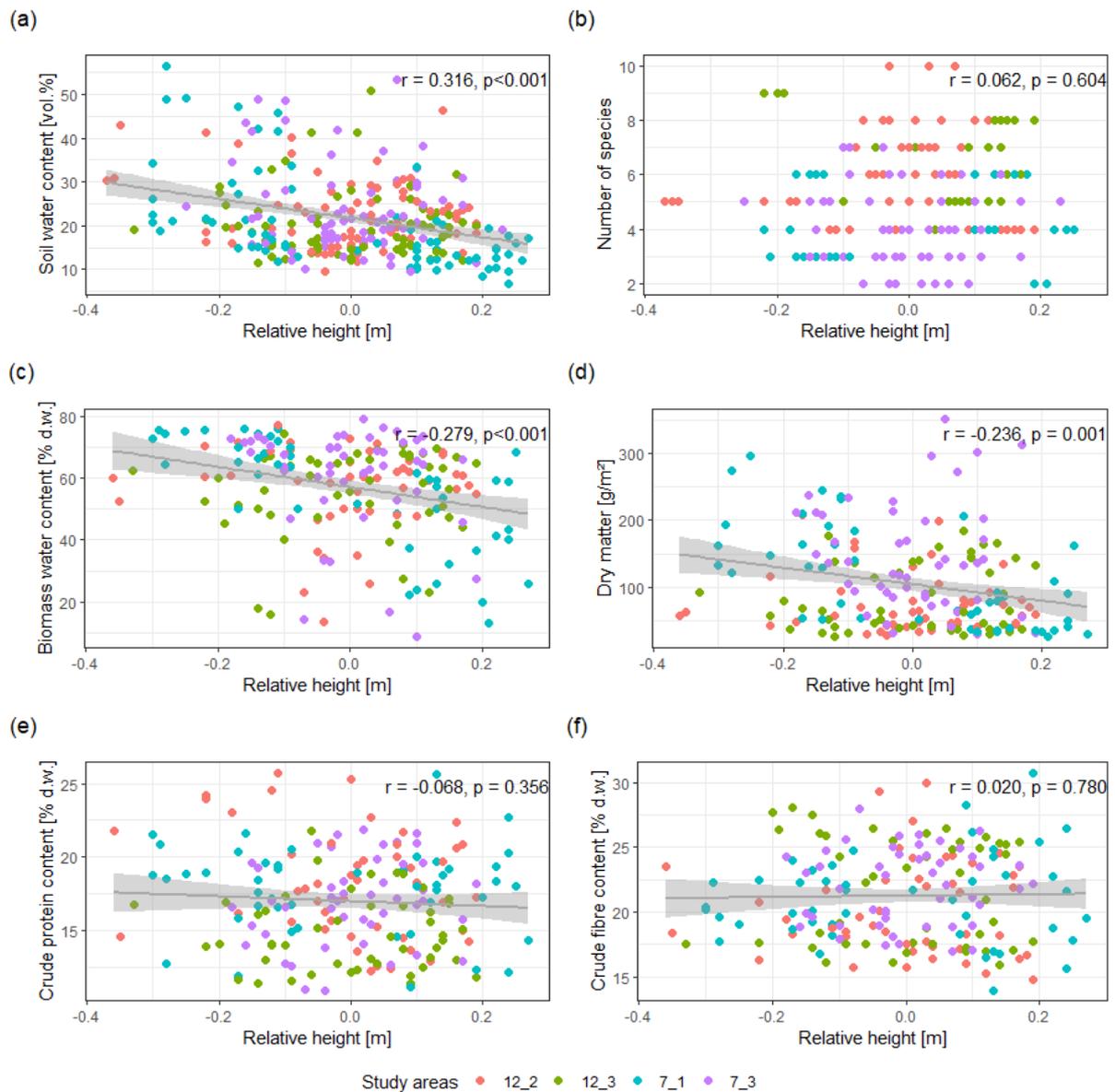


**Abbildung 8:** Beziehung zwischen dem Mikrorelief, angegeben in Relative height [m], und den Variablen Soil water content [vol.%], Shannon-Index, Biomass water content [% d.w.], Dry matter [g/m<sup>2</sup>], Crude protein und Crude fibre content [% d.w.], gemittelt über alle Termine und Flächen, in 2021.

relativen Geländehöhe (relativ zum jeweiligen Mittelwert der Fläche) aus, so wird der starke Einfluss der individuellen Flächeneigenschaften deutlich (Abb. 8). Deutlich wird dies durch die höhere Bodenfeuchte wie auch Feuchte der Biomasse in den Senken, während die Geländehöhe im feuchten Sommer 2021 keinen signifikanten Einfluss auf Diversität, Aufwuchsmasse und auch nicht auf die Futterqualität hatte.



**Abbildung 9:** Beziehung zwischen Soil water content [vol.%] und den Variablen Relative height [m], Number of species, Biomass water content [% d.w.], Dry matter [g/m<sup>2</sup>], Crude protein und Crude fibre content [% d.w.], gemittelt über alle Termine und Flächen, in 2022.



**Abbildung 10:** Beziehung zwischen dem Mikorelief, angegeben in Relative height [m], und den Variablen Soil water content [vol.%], Number of species, Biomass water content [% d.w.], Dry matter [g/m<sup>2</sup>], Crude protein und Crude fibre content [% d.w.], gemittelt über alle Termine und Flächen, in 2022.

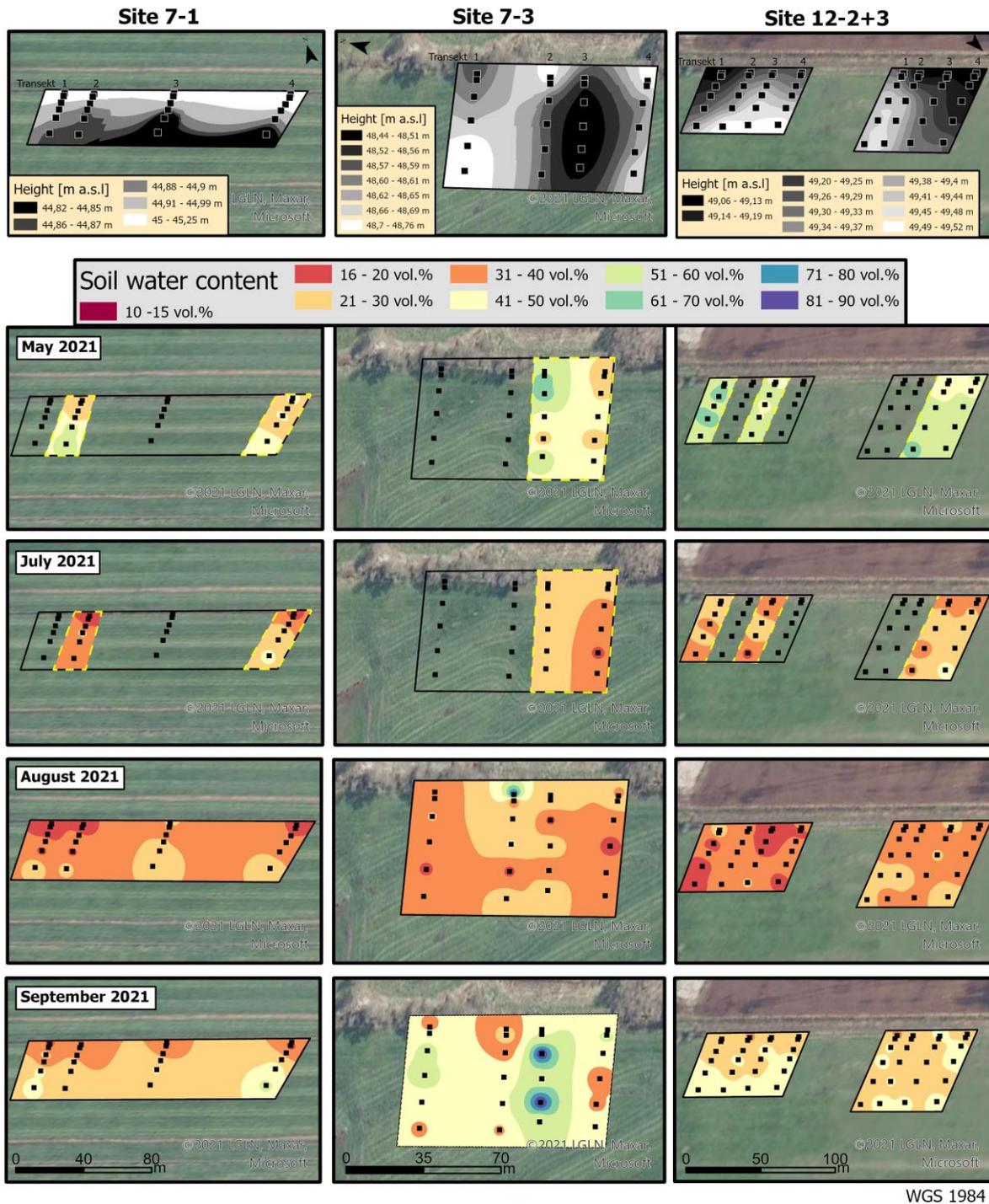
## *Untersuchungsjahr 2022*

Anders als in 2021 bestand im trockenen Sommer 2022 eine hochsignifikante Abhängigkeit des Aufwuchses von der Bodenfeuchte, und die Beziehung Bodenfeuchte – Biomassefeuchte war enger als im Vorjahr (Abb. 9c,d). Bemerkenswert ist weiterhin, dass der Proteingehalt im trockenen Sommer nicht von der Bodenfeuchte beeinflusst war, der Rohfasergehalt jedoch eine negative Abhängigkeit zeigte (Abb. 9e,f), entgegengesetzt zu den Ergebnissen im feuchten Sommer 2021. Dies dürfte mit der generell geringeren Biomasse und dem niedrigeren Fasergehalt zusammenhängen. Die feuchteren Senken erzielten im trockenen Sommer signifikant höhere Aufwüchse mit höherer Biomassefeuchte als die höheren Geländepartien (Abb. 10c,d). Dieser begünstigende Effekt der Senken trat nur im trockenen Sommer auf, nicht jedoch im feuchten.

### 4.3 Kartographische Darstellung der kleinräumigen Standortvariabilität

Am Beispiel von vier Grünlandschlägen (Flächen 7/1, 7/3, und 12/2+3) wird im Folgenden die erhebliche kleinräumige Variabilität des Reliefs und daraus resultierend der Bodenfeuchte sowie der Quantität und Qualität des Aufwuchses in Karten dokumentiert (Abb. 11-16). Die Flächen 7/1 und 7/3 weisen dabei eine gruppenartige Oberflächenstruktur auf, die Flächen 12/2+3 sind weniger reliefiert; jedoch sind auch hier Höhenunterschiede vorhanden. Grundlage der Darstellungen sind die Feinnivellements mithilfe des GPS-Systems. In allen vier Schlägen betragen die Höhendifferenzen bis zu 30 oder bis zu 50 cm (Höhenmodellkarten in den Abb. 11: oben und 14: oben). Die Karten der Bodenfeuchteverteilung zeigen, dass über kurze Distanzen innerhalb eines Schlages Feuchteunterschiede um bis zu 30 Vol.% auftreten können, und zwar sogar in einem ausgesprochen feuchten Sommer wie in 2021 (Bodenfeuchtekarten in Abb. 11 u. 14). Bemerkenswert ist, dass die Trockenmasse des Aufwuchses vor dem Schnitt innerhalb eines Schlages sowohl im feuchten wie im trockenen Sommer um mehr als das Vierfache variiert. Rohfaser- und Rohproteingehalte zeigten eine geringere räumliche Variation, aber unterschieden sich innerhalb eines Schlages noch bis zum Faktor 2 (Karten zu Rohprotein- und Rohfasergehalt in Abb. 13 und 15), mit der Folge, dass nur Teilflächen eines Schlages Aufwuchs von einer hinreichenden Qualität produzieren.

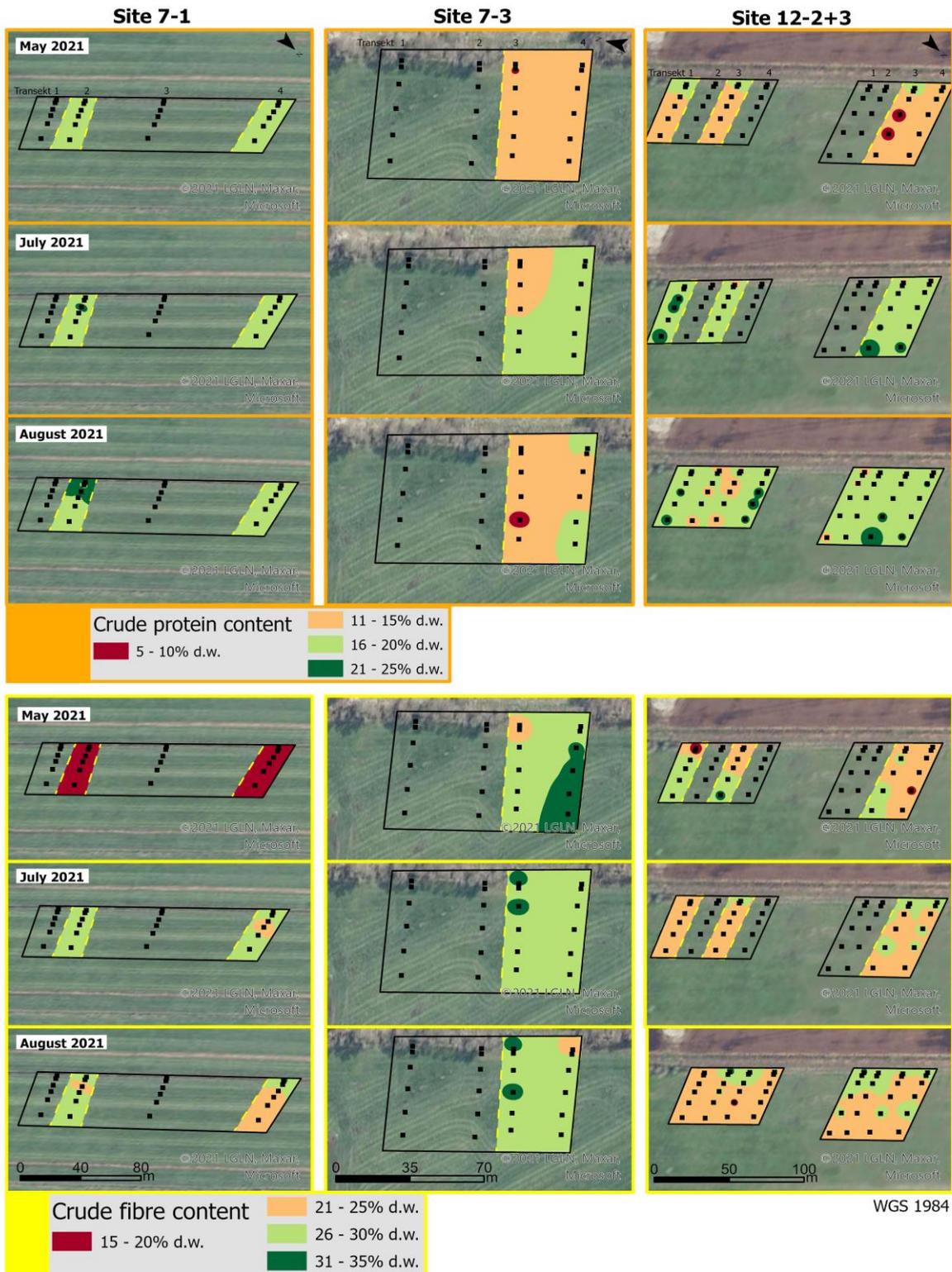
Untersuchungsjahr 2021



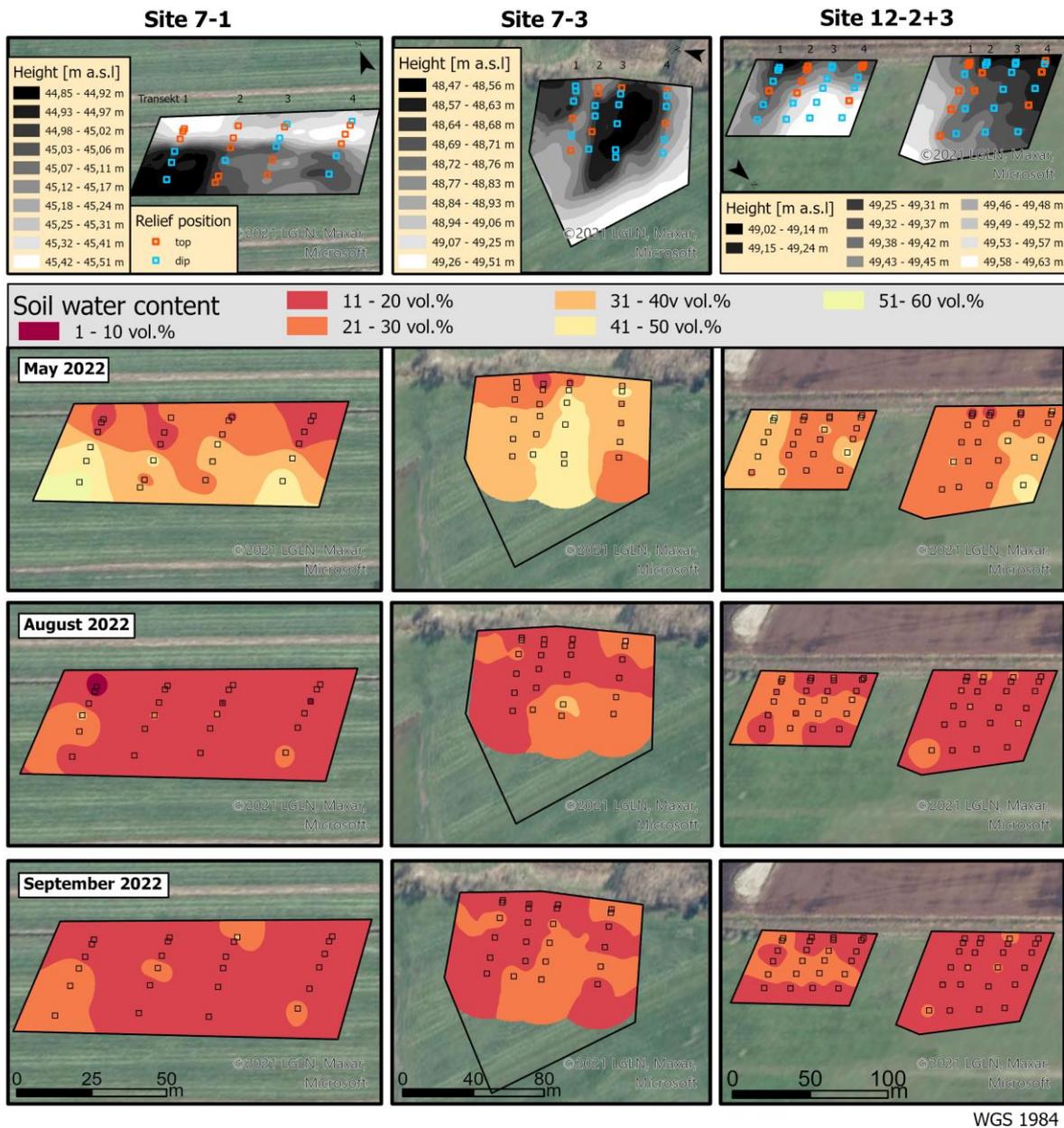
**Abb. 11.** Kleinräumige Variabilität der Meereshöhe (oberste Reihe) und der Bodenfeuchte an vier Terminen im feuchten Sommer 2021 in drei Grünlandschlägen. Die schwarzen Quadrate sind die Beprobungsstellen.



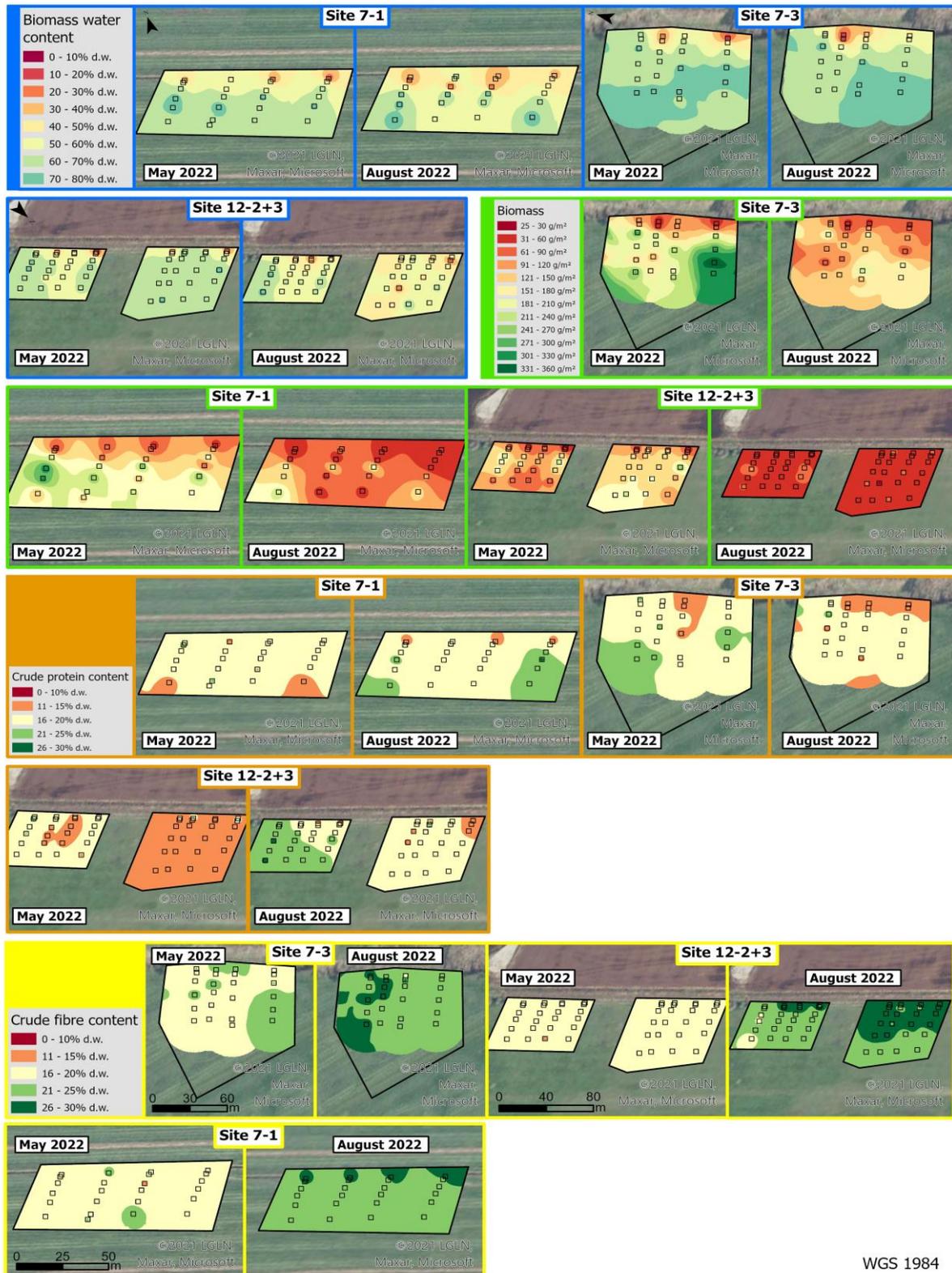
**Abb. 12.** Kleinräumige Variabilität der Biomasse-Feuchte (oberste drei Reihen) und des Aufwuchses (untere drei Reihen) an drei Terminen im feuchten Sommer 2021 in drei Grünlandschlägen. Die schwarzen Quadrate sind die Beprobungsstellen.



**Abb. 13.** Kleinräumige Variabilität des Rohproteingehalts (oberste drei Reihen) und des Rohfasergehalts (untere drei Reihen) an drei Terminen im feuchten Sommer 2021 in drei Grünlandschlägen. Die schwarzen Quadrate sind die Beprobungsstellen.



**Abb. 14.** Kleinräumige Variabilität der Meereshöhe (oberste Reihe) und der Bodenfeuchte an je drei Terminen im trockenen Sommer 2022 in drei Grünlandschlägen. Die offenen Quadrate sind die Beprobungsstellen.



WGS 1984

**Abb. 15.** Kleinräumige Variabilität der Biomasse-Feuchte (oberste zwei Reihen), des Aufwuchses (2. und 3. Reihe), des Rohproteingehaltes (4. und 5. Reihe) und des Rohfasergehaltes (6. und 7. Reihe) an zwei Terminen im trockenen Sommer 2022 in drei Grünlandschlägen. Die offenen Quadrate sind die Beprobungsstellen.



WGS 1984

**Abb. 16.** Kleinräumige Variabilität der Pflanzenartenzahl pro Aufnahme­fläche (obere Reihe) und des Shannon-Diversitätsindex (untere Reihe) in drei Grünlandschlägen nach Aufnahmen in den Jahren 2022 bzw. 2021. Die Quadrate sind die Aufnahme­flächen.

#### 4.4 Einfluss von pflanzlicher Diversität und Aufwuchsmenge auf die Qualität des Aufwuchses

Interessant sind einige Beziehungen unter den gemessenen Variablen, die die Quantität und Qualität des Aufwuchses charakterisieren. Während die Diversität der Grasnarbe (Shannon-Index) weder die Menge (Trockenmasse) noch die Qualität (Rohfaser- und Rohproteingehalt)

des Aufwuchses beeinflusste (*Abb. 17 a-c*), nahm der Rohfasergehalt mit steigender Aufwuchsmenge zu, der Rohproteingehalt jedoch ab (*Abb. 17 d & e*).

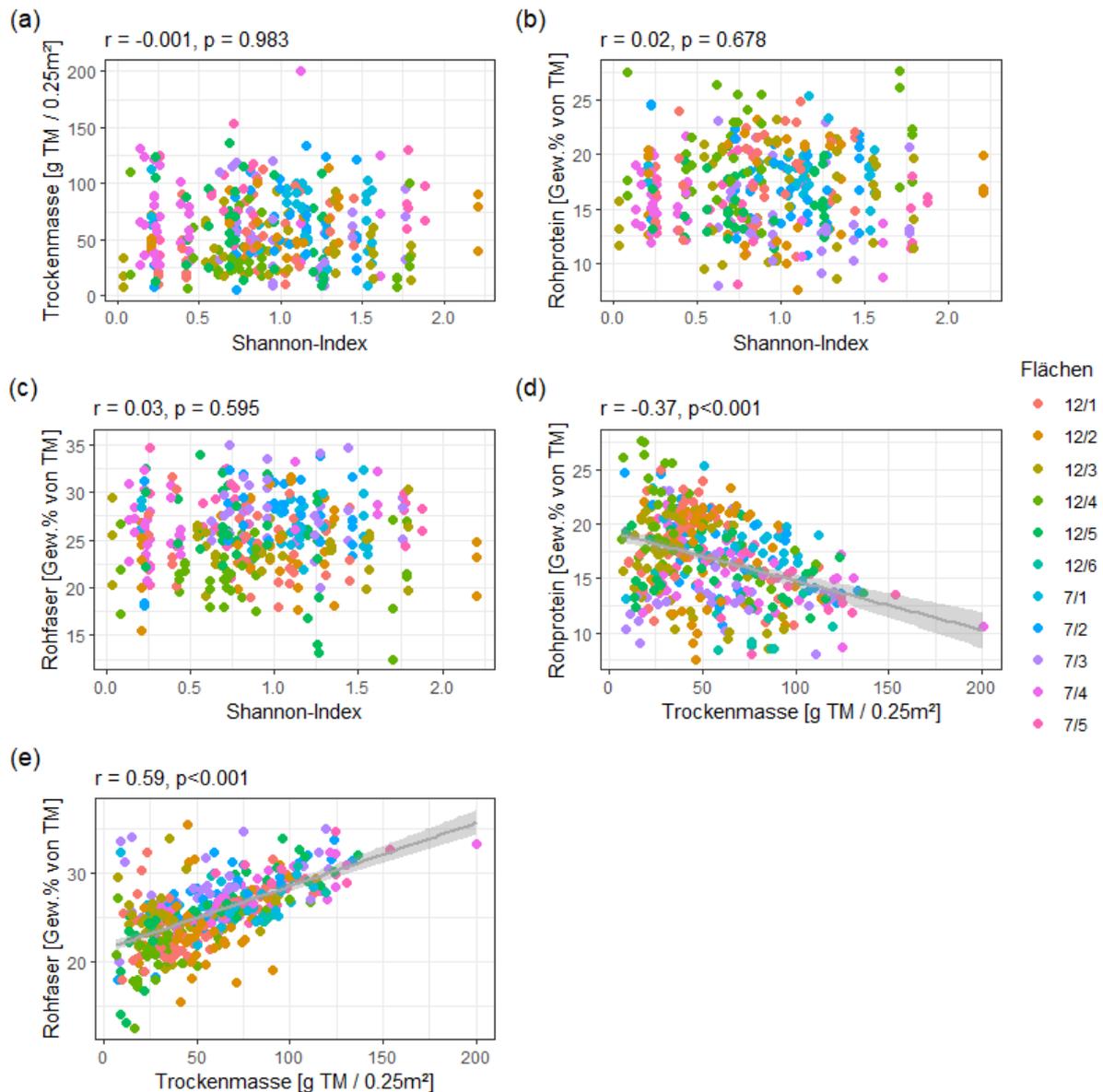
## **5. Zusammenfassende Bewertung**

Unsere Untersuchungen in 11 Grünlandschlägen in einem feuchten und einem trockenen Sommer zeigen, dass mit der Kombination von Drohnenbefliegung und lokalem Höhennivellement mit einem präzisen GPS-System detailgenaue Höhenkarten mit Zentimeterauflösung erzeugt werden können, die als Grundlage für die Kartierung von Standortvariablen und ertragskundlich relevanten Größen dienen können. In beiden Messjahren wird eine nicht erwartete kleinräumige Heterogenität in der Bodenfeuchte sowie wichtigen ertragskundlichen Parametern sichtbar, die ursächlich vor allem mit der relativen Höhenlage innerhalb des Schlages zusammenhängt.

Aus den vorliegenden Datensätzen und Geländebeobachtungen während sommerlicher Trockenperioden wird deutlich, dass das heterogene Relief von typischen Grünlandschlägen auf nordwestdeutschen Moorböden erhebliche Konsequenzen für den Ertrag und die Futterqualität der Aufwüchse hat. Der zugrundeliegende Einflussfaktor ist offensichtlich die räumliche Heterogenität der Bodenwasserverfügbarkeit und des Lufthaushaltes des Bodens. Bei den wichtigen Qualitätskriterien Rohprotein- und Rohfasergehalt des Aufwuchses wurden Schwankungen von jeweils bis zu 170 g/kg TS festgestellt. Das bedeutet, dass zeitgleich auf einer Fläche Futter angeboten wird, das als hochwertiges Futter für Milchkühe verwertet werden kann, während in anderen Bereichen das Futter eine Qualität hat, die gerade noch zur Ernährung weniger anspruchsvoller Tierarten und –gruppen, wie etwa trockenstehende Kühe, Aufzuchtfernen im zweiten Lebensjahr oder wenig beanspruchte Pferde ausreicht. In der wissenschaftlichen Literatur ist ein solches Ausmaß an Variabilität bei Futterqualitätseigenschaften bisher kaum beschrieben worden. So sind die Konsequenzen für das Grünlandmanagement auch kaum untersucht bzw. bedacht. Es ist davon auszugehen, dass mit Weidesystemen diese Variabilität besser beherrscht werden kann als mit Schnittsystemen. Weidetiere zeigen Präferenzen bei der Futteraufnahme. So ist bekannt, dass es diurnale Muster im Hinblick auf die Selektion der Futterqualität gibt. Rinder und Schafe präferieren am Morgen eher eine hohe Qualität des Futters, während zum Abend hin auch rohfaserreicherer Futter

aufgenommen wird. Weidetiere können also Variabilität in Futterqualitäten ausnutzen und damit die Effizienz der Futtermittelverwertung insgesamt erhöhen.

-



**Abbildung 11:** Beziehungen zwischen dem Shannon-Diversitätsindex und den Variablen Trockenmasse [g TM/0.25m<sup>2</sup>], Rohprotein- und Rohfasergehalt [Gew.% der Trockenmasse] und der Trockenmasse [g] und dem Rohprotein- und Rohfasergehalt [Gew.% der Trockenmasse], gemittelt über alle Termine.

Der Befund, dass die Aufwuchsmenge sowohl im trockenen wie auch im feuchten Sommer eng von der Bodenfeuchte abhängt, unterstreicht die große Bedeutung ausreichender

Wasserversorgung für die Produktivität des Moorgrünlands auch im ozeanischen Klima Nordwestdeutschlands. Trockenere Kuppen zeigten im trockenen Spätsommer 2022 an verschiedenen Stellen Absterben der Vegetationsdecke bis hin zum völligen Verlust der oberirdischen Biomasse (s. Fotos in Abb. 6). Kuppen und Senken im Relief eines Grünlandschlages scheinen dabei unterschiedliche Beiträge zum Erhalt der Grünlandproduktivität zu leisten: Unsere Ergebnisse deuten an, dass die Senken notwendig sind, um in trockenen Sommern die Ertragseinbußen zu reduzieren. Andererseits wurden im feuchten Sommer an den bodentrockeneren Kleinstandorten höhere Proteingehalte gemessen; die Senken scheinen in Zeiten von viel Wasser eine geringere Futterqualität bereitzustellen. Vor dem Hintergrund der mit dem Klimawandel zunehmenden Variabilität von Niederschlägen und dem verstärkten Auftreten von Trockenperioden kommt dem Mikrorelief im Intensivgrünland daher wahrscheinlich eine produktionsunterstützende Funktion zu, indem für maximalen Ertrag und Futterqualität zu niedrige und zu hohe Bodenfeuchte im Schlag nur lokal auftreten und fast durchgehend bestimmte Bereiche mit günstigen Produktionsbedingungen vorhanden sind. Strukturelle Heterogenität im Grünland würde danach witterungsbedingte interannuelle Produktionsschwankungen abschwächen und zum Erhalt der Futterqualität in besonders trockenen und feuchten Jahren beitragen.

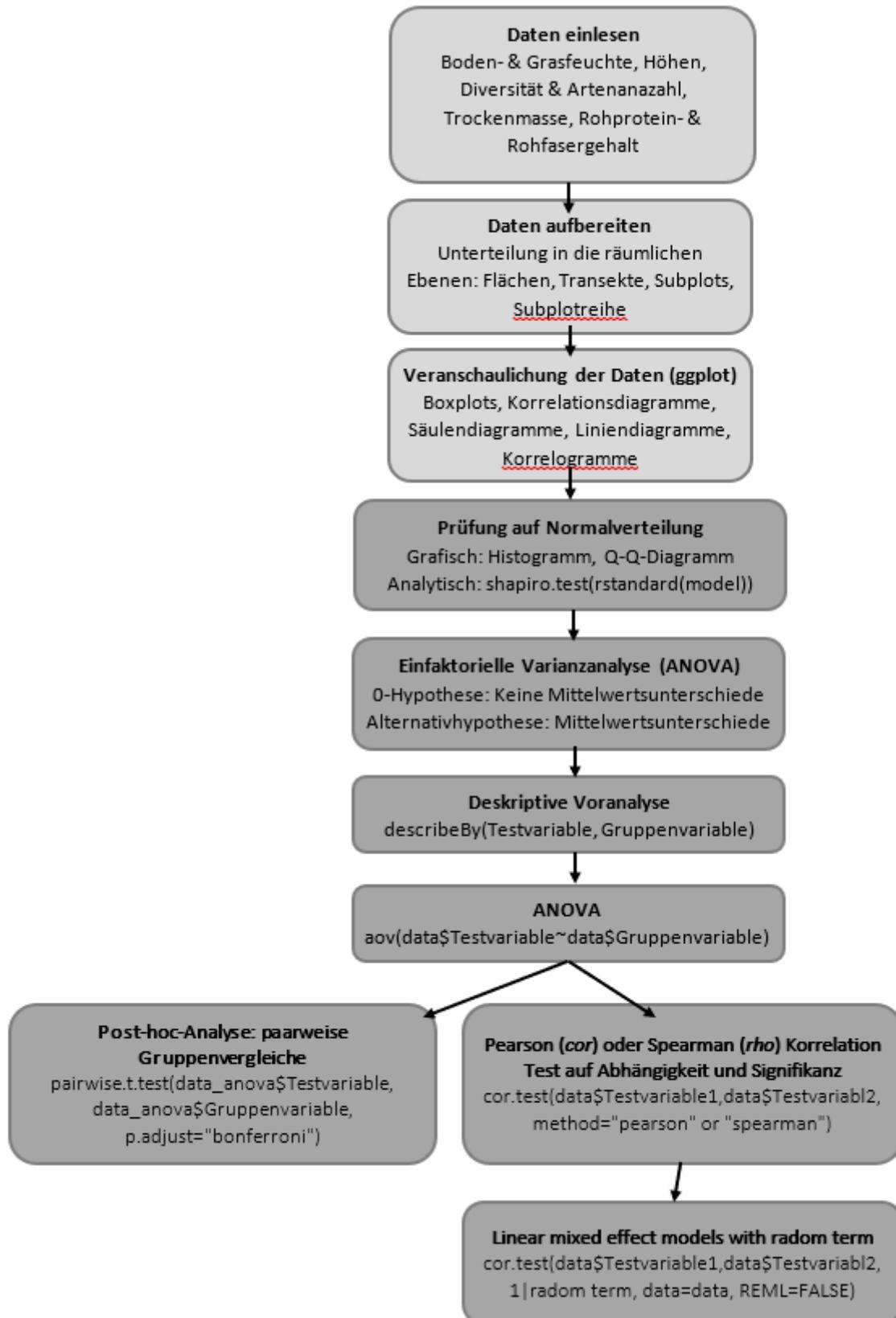
In der landwirtschaftlichen Praxis ist es bisher wenig bekannt bzw. beachtet, dass trotz einheitlicher Schnittbewirtschaftung und Düngung die räumliche Variabilität wichtiger Grasnarbeneigenschaften so erheblich ausfallen kann. Beim Management von Grünlandflächen wird der Grünlandschlag als Einheit behandelt, ein räumlich differenziertes Management ist unüblich.

Die Befunde zur Rolle des Shannon-Diversitätsindex als Maß der Phytodiversität deuten an, dass die Produktivität der untersuchten Grünländer nicht mit zunehmender Artenzahl ansteigt. Vermutlich ist die spezifische Artenkombination einflussreicher als die Artenzahl per se.

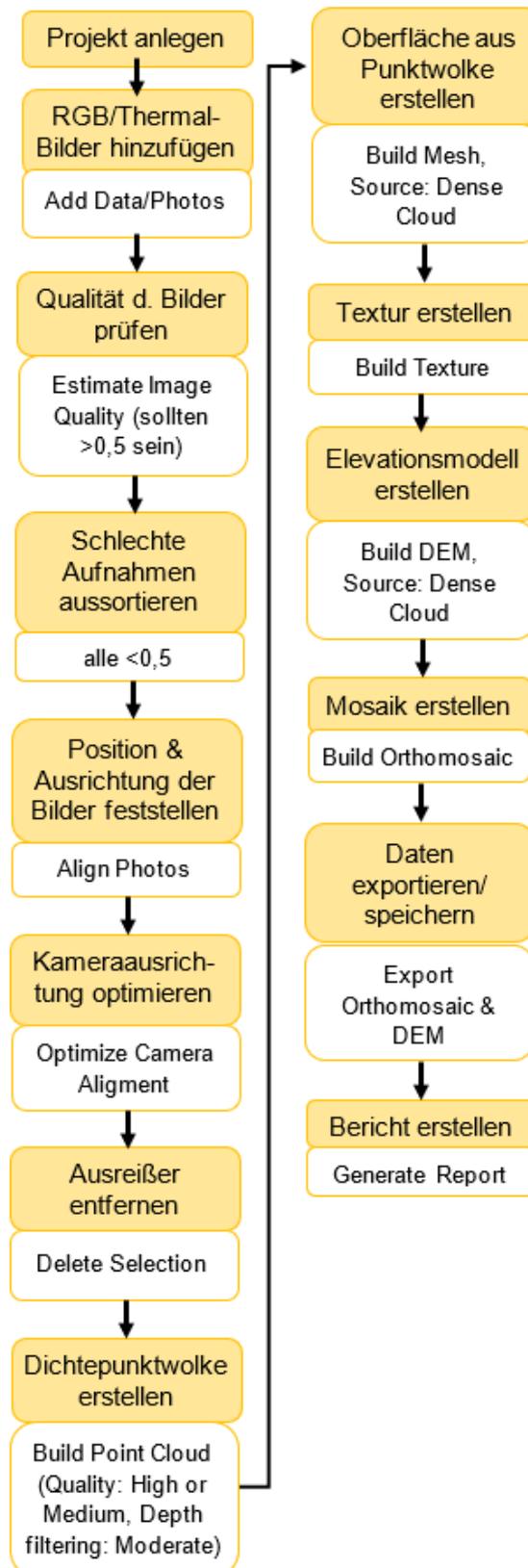
Unsere Ergebnisse zeigen, dass vom Relief her heterogene Grünlandschläge im nordwestdeutschen Tiefland im Hinblick auf den Klimawandel durchaus vorteilhaft für das Grünlandmanagement sein können, indem die negativen Auswirkungen von Wassermangel in trockenen Sommern und zu hohem Wasserstand in feuchten Sommern im Schlag den Ertrag nur lokal beeinträchtigen. Zugleich erhöht die Relief-Heterogenität die Artenvielfalt

im Schlag durch das Vorkommen verschiedenartiger Kleinlebensräume, auch wenn Rote Liste- oder HNV-Arten nur ausnahmsweise im Intensivgrünland auftreten. Unsere Ergebnisse lassen es sinnvoll erscheinen, dass das Management sich an diese Heterogenität anpasst und damit ökologische Ziele (Artenvielfalt) und agronomische Ziele (Ertragsstabilität und proteinreicher Aufwuchs) der Bewirtschaftung besser miteinander verknüpft werden können. Perspektiven hierfür bieten jüngste technologische Entwicklungen zum ‚smart grassland farming‘ oder zum ‚virtual herding‘ von Weidetieren. Hier sollte auch zukünftige Forschung ansetzen. Das Weidemanagement ist in der Weise zu entwickeln, dass die kleinräumige Variabilität der trophischen Bedingungen genutzt wird, um die variablen Ansprüche der Weidetiere besser zu erfüllen. Gleichzeitig können die Weidetiere als ‚ökologische Ingenieure‘ verstanden werden, die auf die räumliche Heterogenität spezifisch reagieren und damit auf weitere Ökosystemleistungen des Grünlands wie die Biodiversität oder die Kohlenstoffbindung unterstützend wirken. Die in der vorliegenden Studie erarbeiteten Ergebnisse lassen erkennen, dass hier ein Potential für eine verbesserte multifunktionale Grünlandwirtschaft liegt.

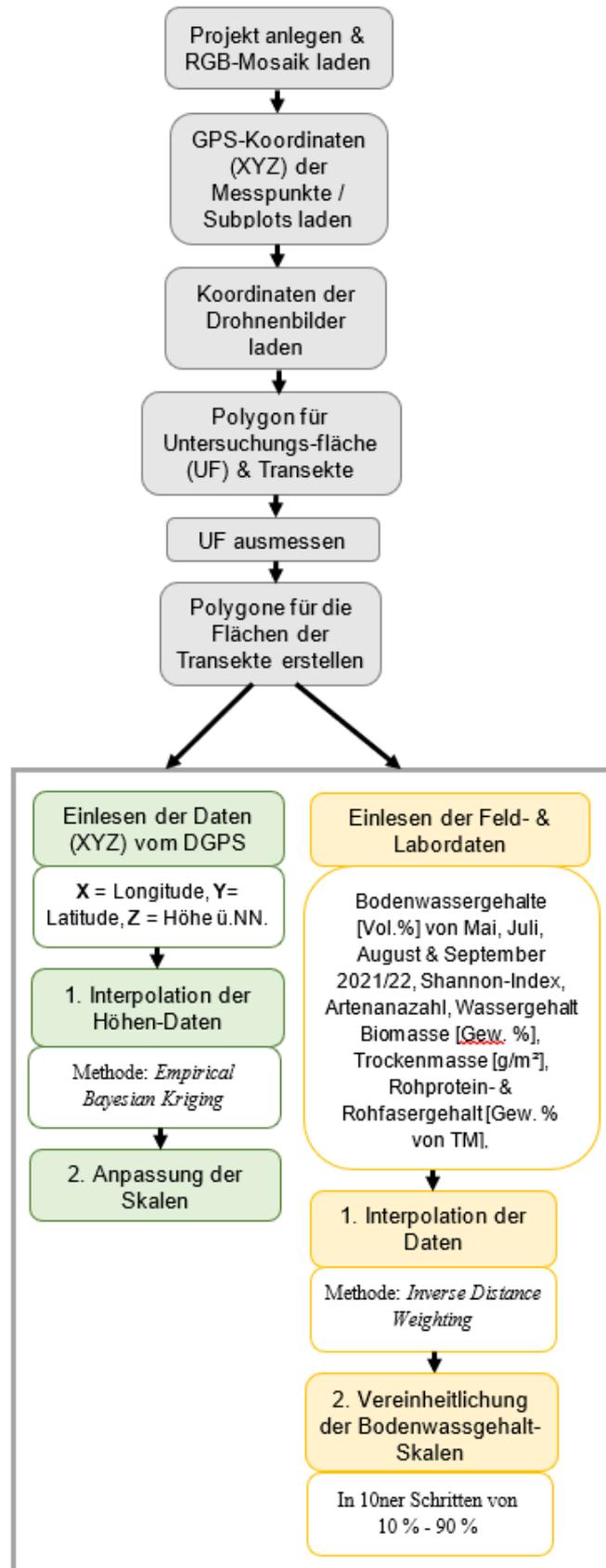
## Anhang I: Workflow in R-Studio



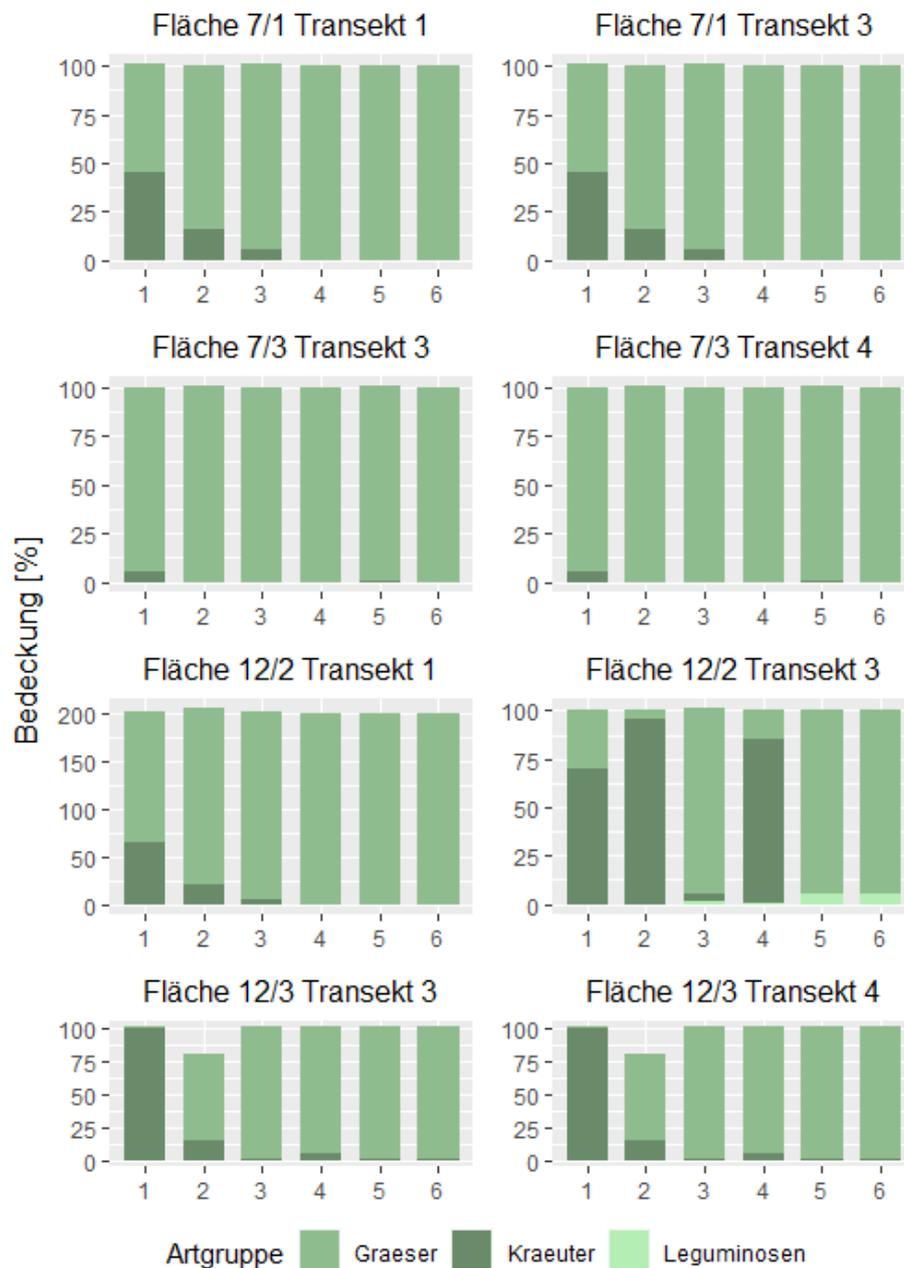
## Anhang II: Workflow in Agisoft Metashape Professional



## Anhang III: Workflow in ArcGIS Pro



## Anhang IV: Verhältnis Gräser-Kräuter-Leguminosen auf den Flächen 7/1, 7/3 und 12/2+3 für 2021



Verhältnis von Gräsern, Kräutern und Leguminosen in den Subplots und Transekten der Untersuchungsflächen 7/1, 7/3, 12/2 und 12/3.

## Anhang V: Gesamtartenliste für die Flächen 7/1, 7/3, 12/2 & 12/3 in 2022

Flaeche	Transekt	Subplot	Artgruppe	Art	Hoehenposition
7_1	4	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_1	4	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
7_1	4	2	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_1	4	2	Graeser	Festuca rubra	Hoehe
7_1	4	2	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_1	4	2	Graeser	Poa humilis	Hoehe
7_1	4	3	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_1	4	3	Graeser	Festulolium	Hoehe
7_1	4	3	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_1	4	3	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_1	4	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_1	4	4	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_1	4	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_1	4	4	Graeser	Poa humilis	Senke
7_1	4	5	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_1	4	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_1	4	5	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_1	4	6	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_1	4	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_1	4	6	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_1	2	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_1	2	1	Graeser	Festuca rubra	Senke
7_1	2	1	Graeser	Poa humilis	Senke
7_1	2	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
7_1	2	2	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_1	2	2	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_1	2	2	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_1	2	2	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
7_1	2	2	Graeser	Poa humilis	Hoehe
7_1	2	2	Kraeuter	Rumex ascetosella	Hoehe
7_1	2	3	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_1	2	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_1	2	3	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_1	2	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_1	2	3	Kraeuter	Cerastium font.	Senke
7_1	2	3	Leguminose	Trifolium repens	Senke
7_1	2	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_1	2	4	Graeser	Festulolium	Senke
7_1	2	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_1	2	4	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_1	2	5	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
7_1	2	5	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_1	2	5	Graeser	Poa humilis	Hoehe
7_1	2	6	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe

7_1	2	6	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
7_1	2	6	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_1	2	6	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_1	2	6	Graeser	Poa humilis	Hoehe
7_1	2	6	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
7_3	1	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	1	1	Graeser	Festuca rubra	Senke
7_3	1	1	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	1	2	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
7_3	1	2	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	1	2	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	1	2	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	1	2	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_3	1	2	Kraeuter	Taraxacum off	Senke
7_3	1	3	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
7_3	1	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	1	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	1	4	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
7_3	1	4	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
7_3	1	4	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_3	1	5	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	1	5	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
7_3	1	5	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	1	5	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	1	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	1	6	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
7_3	1	6	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
7_3	1	6	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_3	1	6	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
7_3	2	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_3	2	1	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
7_3	2	2	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_3	2	2	Kraeuter	Rumex ascetosella	Hoehe
7_3	2	3	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	2	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	2	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	2	4	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	2	4	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
7_3	2	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	2	4	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	2	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	2	4	Leguminose	Trifolium repens	Senke
7_3	2	5	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
7_3	2	5	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_3	2	5	Graeser	Phalaris arundinacea	Hoehe
7_3	2	5	Graeser	Poa trivialis	Hoehe

7_3	2	6	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	2	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	3	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_3	3	1	Graeser	Festuca rubra	Hoehe
7_3	3	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Hoehe
7_3	3	2	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	3	2	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
7_3	3	2	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	3	2	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_3	3	2	Kraeuter	Cerastium glom.	Senke
7_3	3	2	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
7_3	3	2	Leguminose	Trifolium repens	Senke
7_3	3	3	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	3	3	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	3	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	3	3	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	3	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	3	4	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	3	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	3	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	3	5	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	3	5	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	3	5	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	3	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	3	6	Graeser	Agrostis stolonifera	Senke
7_3	3	6	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	3	6	Graeser	Festulolium	Senke
7_3	3	6	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	3	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	4	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
7_3	4	1	Graeser	Elymus repens	Hoehe
7_3	4	1	Graeser	Festuca rubra	Hoehe
7_3	4	1	Graeser	Festulolium	Hoehe
7_3	4	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Hoehe
7_3	4	2	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
7_3	4	2	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	4	2	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	4	2	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	4	2	Graeser	Poa trivialis	Senke
7_3	4	2	Kraeuter	Cerastium glom.	Senke
7_3	4	3	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	4	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	4	3	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	4	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	4	4	Graeser	Elymus repens	Hoehe
7_3	4	4	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe

7_3	4	4	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
7_3	4	4	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
7_3	4	5	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	4	5	Graeser	Holcus lanatus	Senke
7_3	4	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
7_3	4	5	Graeser	Phleum pratense	Senke
7_3	4	6	Graeser	Elymus repens	Senke
7_3	4	6	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
7_3	4	6	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	1	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
12_2	1	1	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	1	1	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	1	1	Kraeuter	Taraxacum off	Senke
12_2	1	1	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	1	2	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	1	2	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	1	2	Kraeuter	Ranunculus repens	Senke
12_2	1	2	Kraeuter	Taraxacum off	Senke
12_2	1	2	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	1	3	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	1	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	1	3	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_2	1	3	Kraeuter	Ranunculus repens	Senke
12_2	1	3	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	1	4	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_2	1	4	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	1	4	Graeser	Poa trivialis	Hoehe
12_2	1	4	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_2	1	5	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	1	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	1	5	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_2	1	5	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	1	6	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	1	6	Graeser	Elymus repens	Senke
12_2	1	6	Graeser	Festulolium	Senke
12_2	1	6	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	2	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
12_2	2	1	Graeser	Festuca rubra	Hoehe
12_2	2	1	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
12_2	2	1	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	2	1	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_2	2	1	Kraeuter	Achillea millefolium	Hoehe
12_2	2	1	Kraeuter	Rumex acetosella	Hoehe
12_2	2	1	Kraeuter	Stellaria media	Hoehe
12_2	2	2	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
12_2	2	2	Graeser	Alopecurus pratensis	Hoehe

12_2	2	2	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
12_2	2	2	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	2	2	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_2	2	2	Kraeuter	Rumex ascetosella	Hoehe
12_2	2	2	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_2	2	3	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_2	2	3	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
12_2	2	3	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	2	3	Graeser	Poa trivialis	Hoehe
12_2	2	3	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_2	2	4	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_2	2	4	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
12_2	2	4	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	2	4	Kraeuter	Polygonum aviculare	Hoehe
12_2	2	4	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_2	2	5	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	2	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	2	5	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	2	5	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_2	2	5	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	2	6	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	2	6	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	2	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	2	6	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	2	6	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_2	2	6	Kraeuter	Rumex obtusifolius	Senke
12_2	2	6	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	3	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
12_2	3	1	Graeser	Agrostis stolonifera	Senke
12_2	3	1	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	3	1	Graeser	Festuca rubra	Senke
12_2	3	1	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	3	1	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	3	1	Graeser	Poa humilis	Senke
12_2	3	1	Kraeuter	Achillea millefolium	Senke
12_2	3	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
12_2	3	1	Kraeuter	Stellaria graminea	Senke
12_2	3	2	Graeser	Agrostis stolonifera	Senke
12_2	3	2	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	3	2	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	3	2	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	3	2	Kraeuter	Achillea millefolium	Senke
12_2	3	2	Kraeuter	Epilobium	Senke
12_2	3	2	Kraeuter	angustifolium	Senke
12_2	3	2	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
12_2	3	2	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	3	3	Graeser	Dactylis glomerata	Senke

12_2	3	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	3	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	3	3	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	3	3	Kraeuter	Polygonum aviculare	Senke
12_2	3	3	Kraeuter	Rumex obtusifolius	Senke
12_2	3	3	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	3	4	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	3	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	3	4	Graeser	Festulolium	Senke
12_2	3	4	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	3	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	3	4	Kraeuter	Polygonum aviculare	Senke
12_2	3	4	Kraeuter	Rumex obtusifolius	Senke
12_2	3	4	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	3	5	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	3	5	Graeser	Festulolium	Senke
12_2	3	5	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	3	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	3	5	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	3	5	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	3	6	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	3	6	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	3	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	3	6	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	4	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
12_2	4	1	Graeser	Antoxanthum	Hoehe
12_2	4	1	Graeser	odoratum	Hoehe
12_2	4	1	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
12_2	4	1	Kraeuter	Achillea millefolium	Hoehe
12_2	4	1	Kraeuter	Rumex acetosella	Hoehe
12_2	4	1	Kraeuter	Hieracium umbellatum	Hoehe
12_2	4	2	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_2	4	2	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	4	2	Kraeuter	Epilobium tetragonum	Hoehe
12_2	4	2	Kraeuter	Rumex acetosa	Hoehe
12_2	4	2	Kraeuter	Rumex acetosella	Hoehe
12_2	4	2	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_2	4	3	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_2	4	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_2	4	3	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	4	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	4	3	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_2	4	3	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_2	4	3	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	4	4	Graeser	Elymus repens	Senke
12_2	4	4	Graeser	Festulolium	Senke
12_2	4	4	Graeser	Lolium perenne	Senke

12_2	4	4	Kraeuter	Polygonum aviculare	Senke
12_2	4	4	Kraeuter	Rumex obtusifolius	Senke
12_2	4	4	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_2	4	5	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_2	4	5	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
12_2	4	5	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_2	4	5	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_2	4	6	Graeser	Festulolium	Senke
12_2	4	6	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_2	4	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_2	4	6	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_3	1	1	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
12_3	1	1	Graeser	Festuca rubra	Hoehe
12_3	1	1	Graeser	Holcus lanatus	Hoehe
12_3	1	1	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_3	1	1	Kraeuter	Rumex acetosella	Hoehe
12_3	1	2	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_3	1	2	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
12_3	1	2	Graeser	Festulolium	Hoehe
12_3	1	2	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_3	1	2	Kraeuter	Rumex acetosa	Hoehe
12_3	1	2	Kraeuter	Rumex acetosella	Hoehe
12_3	1	2	Kraeuter	Rumex obtusifolius	Hoehe
12_3	1	3	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	1	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	1	3	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	1	3	Graeser	Poa trivialis	Senke
12_3	1	3	Kraeuter	Epilobium tetragonum	Senke
12_3	1	4	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_3	1	4	Graeser	Festulolium	Hoehe
12_3	1	4	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_3	1	4	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_3	1	4	Graeser	Poa trivialis	Hoehe
12_3	1	4	Kraeuter	Polygonum aviculare	Hoehe
12_3	1	4	Kraeuter	Ranunculus repens	Hoehe
12_3	1	4	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_3	1	5	Graeser	Agrostis capillaris	Hoehe
12_3	1	5	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_3	1	5	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe
12_3	1	5	Graeser	Festulolium	Hoehe
12_3	1	5	Kraeuter	Cerastium font.	Hoehe
12_3	1	5	Kraeuter	Epilobium tetragonum	Hoehe
12_3	1	5	Kraeuter	Taraxacum off	Hoehe
12_3	1	5	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_3	1	6	Graeser	Dactylis glomerata	Hoehe
12_3	1	6	Graeser	Festuca arundinacea	Hoehe

12_3	1	6	Graeser	Lolium perenne	Hoehe
12_3	1	6	Graeser	Phleum pratense	Hoehe
12_3	1	6	Kraeuter	Epilobium tetragonum	Hoehe
12_3	1	6	Leguminose	Trifolium repens	Hoehe
12_3	3	1	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
12_3	3	1	Graeser	Agrostis stolonifera	Senke
12_3	3	1	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	1	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	3	1	Graeser	Festuca rubra	Senke
12_3	3	1	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	3	1	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_3	3	1	Kraeuter	Rumex acetosa	Senke
12_3	3	1	Kraeuter	Rumex ascetosella	Senke
12_3	3	2	Graeser	Agrostis capillaris	Senke
12_3	3	2	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	2	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	3	2	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_3	3	2	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	3	3	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	3	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	3	3	Graeser	Festuca rubra	Senke
12_3	3	3	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_3	3	4	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	4	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	3	4	Graeser	Holcus lanatus	Senke
12_3	3	4	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	3	4	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_3	3	4	Kraeuter	Epilobium tetragonum	Senke
12_3	3	4	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_3	3	5	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	5	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	3	5	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_3	3	5	Leguminose	Trifolium repens	Senke
12_3	3	6	Graeser	Dactylis glomerata	Senke
12_3	3	6	Graeser	Festuca arundinacea	Senke
12_3	3	6	Graeser	Lolium perenne	Senke
12_3	3	6	Graeser	Phleum pratense	Senke
12_3	3	6	Leguminose	Trifolium repens	Senke

## **Anhang VI: Veröffentlichung**

### **Micro-topography causes considerable small-scale variation in harvest and forage quality of high-yielding silage grassland in northern Germany**

Angelika Mroncz<sup>1</sup>, Johannes Isselstein<sup>2</sup>, Christoph Leuschner<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Plant Ecology, Albrecht von Haller Institute for Plant Sciences, University of Goettingen, Untere Karspüle 2, 37073 Göttingen, Germany

<sup>2</sup> Grassland Science, Department of Crop Sciences, University of Goettingen, Von-Siebold-Str. 8, 37075 Göttingen, Germany

<sup>3</sup> Corresponding author: cleusch@gwdg.de

#### **Abstract**

Intensive grassland farming in northern Germany was imperilled by the extreme 2018/19 hot drought that caused local sward dieback especially in grasslands on peat soil. Here, we explore, for the first time, the influence of micro-topography, i.e. the within-field mosaic of depressions and elevated patches, on volumetric soil water content ( $\theta$ ), standing biomass, and biomass protein and fibre content in intensively managed grassland for silage production on peat soil in a moist (2021) and a dry vegetation period (2022) with the aim to quantify small-scale spatial heterogeneity and examine height and soil moisture effects on yield and fodder quality. GPS-based fine levelling showed that elevation can vary by 30-50 cm over 50 m distance within fields, causing pronounced small-scale variation in soil moisture, biomass and fodder quality. Top soil (0-10cm)  $\theta$  decreased on average by 11-16 % per 50 cm height increase, causing a close moisture dependence of productivity and standing biomass variation by a factor of 4 within a field. Biomass crude protein content ranged from 10 % to 25 % within a field, being lower in moist depressions, while soil moisture did not show such an effect in the dry summer of 2022. We conclude that the moister depressions in a field help limiting the overall productivity decline in dry summers, whereas the drier higher patches produce in moist summers more protein-rich fodder than the depressions, where productivity is higher but fodder quality apparently lower. We advise to adapt grassland management to this heterogeneity through the introduction of

spatially differentiated management regimes in order to better cope with a drying and more variable climate and to meet environmental targets (biodiversity protection, water retention).

**Key words:** biomass map, dairy farming, drought, elevation differences, protein content, silage grassland, soil moisture map

## Introduction

Climate warming has increased the frequency and severity of hot droughts in Europe and elsewhere in recent decades, exposing agriculture and forestry to increasing hazards. Especially the exceptional 2018-2020 drought and heat episode has caused considerable damage in Central Europe's agriculture sector. This hot drought is thought to be the most severe since about 2100 years (Zscheischler & Fischer 2020; Büntgen et al. 2021), and climate simulations predict a further increase in the occurrence of hot droughts in Central Europe (Hari 2020). In Germany, for example, the grain harvest of 2018 was reduced by about 26 % compared to the annual crop yield of the five previous years, with badly affected regions in Germany's north and east reporting harvest losses between 50 and 80 percent (Farm Europe 2018, Deter 2020). Not only arable crop production was impacted, but grassland farming on moist soil as well. For example, in northern Germany (Lower Saxony), grassland productivity was substantially reduced in the two exceptionally dry summers 2019 and 2020, causing fodder scarcity in the animal husbandry sector (Deter 2020).

A significant proportion of grassland farming in northern Germany is conducted on peat soils derived from former raised bogs that have been drained. In the federal state of Lower Saxony, about 205,400 ha of peatland are currently used for grassland farming, predominantly in intense form for silage production or rotational grazing (LBEG 2021). These soils are not only a critical source of carbon dioxide ( ), but they are also particularly vulnerable to drought due to their high topsoil carbon content. Even short dry spells frequently are disrupting the capillary rise of groundwater, causing soil desiccation despite high groundwater levels ( ). Especially sown grassland with productive, more drought-sensitive species on raised bog peat is especially sensitive to widespread drought damage. This was visible, for example, in the dry 2018 and 2019 summers in various grassland regions of north-west Germany on peat soils.

Climate change thus challenges grassland farming on peat soils in Central Europe in more than one way. First, to meet the climate change mitigation goals of the agricultural sector, a drastic reduction of greenhouse gas emissions from cultivated peat soils is mandatory (Joosten & Osterburg 2022). Second, the increasing climate change-induced drought exposure of grassland stands on former raised bogs has to be tackled, either by adjusting the hydrologic regime or by management alterations, if grassland farming is to be continued in future on such sites.

One aspect that has not yet received sufficient attention by grassland scientists and farmers alike, is the small-scale topographic heterogeneity of many cultural grasslands and its effect on hydrology and the composition of the grassland community. To increase yield and improve accessibility by machines, many grasslands in the lowlands of north-western Europe have been levelled in the second half of the 20<sup>th</sup> century to reduce the relief (Dierschke & Briemle 2002). This simultaneously has reduced the small-scale diversity of micro-habitats and with it grassland biodiversity. More uniform communities likely are responding to drought with lower resilience than more heterogeneous, species-richer stands, as diversity has frequently been found to increase stress tolerance (Hofer et al. 2017; Finn et al. 2018). Moreover, a more pronounced micro-relief likely will convey a more varied hydrologic regime in the different grassland patches, which could reduce the extent of drought damage and might increase recovery after a dry period. However, not much is known about the spatial heterogeneity of soil moisture and vegetation features and their relevance for yield and fodder quality in intensively used grassland.

To close this knowledge gap, we conducted a pilot study on selected dairy farms in north-western Germany on intensively managed grassland on raised bog, measuring the small-scale variation in terrain height, soil moisture, vegetation biomass and fodder quality (protein and fibre content of dry mass) in several grassland fields with pronounced topography, as it was widespread in the past. The measurements covered a moist and a subsequent dry summer, thus spanning a broad range of soil moisture conditions. We asked the question whether heterogeneity in the micro-topography is significantly influencing soil moisture, biomass and fodder quality in intensive grassland on raised bog soil and how this variation might benefit grassland productivity in the face of climate change.

## Material and methods

The study was conducted during the moist summer of 2021 and the dry summer of 2022 in three intensively managed bog grassland areas in the marshes of river Weser near the city of Bremervörde (Lower Saxony, northern Germany), an agricultural landscape with intensive dairy farming. The climate is cool temperate with a mean annual temperature of 10.4 °C and mean annual precipitation of 705 mm (mean of period 2018-2022; German Weather Service, Offenbach). Small-scale variation in elevation, soil moisture and yield were studied in four grassland fields on two dairy farms (#7 and #12) close to the villages Fahren Dahl, Oberklenkendorf and Gnarrenburg (9,04-9,10°E, 53,41-53,42°N) that were used for silage production. The grassland fields with a size of 0.17-0.34 ha are located on raised bog peat that has been drained for cultivation. A system of drainage ditches is maintained to allow year-round access by agricultural machines. The intensively fertilized grassland is mown four to five times a year with no aftermath grazing. The grassland of farm #7 has a slightly undulating relief, caused by the deposited excavated material from ditch dredging, as is characteristic for many grassland regions of the north-west German alluvial plains at the North Sea coast. This is not the case on farm #12, where the grassland surface is mostly level with several minor depressions due to bog shrinkage. Both types of grassland topography are representative for the north-west German cultural grassland.

To map the small-scale variation in height level, soil moisture, vegetation biomass and fodder quality, we established each four transects of ca. 100 m length perpendicular to the longer field side from the drainage ditch into the field center and sampled in each six subplots of 0.25 m<sup>2</sup> size at different distances to the ditch (Fig. S2). In the grasslands without distinct relief (farm #12), the subplots cover all topographic elements, i.e. subplot 1 (lower ditch edge), 2 (upper ditch edge), and 3-6 (heights and depressions of the main patch). In the grasslands with field-internal trenches and related higher beds (farm #7), subplot 1 is located on the lower ditch, 2 on the upper ditch edge, 3 and 5 at the flanks (edges) of field-internal trenches, 4 at the bottom of a trench, and 6 on the (elevated) bed/main patch of the field. The elevation of the subplots was determined relative to sea level in summer 2022 with a Differential Global Positioning System (STONEX GNSS S900A, Stonex Germany, Nienburg, Germany) with an accuracy in the cm range. Volumetric soil moisture was determined gravimetrically in the topsoil (0-10 cm) with a metal cylinder of 332 cm<sup>3</sup> volume by measuring fresh and dry weight (24 h, 105 °C) and relating mass loss to volume. Earlier attempts to measure soil moisture with a TDR system were unsuccessful due to frequent errors related to the air-gap problem in humus-rich material. Soil moisture measurements were conducted in May, July, August and September 2021, and in May, August

and September 2022 (reduced sampling intensity in May and July 2021). Standing aboveground biomass was determined in May, July and August 2021 and in May and August 2022 in the subplots by cutting the biomass in squares of 50 cm x 50 cm at 1 cm height and measuring dry mass through drying for 48 h at 60 °C. The dry biomass was grinded and the powder sieved with 4-mm and 1-mm sieves for optical determination of crude protein content and crude fibre content of biomass (in % d.w.) with a Foss NIRsystems 6500 scanning monochromator (Foss, Silver Spring, MD, USA). Target variables were assessed using a grass and forage calibration based on more than 3000 calibration samples (Tillmann, 2010).

### *Statistical analyses*

In the data analysis, we focus on the four fields #7-1 and 7-3 and 12-2 and 12-3 with typical relief structures. Small-scale variation in terrain height was expressed as absolute height deviation from the field's mean elevation, i.e. values are given in cm below or cm above mean height. Spatial variation in site factors and vegetation properties was expressed through maps and frequency diagrams of the variables. Linear regression models were calculated to analyse the dependence of site and vegetation variables on terrain height, soil moisture and standing biomass. Means and standard deviation of site and vegetation parameters were contrasted between the moist summer of 2021 and the dry summer of 2022. Means of the years 2021 and 2022 were compared with a non-parametric Kruskal-Wallis test. All analyses were conducted with R software.

## **Results**

### *Spatial variability of soil moisture, biomass and fodder quality within grassland fields*

Volumetric water content in the topsoil was on average across all sites by 13 percentage points higher in the moist summer of 2021 than in the dry summer of 2022 (34.6 vs. 21.8 vol. %).

Averaged standing aboveground biomass was more than twice as high in 2021 than in 2022.

While average biomass crude protein content was not different between the summers (16.6 vs. 17.0 %), crude fibre content was on average by 4 percentage points higher in 2021 than in 2022 (25.6 vs. 21.6 %; Table 1).

The micro-relief in the grassland fields had a pronounced effect on the small-scale variation in soil moisture, aboveground biomass and yield, and the crude protein and fibre content of the biomass. This is demonstrated by the example of site 7-3 in Figure 1 (detailed maps of the different measured parameters are presented in Figures S3 – S7 in the Supplement). The micro-topography maps in Figure S3 show that elevation can vary by 30-50 cm over distances 50 m

within a field in the studied grasslands. The relief heterogeneity is somewhat larger at sites 7-1 and 7-3 with field-internal trenches than at sites 12-2 and 12-3; yet, height levels vary here as well. The corresponding soil moisture maps indicate the depressions especially on site 7-3, which had higher water contents ( $\theta$ ) throughout the summer of 2021 and remained moister also in early summer 2022 (Fig. S4). In the dry summer of 2022, the small-scale moisture gradients seem to have diminished towards later in the season.

Soil moisture in the topsoil (0-10 cm layer) decreased significantly with increasing height of the grassland terrain in both the moist and the dry summers (Fig. 2). In the moist 2021 summer,  $\theta$  decreased by 11.4 vol. % per 50 cm increase in elevation, with on average 40 vol. % in the depressions and 25 vol. % on the highest patches. In the dry summer of 2022, the  $\theta$  decrease with elevation was even steeper with 15.8 vol. % 50 cm<sup>-1</sup> than in 2021.

The spatial variation in aboveground biomass in the fields during the summers of 2021 and 2022 is depicted in Figure S5.

For visualizing the small-scale variation in soil moisture, aboveground biomass, and fodder quality, the frequency diagrams in figure 3 demonstrate the parameter variability in the moist and dry summers of 2021 and 2022. Soil moisture, biomass and fibre content shifted from a more normal (or right-skewed) value distribution in moist 2021 to a markedly left-skewed distribution in dry 2022. This shift is most pronounced in soil moisture (where  $\theta$  values >42 vol. % were virtually absent in 2022) and biomass. In contrast, crude protein content reached similar arithmetic means in both summers, and the distribution shifted from a more right-skewed (2021) to a normal distribution (2022).

#### *Soil moisture and elevation effects on biomass and fodder quality*

Aboveground dry matter production (standing biomass) showed a highly significant increase with soil moisture in both study years, but the slope was nearly twice as steep in the dry summer of 2022 as compared to moist 2021 (Fig. 4). In correspondence, higher biomass was recorded in the depressions, but this relationship was weaker than to soil moisture itself, and it was significant only in the dry summer of 2022, but disappeared in moist 2021. Overall, biomass varied up to fourfold at a given date within a field.

Figs. S6 and S7 demonstrate that the small-scale variation in crude protein and fibre content can be with a factor of 2 substantial within a single grassland field. Crude protein content in the aboveground biomass significantly decreased with increasing soil moisture in the moist summer

of 2021, but no soil moisture dependence was visible in the dry summer of 2022 (Fig. 5). Relative height had in both summers no significant influence on crude protein content.

In contrast to protein content, crude fibre content decreased with increasing soil moisture in the dry summer of 2022, but was unrelated to  $\theta$  in the moist summer of 2021 (Fig. 6). As for protein content, fibre content was not significantly influenced by relative height in the terrain. In the moist summer of 2021, crude fibre content increased with standing biomass, while it decreased in the dry summer of 2022. In contrast, protein content revealed no dependence on standing biomass, neither in the moist nor the dry summer (Fig. 7).

## **Discussion**

Our study at four grassland sites during a moist and a dry summer detected unexpectedly large within-field variation in plant biomass and fodder quality, likely caused by the pronounced micro-topography and mediated through gradients in soil moisture and oxygen content over small distances. From an agronomic perspective, a key finding is the large variation (up to 17 percentage points) in crude protein and fibre content of biomass within a given grassland field. Our results indicate that fodder quality is suitable for high-performance dairy cows, which require 15-20 % crude protein (Spiekers et al. 2009), only in certain parts of the fields, despite intensive fertilization. About 25-30 % of the field area produced biomass with <15 % protein content, which reduces overall fodder quality.

Both the transect analyses and the comparison of the two years highlight the large influence of soil moisture on standing biomass and fodder quality, even though the study sites are located in a humid climate and groundwater levels are relatively high. In fact, higher soil moisture enhanced standing biomass not only in the dry summer, but also in the moist summer, though to a lower degree. In correspondence, patchy vegetation dieback in the dry late-summer of 2022 occurred especially at higher elevations, but rarely in the depressions. In the dry summer of 2022, drought seems to have stimulated the development of cellulose fibrils and the formation of thicker cell walls, since biomass fibre content was the higher, the lower soil moisture and thus productivity was. Yet, the soil moisture effect on biomass fibre content was not visible in the moist summer of 2021, when fibre content increased with biomass production. Unexpected is our finding that soil moisture had only a weak effect on biomass protein content, as demonstrated by the non-significant difference of means of the summers 2021 and 2022, and the missing drought effect on protein content in the dry summer of 2022. In general, protein content was unrelated to dry matter production, i.e. high productivity did not result in a dilution of proteins by carbohydrates in the biomass. However, protein content was reduced by high soil

moisture in excess of ~40 vol. % during the moist summer of 2021. Most likely, soil hypoxia has temporarily impeded the metabolic activity of the dominant grassland plants (i.e. *Lolium perenne*, *Poa trivialis*, *Elymus repens* and *Taraxacum officinale*).

Thus, our results from two summers with contrasting soil moisture regimes indicate that soil water content is an important determinant of biomass production in these wet grasslands, while the high nitrogen fertilization guarantees protein contents of at least 10 % of dry mass also in dry years. Yet, in dry summers, productivity decreases especially in the higher sections of the field, where only a reduced harvest of fibre-rich, more straw-like biomass is possible. Such biomass components, which may only allow feeding heifers and non-lactating cows, should increase in importance with future climate aridification.

From these findings it appears that the micro-relief is stabilizing biomass production across the years: The moister depressions help limiting the overall productivity decline in dry summers, whereas the drier higher patches produce in moist summers more protein-rich fodder than the depressions, where productivity is higher but fodder quality apparently lower. Thus, depressions and elevated patches both contribute to maintaining yield and fodder quality over longer time spans. It appears that a pronounced micro-relief can better safeguard the temporal constancy of fodder production and quality of grassland fields under variable weather conditions than a uniform, level grassland, as patches with different growth conditions and contrasting drought exposure coexist over short distance. If more generally valid, this could be an advantage under a future a more variable and progressively aridifying climate. Moreover, topographic heterogeneity is usually associated with a more diverse plant community composition across different patches, which could also increase the sward's resilience after drought damage. This natural advantage may be lost, when the micro-relief of grasslands is levelled for the sake of management efficiency.

Exchange with farmers revealed that this small-scale heterogeneity in yield and fodder quality within a field is largely unnoticed and thus ignored in the practise of grassland farming. A grassland field is usually treated as a rather homogeneous management unit, and local topographic peculiarities do not lead to a spatially differentiated management regime. Our results suggest to value small-scale topographic heterogeneity, where it is still present, for its assumed positive effect on the stability and resilience of productivity. Small-scale heterogeneity may offer further benefits such as better water retention in depressions in a drying climate, and should support higher biodiversity, as compared to unstructured, level grasslands. Clearly, the positive effect on  $\beta$ -biodiversity will be limited, given the principally low species richness of

intensively managed mown grasslands (Krause et al. 2011, Wesche et al. 2012). Nevertheless, from an agronomic perspective, it seems advisable to adapt grassland management to this heterogeneity through the introduction of spatially differentiated management regimes in order to better couple economic goals (yield stability and maintenance of high protein content) and environmental targets (biodiversity protection, water retention). Recent agrotechnical developments such as computer-aided 'smart grassland farming' and 'virtual herding' may offer opportunities for progress in this direction ( ).

## References

Büntgen U, Urban O, Krusic PJ, Rybnicek M, Kolar T, Kyncl T et al. 2021. Recent European drought extremes beyond the Common Era background variability. Nat Geosci 14: 190–196.

Deter A 2020. Landwirtschaftskammer Niedersachsen stellt Ernteerträge 2020 vor. Top-Agrar online. 29/09/2020. <https://www.topagrar.com/acker/news/landwirtschaftskammer-niedersachsen-stellt-ernteertraege-2020-vor-12361894.html>

Dierschke, H., Briemle, G. 2002. Kulturgrasland. Ulmer, Stuttgart.

Farm Europe 2018. Drought in Europe summer 2018: Crisis management in an orderly chaos. Website post 02/10/2018. <https://www.farm-europe.eu/blog-en/drought-in-europe-summer-2018-crisis-management-in-an-orderly-chaos/>

Finn, J.A., Suter, M., Haughey, E., Hofer, D., Lüscher, A., 2018. Greater gains in annual yields from increased plant diversity than losses from experimental drought in two temperate grasslands. Agric. Ecosyst. Environ. 258, 149–153.

Hari V., 2020. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. Sci. Rep. 10.

Hofer, D., Suter, M., Haughey, A., Finn, J.A., Hoekstra, N.J., Buchmann, N., Lüscher, A., 2016. Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. J. Appl. Ecol. 53, 1023–1034.

Joosten, H., Osterburg, B. 2022. Boden gut machen. In: oekom e.V. – Verein für ökologische Kommunikation (ed.) Moore – Trümpfe in der Klimakrise. oekom Verlag, München. pp. 52-58.

Krause B., Culmsee H., Wesche K., Bergmeier E., Leuschner C. 2011. Habitat loss of floodplain meadows in north Germany since the 1950s. Biodiv Conserv 20: 2347-2364.

LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen), 2021. Mires and mire management (Moore und Moormanagement). [https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden\\_grundwasser/moore/](https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/moore/).

Spiekers H., Nussbaum H., Potthast V., 2009. Erfolgreiche Milchviehfütterung. DLG Verlag, 5. Auflage, 576 S.

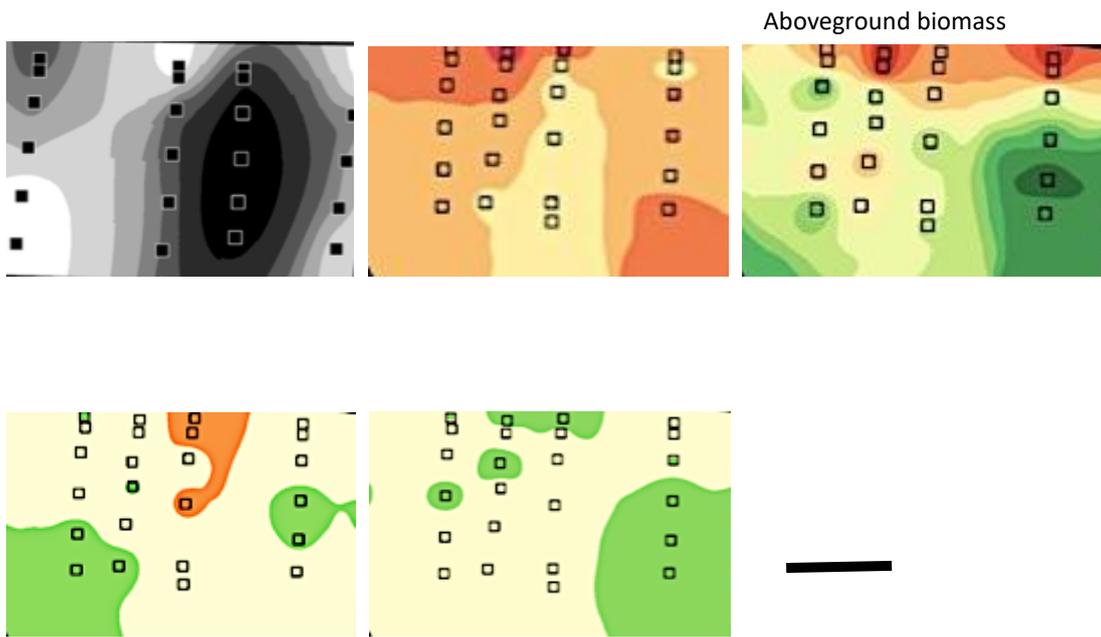
Tillmann, P. (2010). Anwendung der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) an Grünlandproben. VDLUFA Schriftenreihe, 66, 145–150.

Wesche K, Krause B, Culmsee H, Leuschner C 2012. Fifty years of change in Central European grassland vegetation: Large losses in species richness and animal-pollinated plants. *Biol Conserv* 150: 76-85.

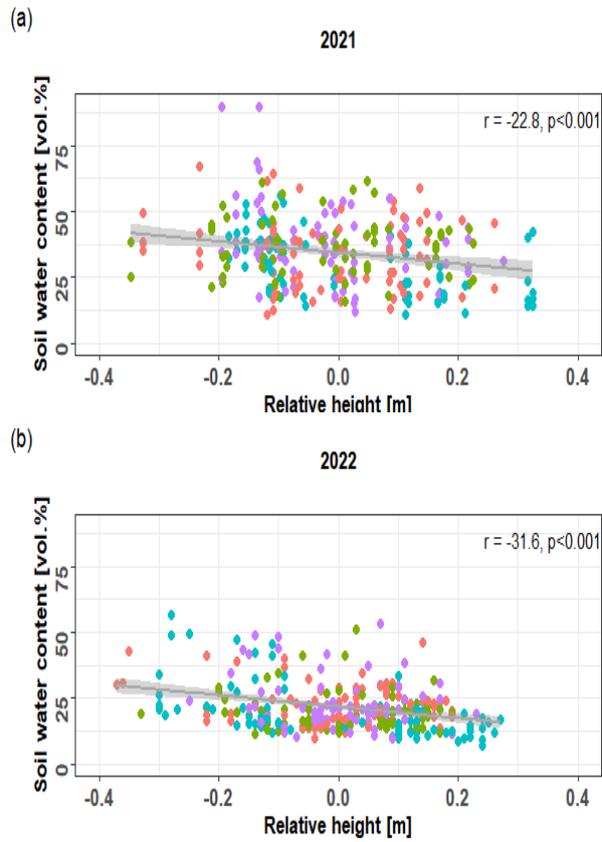
Zscheischler J, Fischer EM 2022. The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany. *Weather and Climate Extremes* 29, 100270.

**Table 1.** Means (and SD) of soil water content, standing dry matter, and crude protein and fibre content in the summers of 2021 and 2022, averaged over all sites.

	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<i>p</i>
Soil water content (vol. %)	34.62 ( $\pm$ 13.1)	21.76 ( $\pm$ 9.3)	
Dry matter (g m <sup>-2</sup> )	212.3 ( $\pm$ 107.7)	104.1 ( $\pm$ 70.2)	
Crude protein content (%)	16.6 ( $\pm$ 3.7)	17.0 ( $\pm$ 3.3)	
Crude fibre content (%)	25.6 ( $\pm$ 3.4)	21.6 ( $\pm$ 3.6)	

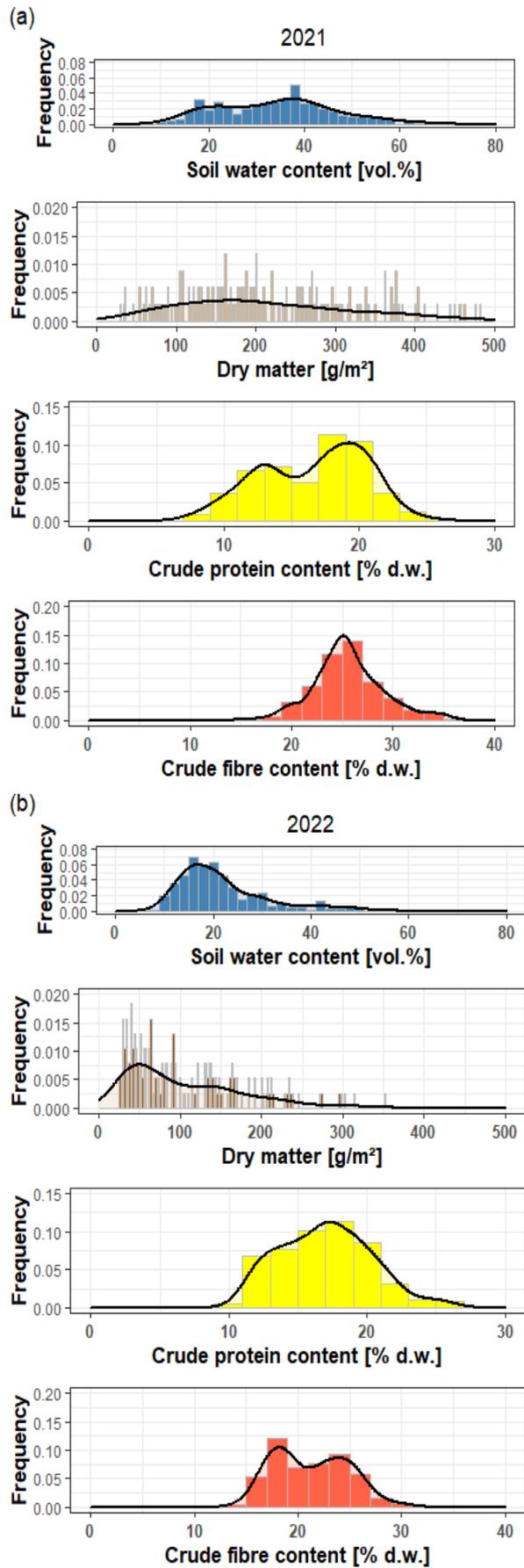


**Figure 1.** Small-scale variation in terrain height (micro-topography), topsoil water content, aboveground biomass, and crude protein and fibre content of biomass at site 7-3 in May 2022. For color keys see figures S3 – S7 in the Supplement.



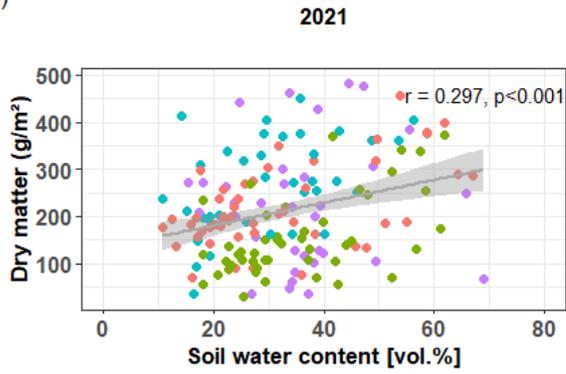
**Figure 2.** Dependence of soil water content on relative height in the relief of the four study sites in the moist summer of 2021 (a) and the dry summer of 2022 (b). Height is expressed relative to the respective mean height of a study site, i.e. in m above or below mean height (= 0). Each point is a single soil moisture measurement. Different sites are marked by different colors (for color key see Fig. 4).



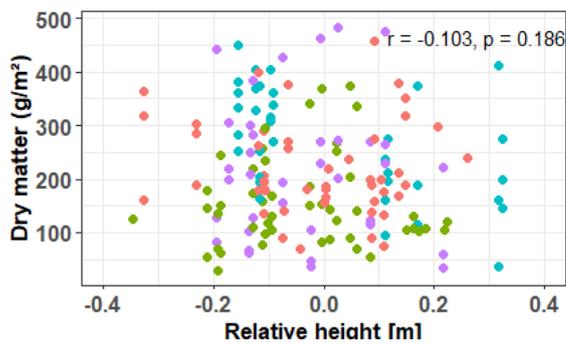


**Figure 3.** Frequency of soil water content, dry matter, and crude protein and fibre content in biomass values recorded in the study sites 7-1, 7-3, 12-2 and 12-3 during the moist summer of 2021 (a) and the dry summer of 2022 (b).

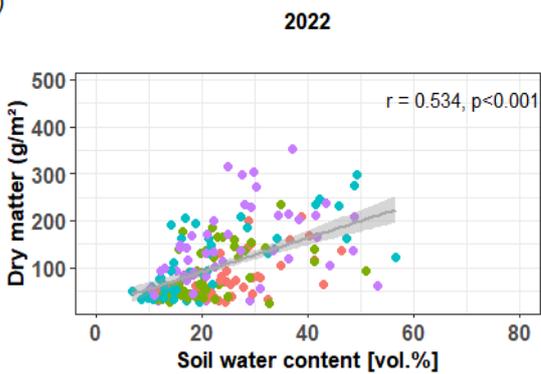
(a)



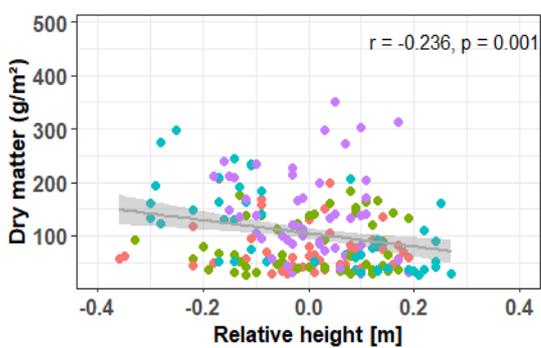
(b)



(c)

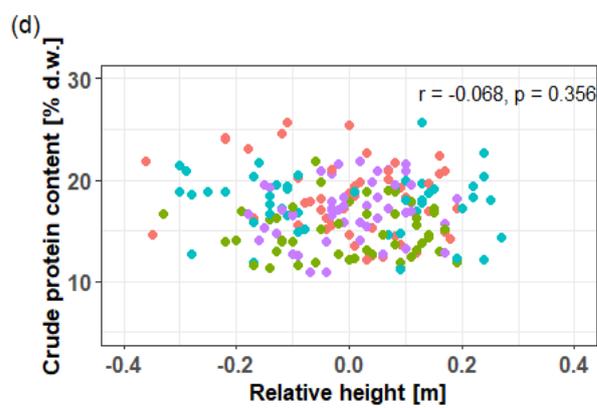
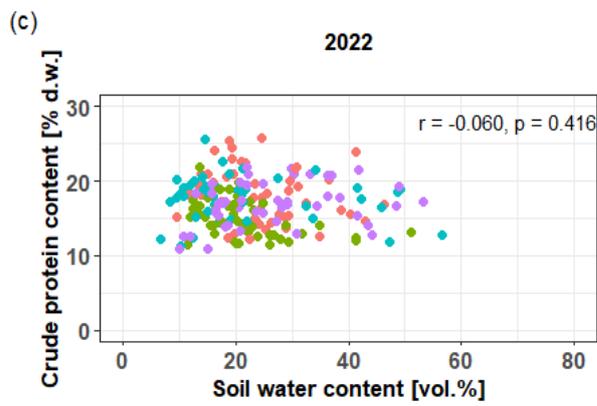
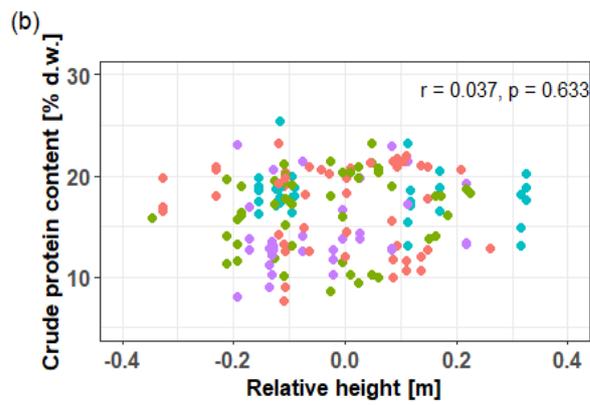
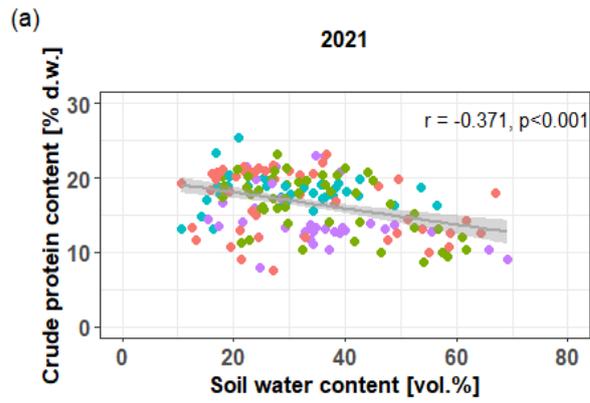


(d)



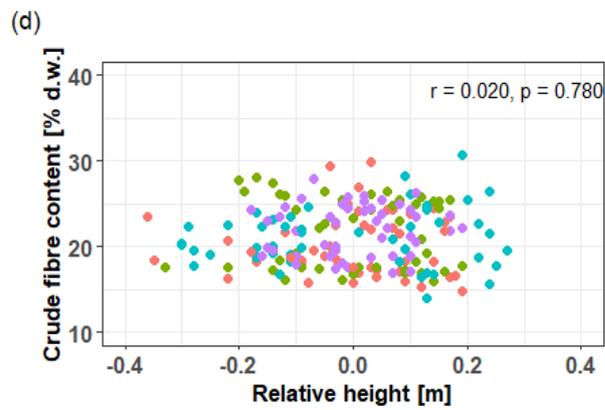
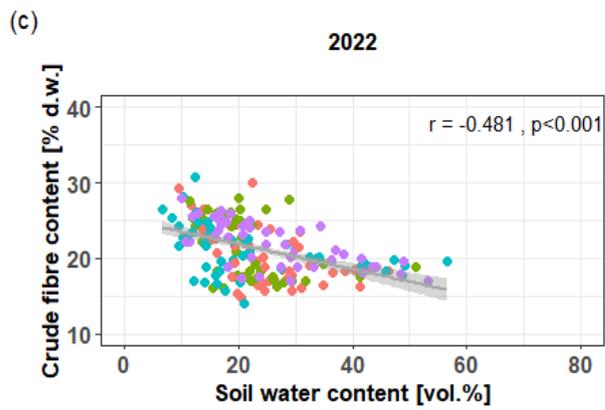
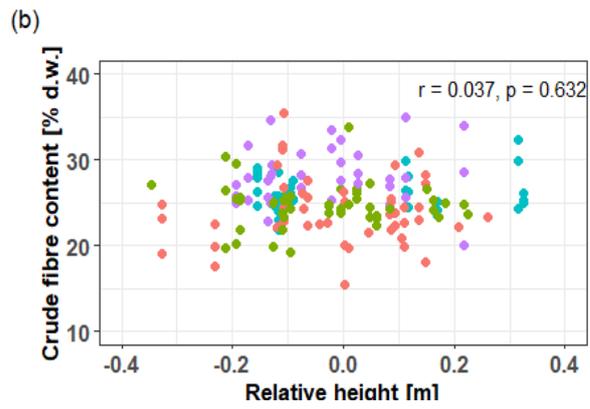
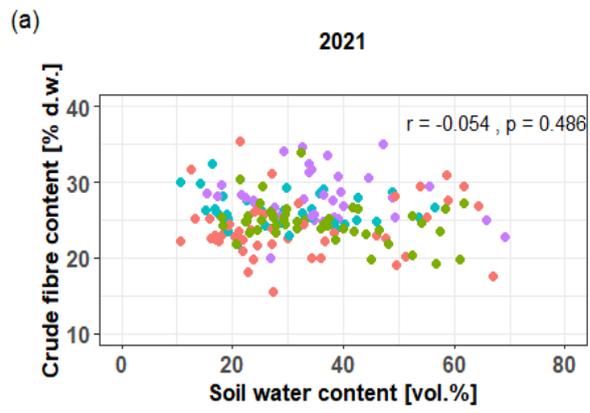
**Sites** ● 12\_2 ● 12\_3 ● 7\_1 ● 7\_3

**Figure 4.** Dependence of dry matter production (standing aboveground biomass) on soil water content or relative height in the four study sites in the moist summer of 2021 (a, b) and the dry summer of 2022 (c, d). Different sites are marked by different colors.



Sites ● 12\_2 ● 12\_3 ● 7\_1 ● 7\_3

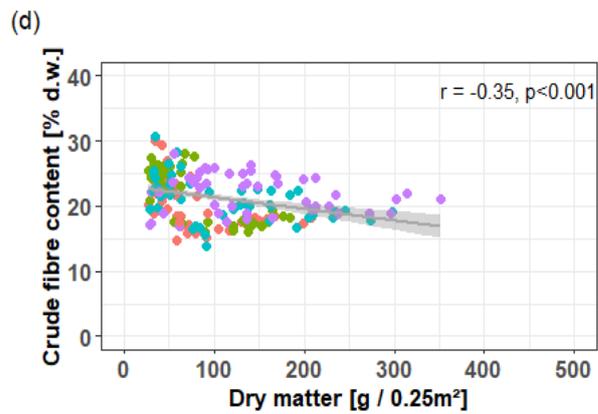
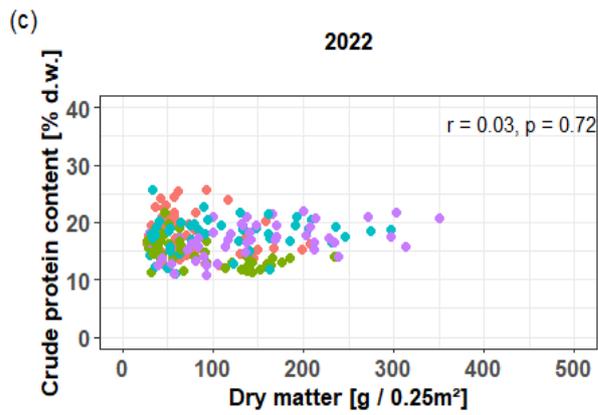
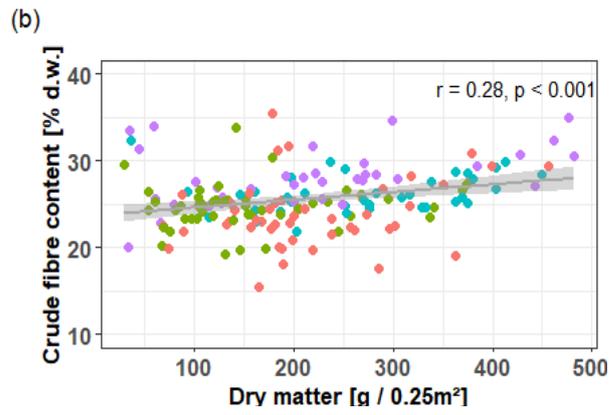
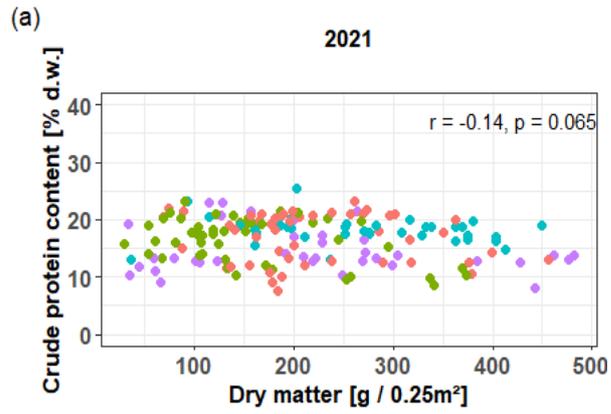
**Figure 5.** Dependence of crude protein content of biomass on soil water content or relative height in the four sites in the moist summer of 2021 (a, b) and the dry summer 2022 (c, d). Different sites are marked by different colors.



Sites ● 12\_2 ● 12\_3 ● 7\_1 ● 7\_3

**Figure 6.** Dependence of fibre protein content of biomass on soil water content or relative height in the four sites in the moist summer of 2021 (a, c) and the dry summer 2022 (b, d). Different sites are marked by different colors.

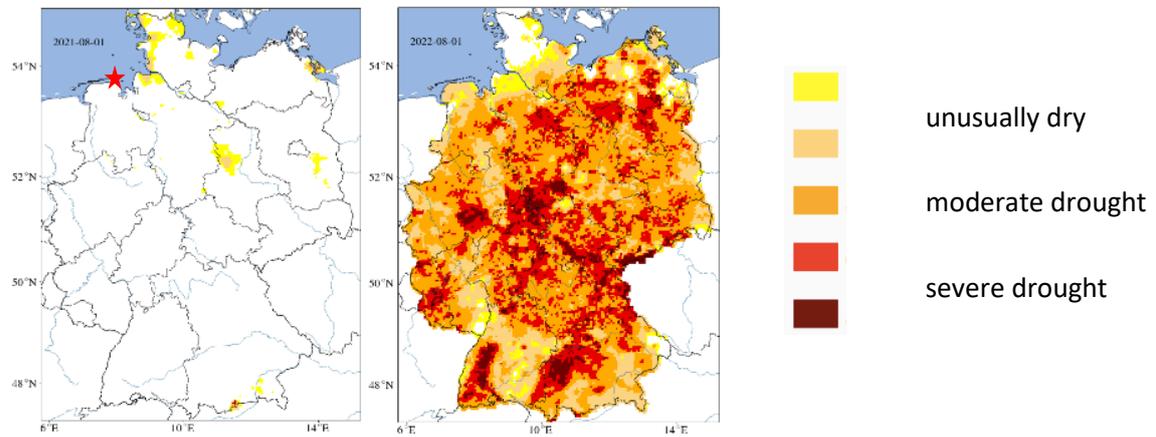




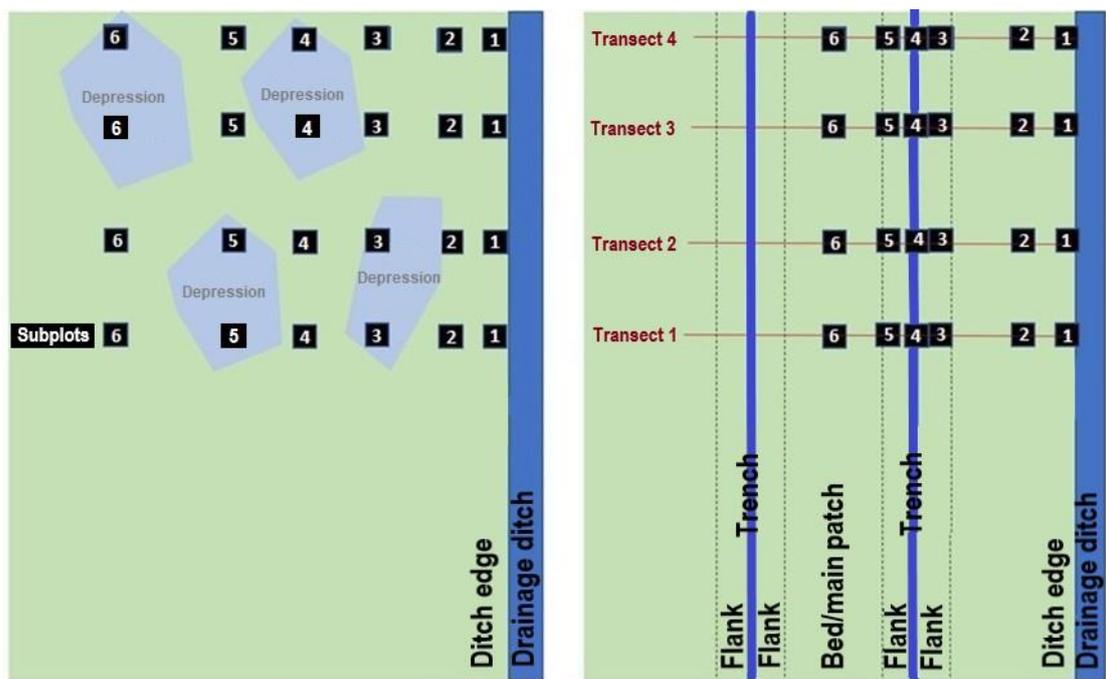
Sites ● 12\_2 ● 12\_3 ● 7\_1 ● 7\_3

**Figure 7.** Relationship between crude protein content (a, b) and crude fibre content (c, d), and biomass production at the four sites in 2021 and 2022.

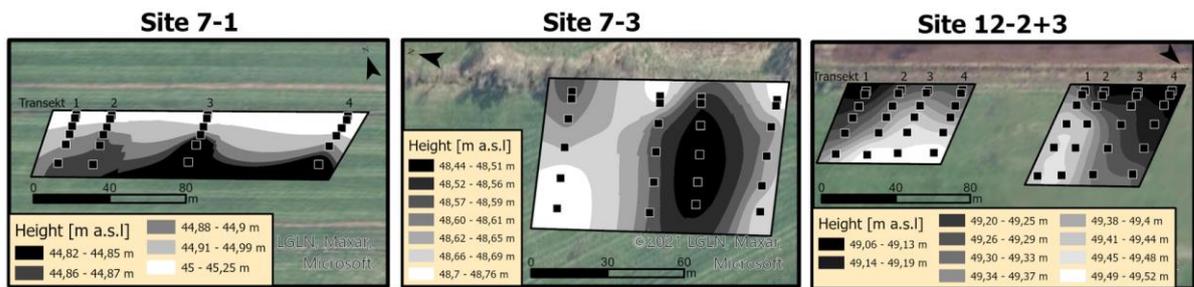
## SUPPLEMENT



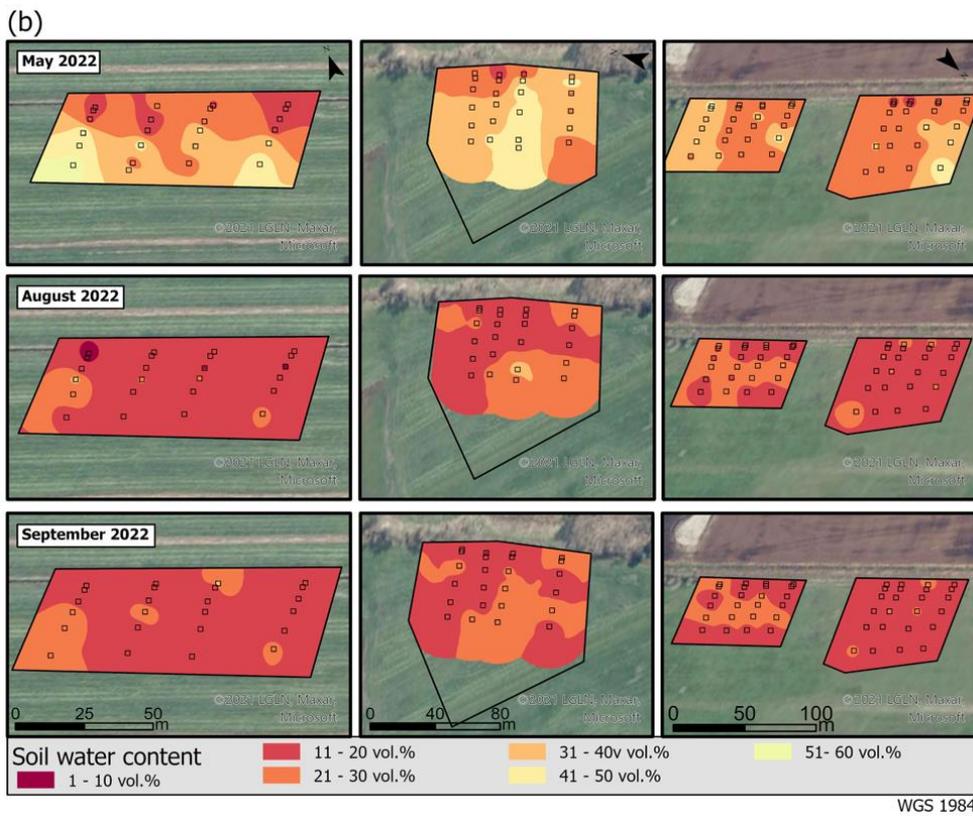
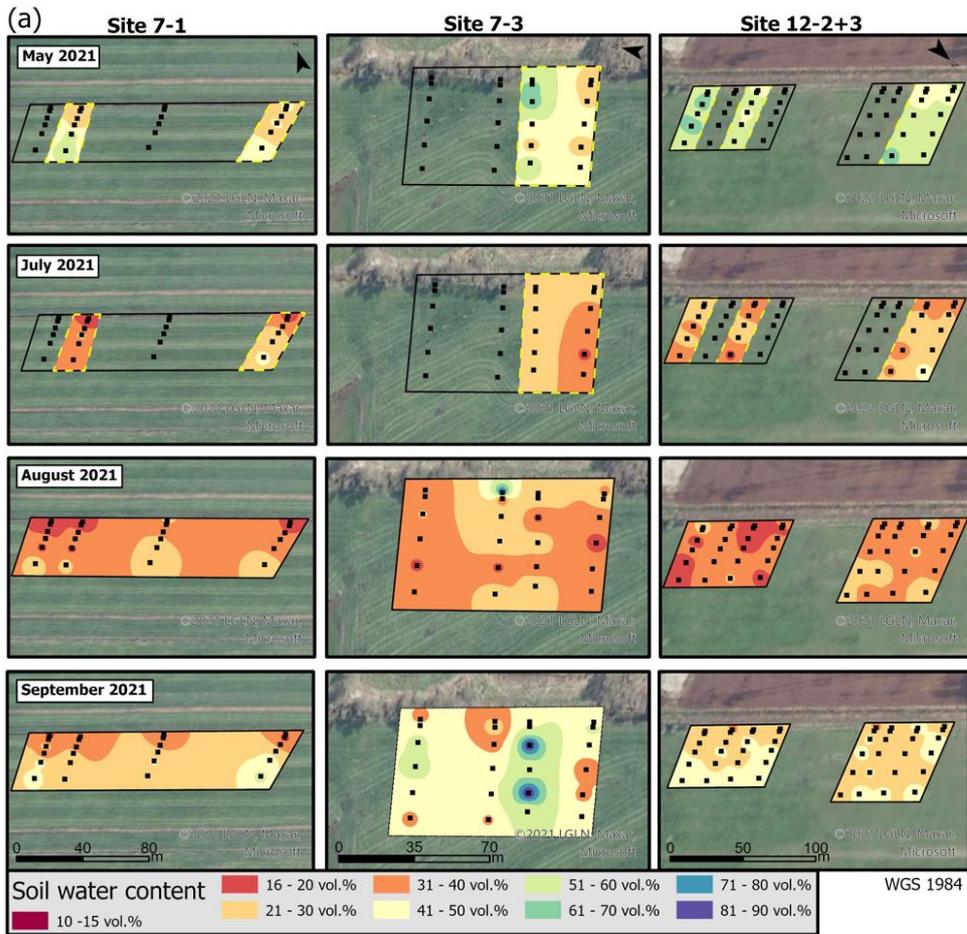
**Figure S1.** Soil drought in the topsoil (0-25 cm) in Germany in (a) August 2021 and (b) August 2022 according to the German drought monitor (Dürremonitor) of Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (2022). Red star: Location of study site.



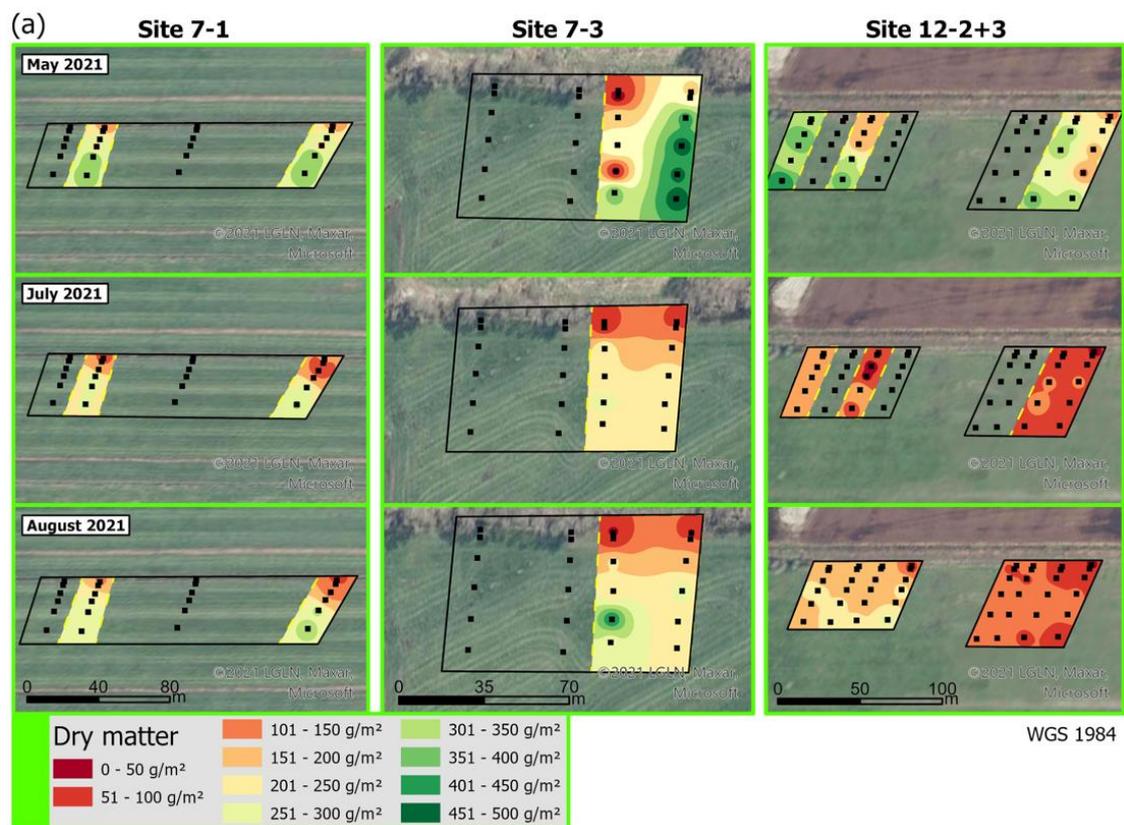
**Figure S2.** Sampling scheme in the grassland fields with typical microrelief and location of transects and subplots.



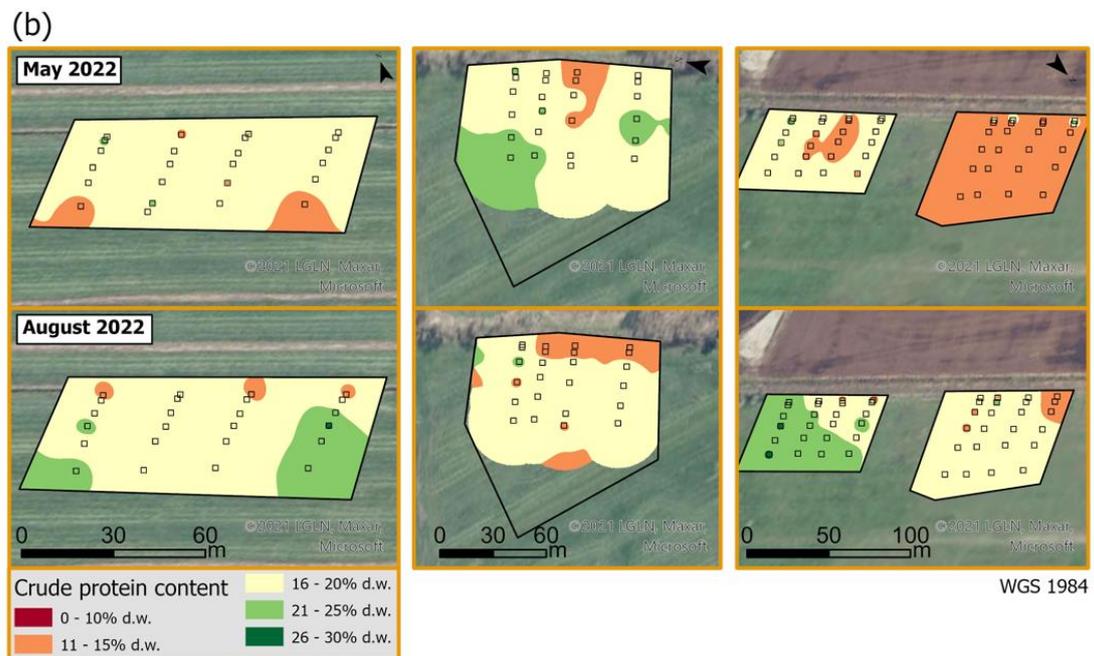
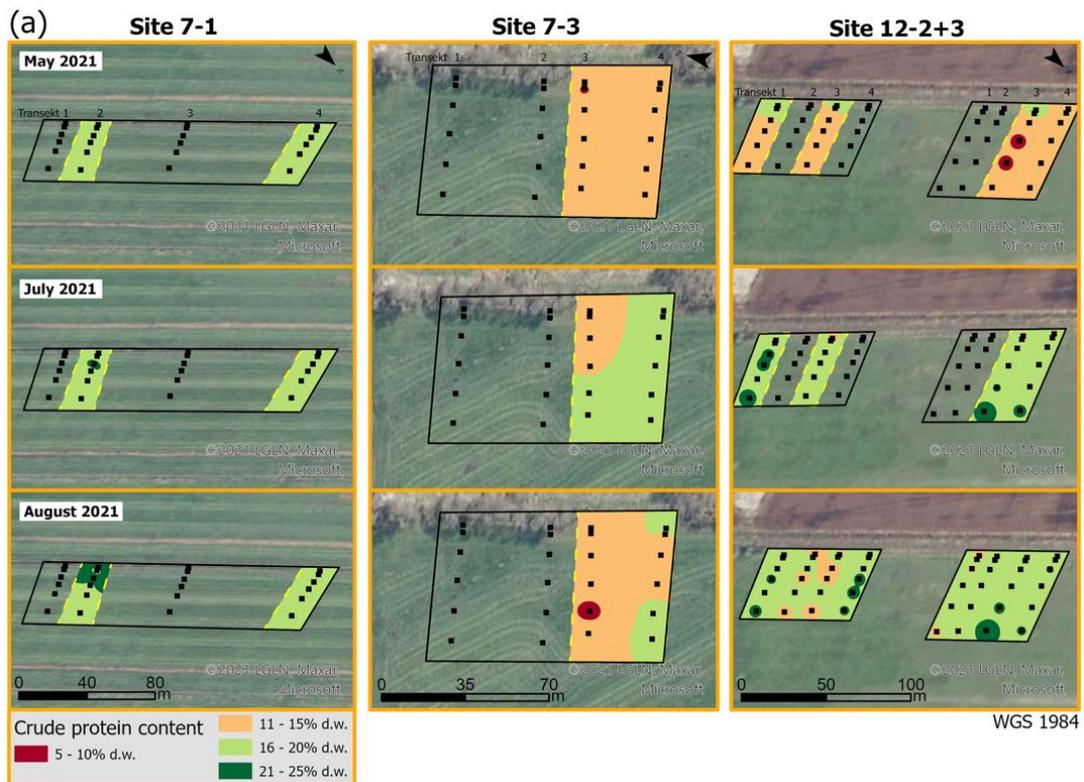
**Figure S3.** Micro-topography of the study plots at the grassland sites 7-1, 7-3 and 12-2+3. Given is the absolute height in m a.s.l.. Black squares indicate sampling sites for soil moisture and biomass. Note that the figures 1, 3, 4 and 5 give relative heights, i.e. deviation from the mean elevation of a site.



**Figure S4.** Spatial distribution of soil water content (0-10 cm) in May, July, August and September 2021 (a) and 2022 (b) in the study plots at sites 7-1, 7-3 and 12-2+3. Dots and squares indicate sampling locations.

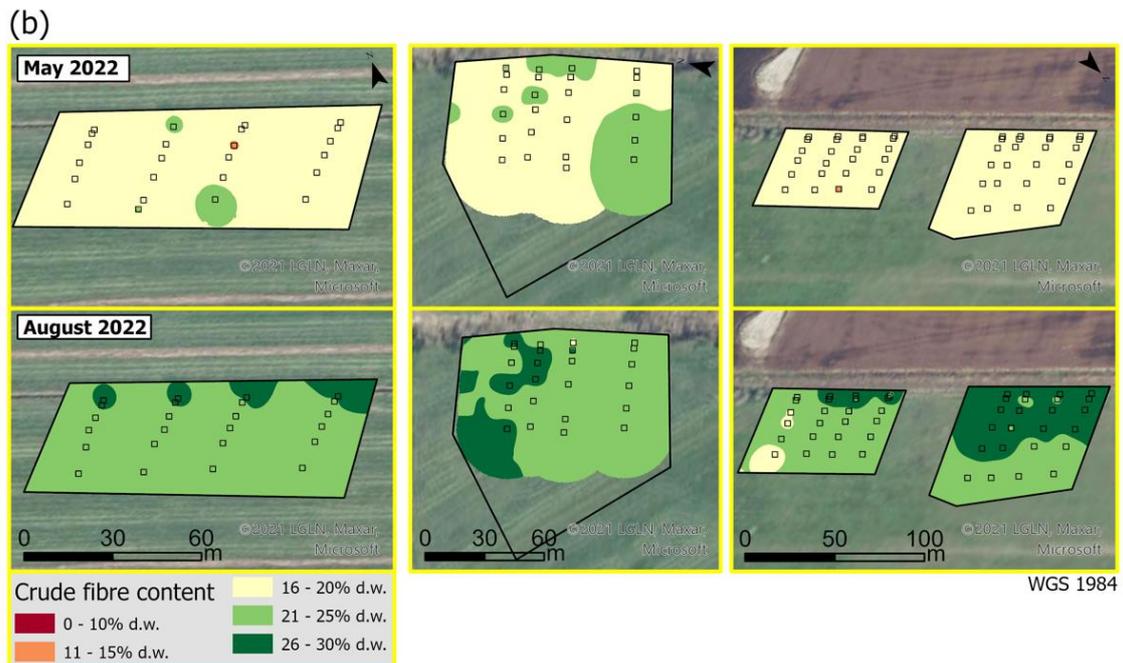
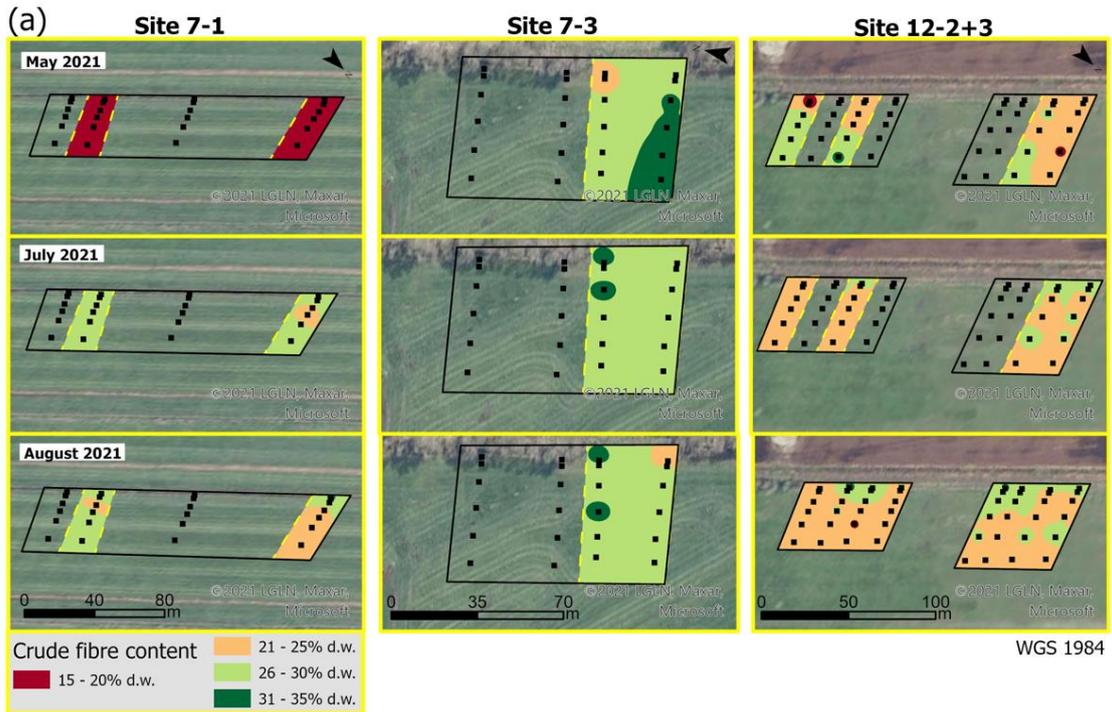






**Figure S6.** Spatial distribution of crude protein content in fresh biomass in May, July and August 2021 (a) and 2022 (b) in the study plots at sites 7-1, 7-3 and 12-2+3. Dots and squares indicate sampling locations. Note that color scale differs between years for better visualisation.





**Figure S7.** Spatial distribution of crude fibre content of biomass in May, July and August 2021 (a) and 2022 (b) in the study plots at sites 7-1, 7-3 and 12-2+3. Dots and squares indicate sampling locations. Note that the color scale differs between years for better visualisation.