

Veränderungen der Vegetationsdynamik unter zukünftigen Klimabedingungen

Andreas Schaumberger¹*, Erich M. Pötsch¹ und Medardus Schweiger¹

Einleitung

Die Entwicklung von Pflanzen hängt in hohem Maß von der Versorgung mit Energie und Wasser ab. Im Zusammenspiel mit der Bewirtschaftung hat die Witterung somit einen entscheidenden Einfluss auf das Wachstum und den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen. Temperaturen und die zeitliche Verteilung von Niederschlägen bestimmen im Wesentlichen die Entwicklungsgeschwindigkeit, also die Dauer einzelner phänologischen Phasen und in weiterer Folge die Abfolge von Nutzungszeitpunkten. Beim Wirtschaftsgrünland mit mehreren Nutzungen pro Jahr ist die Witterung innerhalb eines Aufwuchses sowohl für die Festlegung des optimalen Schnitzeitpunktes als auch für den Ertrag entscheidend. Die Anzahl der Schnitte ist wiederum vom langfristigen Standortfaktor Klima abhängig, differenziert in Gunstlagen mit ausreichenden Niederschlägen und höheren Temperaturen sowie extensiv bewirtschaftete Regionen, meist in höheren Lagen des Berggebietes.

Die Vegetationsdynamik im Grünland ist ein komplexer Prozess, bei dem Bewirtschaftungs- und Standortfaktoren wie Witterung und klimatische Bedingungen ineinandergreifen und auf die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes einwirken (Pötsch, 2009). Der Pflanzenbestand als Summe verschiedener Gräser, Kräuter und Leguminosen entwickelt sich in Abhängigkeit der Umweltbedingungen zudem nicht einheitlich. Den Entwicklungsstadien und die darauf abgestimmte Wahl der Erntezeitpunkte kommt aber hinsichtlich Qualität und Ertrag im Grünland große Bedeutung zu und klimabedingte Veränderungen erfordern deshalb auch Anpassungen im Grünlandmanagement, um ein entsprechendes Qualitäts- und Ertragsniveau auch weiterhin zu gewährleisten.

Im Versuch ClimGrass (Pötsch *et al.*, 2019) wird die Wirkung veränderter Klimabedingungen auf einen Dauergrünlandbestand wissenschaftlich untersucht und aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet. Den Schwerpunkt bildet dabei der Pflanzenbestand selbst, aber auch Boden, Hydrologie und CO₂-Kreisläufe auf unterschiedlichen Ebenen stehen im Fokus diverser Experimente und tragen ihren Teil dazu bei, das Gesamtsystem Grünland im Kontext der Klimaveränderung besser zu verstehen. In der vorliegenden Arbeit werden ausgewählte Ergebnisse der Vegetationsdynamik vorgestellt, die auf den Auswertungen einer Vielzahl unterschiedlicher Daten beruhen, die während

der letzten Jahre sowohl mit invasiven als auch mit nicht-invasiven Methoden gesammelt wurden.

Material und Methoden

Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum

Bei der Betrachtung vegetationsdynamischer Aspekte wird aus den verschiedenen Faktorkombinationen des ClimGrass-Versuches die Variante mit einer Temperaturerhöhung von 3 °C und einer CO₂-Konzentration von +300 ppm (Abkürzung C2T2) ausgewählt und mit der aktuellen Klimasituation (C0T0) verglichen. Die Witterung der einzelnen Versuchsjahre spielt dabei eine bedeutende Rolle, da die Simulationsparameter Temperatur und CO₂-Konzentration zum aktuellen Wetter beaufschlagt werden; die relative Anpassung findet dabei nahezu in Echtzeit statt. So werden beispielsweise Effekte einer Dürreperiode durch die Klimavariante C2T2 noch massiv verstärkt. Ausgewogene und sehr günstige Witterungsverhältnisse wirken sich in der Klimavariante hingegen wieder zum Vorteil des Pflanzenbestandes aus. Für die vorliegende Arbeit werden hauptsächlich die beiden Jahre 2016 und 2017 herangezogen. Das Jahr 2016 war ein außergewöhnlich ertragsreiches Jahr, in dem das Grünland in Gumpenstein optimale Bedingungen vorfand (vgl. *Abbildung 1*). Im Jahr 2017 wurde an ausgewählten Parzellen des ClimGrass-Versuches mit Hilfe von Regendächer eine künstliche Dürreperiode für den Zeitraum des 2. Aufwuchses (Juni – Juli) geschaffen (vgl. *Abbildung 2*). Auswertungen für dieses Jahr beziehen

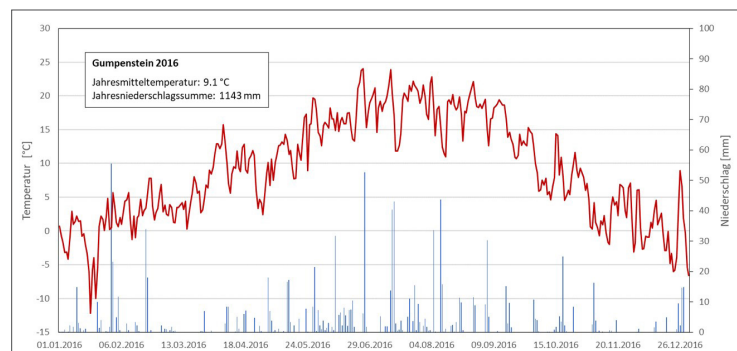


Abbildung 1: Temperaturen und Niederschläge der Wetterstation Gumpenstein im Jahr 2016.

¹ Mitarbeiter des Institutes für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Mag. Dr. Andreas SCHAUMBERGER, MSc, andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at



die Ergebnisse aus dem Dürreexperiment mit ein und sollen zeigen, wie sich eine Kombination von kontinuierlicher Klimaveränderung und Extremereignis, in diesem Fall Dürre, auf Grünland auswirken könnte.

Nicht-invasive Beobachtungen

Vegetationsperiode und Temperatursummen

Die klimatologische Vegetationsperiode, nach Chmielewski (2007) auch als thermische Vegetationsperiode bezeichnet, beruht auf Vereinfachungsgründen auf einer Auswertung von Temperaturschwellen, die sich meist auf längere Zeiträume bezieht und klimatische Entwicklungen aufzeigt. Durch unterschiedliche Definitionen und Kombinationen der Schwellenwerte wird versucht, sich den realen Bedingungen und Anforderungen für eine Mehrheit von Pflanzen bestmöglich anzunähern. Wird im Frühjahr eine bestimmte Temperatur anhaltend überschritten, beginnt das Pflanzenwachstum. In der vorliegenden Berechnung wird dies durch eine Überschreitung des Schwellenwertes von 5 °C Tagesmitteltemperatur für die Dauer von mindestens fünf Tagen abgebildet. Das Vegetationsende basiert auf einer Umkehrung des definierten Kriteriums – für fünf aufeinanderfolgende Tage wird die Tagesmitteltemperatur von 5 °C unterschritten. Die Kombination von Temperaturschwelle und einer Periode mit durchgehender Über- oder Unterschreitung dieser Schwelle zur Festsetzung von Beginn und Ende der thermischen Vegetationsperiode stellt in der Literatur einen gewissen Standard dar und wird vielfach verwendet (z. B. in Broad and Hough, 1993, Chmielewski, 2007, Frich *et al.*, 2002, Sparks *et al.*, 2005).

Neben der Berechnung aus Temperaturdaten wird auch eine phänologische Beobachtung des Vegetationsbeginns nach den Kriterien von ZAMG (2000) und Deutscher Wetterdienst (1991) durchgeführt und steht für den Standort Gumpenstein als Zeitreihe ab 1995 zur Verfügung.

Bei den Temperatúrauswertungen für die Gegenüberstellung der ClimGrass-Varianten C0T0 mit C2T2 werden nicht Lufttemperaturen wie bei der Berechnung der Vegetationsperiode herangezogen, sondern Oberflächentemperaturen von 15 Referenzparzellen (C0T0) bzw. von 8 mit Infrarotstrahlern beheizten Parzellen (C2T2). Nur diese Oberflächentemperaturen gewährleisten eine Differenzierung und bieten somit eine entsprechende Vergleichsmöglichkeit.

Die Entwicklung der Grünlandvegetation wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst, wobei der Temperatur, insbesondere der Temperatursumme, aufgrund ihres starken Zusammenhangs mit der Abfolge phänologischer Phasen eine Schlüsselrolle zukommt (Menzel, 2007). In der vorliegenden Arbeit wird ein Temperatursummenmodell für tägliche Oberflächentemperaturen gerechnet, indem vom 1. März eines jeden Jahres alle Temperaturen mit mindestens 4 °C aufsummiert werden. Die den einzelnen Aufwüchsen zugeordneten Temperatursummen werden vom der Ernte folgenden Tag bis zur drauffolgenden Ernte summiert.

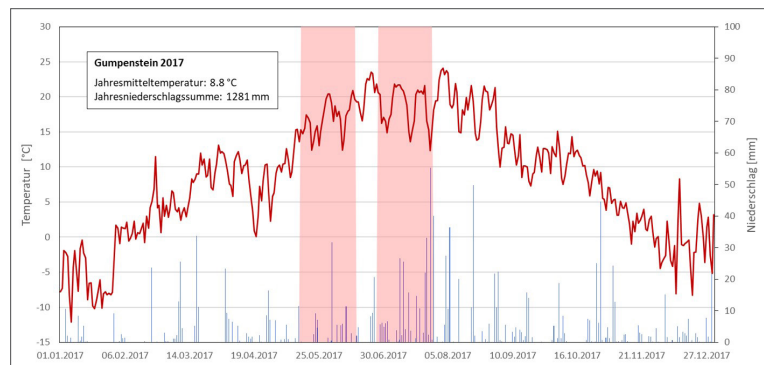


Abbildung 2: Temperaturen und Niederschläge der Wetterstation Gumpenstein im Jahr 2017 mit einer künstlich geschaffenen Dürreperiode durch Abhaltung von Niederschlägen mit Hilfe von Regendächer (rot hinterlegt).

Vegetationsbeobachtungen

Sämtliche Versuchspartellen in ClimGrass werden in einem Abstand von 7 – 10 Tagen nach den phänologischen Makrostadien der Arten Knäulgras (*Dactylis glomerata*) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*) gemäß BBCH-System (Meier *et al.*, 2009) bonitiert. Die beiden Gräserarten werden ausschließlich innerhalb des Parzellenernterings auf einer Fläche von 1 m² Fläche beobachtet, wobei der relative Anteil der höchsten Entwicklungsstufe festgehalten wird. Beispiel: Wenn 70 % des Knäulgrases die Entwicklungsstufe 3 erreicht, wird der Wert 3-070 dokumentiert. Für die verbleibenden 30 % wird angenommen, dass sie sich in der nächstniedrigen Entwicklungsstufe befinden. Da es sich bei dem Beispielwert von 3-070 um eine qualitative (Stadium 3) und quantitative (70 %) Mischinformation handelt, wird der Wert 3070 in einen Index umgerechnet, indem der jeweilige Prozentwert mit der dazugehörigen Entwicklungsstufe gewichtet und anschließend zu einem Mittelwert zusammengeführt wird. Der so errechnete Mittelwert wird zum vorhergehenden Ergebnis aufgeschlagen und ist als Dezimalwert Teil einer kontinuierlichen Indexreihe. Die Umformung in eine metrische Skala erlaubt die Bildung von Variantenmittelwerten, welche die Voraussetzung für den Vergleich zwischen den Varianten ist.

Vor jeder Ernte werden für die jeweiligen Flächen der Ernterlinge die Ertragsanteile für die Artengruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen nach Klapp (1930) geschätzt. Bei dieser Schätzung handelt es sich um eine Massenprozent-schätzung bezogen auf den TM-Ertrag, deren Gesamtergebnis immer 100 % ergibt; etwaige Lücken und offene Stellen werden gesondert in % der Aufnahme-fläche angegeben (Opitz von Boberfeld, 1994).

Wuchshöhen

Auf ausgewählten Parzellen des ClimGrass-Versuches werden wiederum im Bereich des Ernterings in etwa wöchentlichem Abstand Wuchshöhenmessungen mit Hilfe von Ultraschall-Sensoren vorgenommen (Biewer *et al.*, 2009). Aufgrund der zeitlich dichten Messreihe lässt sich aus dieser Datenreihe der Verlauf der Bestandesentwicklung sehr gut ablesen und zwischen den Varianten vergleichen. Diese Sensoren erlauben eine effiziente Messung mit einer 4- bis 8-fachen Wiederholung, bei der die Daten sofort in ein

Datenbanksystem einfließen können. Die Methode beruht auf einer Distanzmessung zwischen Sensor, der in einer konstanten und dem System bekannten Höhe über einem Bestand positioniert wird, und den höchsten Pflanzenteilen eines Bestandes. Aus der Differenzbildung zwischen bekannter Höhe über Grund und der gemessenen Distanz ergibt sich die Bestandeshöhe (vgl. Fricke *et al.*, 2011), bei der Ausreißerwerte anhand einer statistischen Auswertung der Streuung innerhalb der Messwiederholungen korrigiert werden können. Bei dem eingesetzten System handelt es sich um Sensoren der Firma Pepperl & Fuchs, Modell UC2000-30GM-IUR2-V15, ein handelsübliches Einkopfsystem mit einer Schallfrequenz von 65 – 195 ms und einem Öffnungswinkel von 24°. Mit Hilfe einer eigens programmierten Softwareschnittstelle lassen sich die Sensoren in Serie schalten, sodass bei einem Messdurchgang mehrere Ultraschallköpfe gleichzeitig zum Einsatz kommen.

Die im Verlauf eines Aufwuchses mehrfach durchgeführten Ultraschall-Höhenmessungen werden um Höhenmessungen mit Zollstock und Rising Plate Meter (Sanderson *et al.*, 2001) unmittelbar vor der Ernte ergänzt. Diese Momentaufnahmen der Wuchshöhe zum Erntezeitpunkt dienen in erster Linie der Modellierung und dem systematischen Vergleich unterschiedlicher Messmethoden und werden deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Feldspektroskopie und Blattflächenindex

Gleichzeitig mit den Wuchshöhen werden auf ausgewählten ClimGrass-Parzellen dichte Zeitreihen von Spektralmessungen mit einem Feldspektrometer (HandySpec Field VIS/NIR 1.7 der Firma tec5) vorgenommen. Der Sensor des HandySpec hat einen Öffnungswinkel (Field-of-View) von 25° und wird in einer Höhe von 120 cm über der Mitte des Ernterings positioniert. In vierfacher Wiederholung werden Spektralsignaturen im Wellenlängenbereich von 400 bis 1.700 nm erfasst, nach Bedarf und dem Auftreten eines meist temperaturbedingten Sensor-Shifts (Aasen *et al.*, 2014, Dorigo, 2008, Dorigo *et al.*, 2006, MacArthur *et al.*, 2012, Milton *et al.*, 2009) korrigiert und nach Savitzky und Golay (1964) geglättet (King *et al.*, 1999, Ruffin und King, 1999). Eine detaillierte Darstellung der Messmethode findet sich in Schaumberger *et al.* (2015).

Die im Feld erhobenen Hyperspektralsignaturen werden mit Hilfe von Spectral Response Functions (ESA, 2018) in multispektrale Bänder transformiert, die jenen Kanälen entsprechen, welche auch mit Copernicus Sentinel-2 zur Verfügung stehen. Das Ziel dabei ist, auf Versuchspartellen erhobene Daten künftig mit Hilfe der Satelliten-Fernerkundung in einen regionalen Kontext zu stellen. Auf diese Weise können mit Versuchsdaten kalibrierte und validierte Modelle auf ganze Regionen übertragen und angewendet werden.

Ein wichtiger Kennwert für zahlreiche biologische und physikalische Prozesse ist der Blattflächenindex, der besonders dafür geeignet ist, die Veränderungen des Pflanzenbestandes zu beschreiben (Atzberger *et al.*, 2015, Darvishzadeh *et al.*, 2011, Wenng, 2017, Zheng and Moskal, 2009). Auf der Grundlage der zu

Sentinel-2-Kanälen transformierten Feldspektrometerdaten wird mit Hilfe eines neuronalen Netzes nach Baret *et al.* (2010) der Blattflächenindex berechnet. Das verwendete Neuronale Netz wurde speziell an Sentinel-2 angepasst und mit Werten aus den physikalischen Strahlungstransfermodellen PROSPECT und SAIL (Jacquemoud *et al.*, 2009, Verhoef, 1984) trainiert. Aus den so generierten Blattflächenindizes werden für die Varianten COT0 und C2T2 Mittelwerte generiert und miteinander verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Veränderungen der Vegetationsperiode

Für die Grünlandwirtschaft im topografisch komplexen Berggebiet Österreichs ist die Dauer der Vegetationsperiode ein maßgeblicher Faktor der Ertragsfähigkeit und macht eine regional angepasste Wirtschaftsweise notwendig. Ein Anstieg der Seehöhe bei abnehmender Temperatur verkürzt nicht nur die gesamte Dauer der vegetativen Phase, es verschlechtern sich auch die Wachstumsbedingungen, sodass die Anzahl an Schnitten zwangsläufig abnehmen muss und schließlich mehr und mehr in eine Weidehaltung übergeht. Die höheren Temperaturen eines zukünftigen Klimas werden zu einer Ausdehnung der Vegetationsperiode in allen Höhenlagen und damit auch zu einer räumlichen Verschiebung von Bewirtschaftungsweisen und -intensitäten führen.

Abbildung 3 zeigt eine Auswertung von langjährigen Temperatur- und Beobachtungsdaten am Standort Gumpenstein. Der Beginn der thermischen Vegetationsperiode weist im Verlauf des über 50-jährigen Beobachtungszeitraums einen negativen Trend auf, d.h. einen stetig früheren Beginn der Vegetation. Insgesamt sind das immerhin mehr als 8 Tage. Seit 1995 steht auch eine durchgehende Reihe der phänologischen Beobachtung „Ergrünen der Wiese“ zur Verfügung und wird in *Abbildung 3* zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen dargestellt. Abgesehen davon, dass die Rechenmethode den Beginn etwas früher als die Beobachtung setzt, ist der langfristige Trend vergleichbar.

Mit der Kombination von Vegetationsbeginn und der rechnerischen Ermittlung des Vegetationsendes über den Beobachtungszeitraum ergibt sich im Vergleich zu den 1960er Jahren

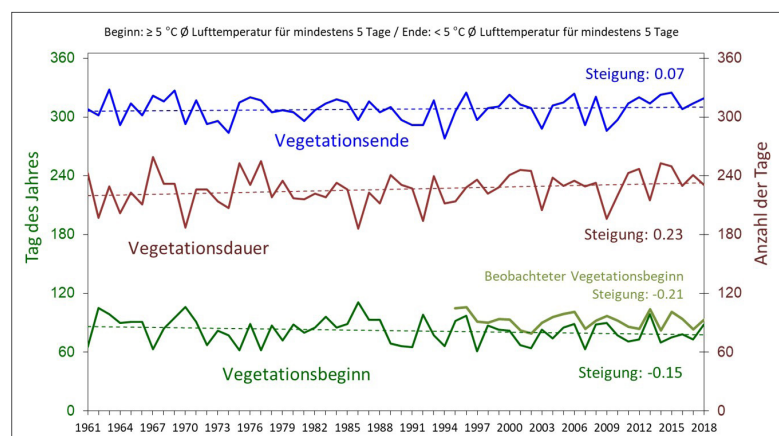


Abbildung 3: Thermische Vegetationsperiode von 1961 bis 2018 am Standort Gumpenstein.

eine Ausdehnung der Vegetationsperiode von 13,1 Tagen. Dies entspricht in etwa der Auswertung, die an ausgewählten österreichischen Stationen für das Projekt „Klimaszenarien für Österreich“ (ÖKS15, 2016) durchgeführt wurde und eine mittlere Zunahme um 13,5 Tage ergab. Sowohl für die Dauer als auch für den Beginn der Vegetationsperiode gibt es große regionale Unterschiede, so kam es beispielsweise in Wien zu einer Verschiebung von 20 Tagen nach vorne und im nördlichen Waldviertel um 5 Tage (ÖKS15, 2016). Das inneralpine Gebiet befindet sich im Mittelfeld und wird, wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, durch die Station in Gumpenstein sehr gut repräsentiert. Zudem handelt es sich um typisches Grünlandgebiet und ist auch für diese im Bergland wichtigste Form der Landwirtschaft repräsentativ.

In naher Zukunft wird sich die Vegetationsperiode im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 nach neuesten Klimaszenarien um durchschnittlich 20 Tage weiter ausdehnen. Betrachtet man die fernere Zukunft (bis 2100) fällt diese Verlängerung noch deutlich dramatischer aus. Werden keine geeigneten Klimaschutzmaßnahmen gesetzt und die Emission von Treibhausgasen nicht gebremst, wird diese Ausdehnung 61,1 Tage (RCP8.5) betragen und der Vegetationsbeginn um durchschnittlich 36,3 Tage früher stattfinden. Greifen allerdings die Bemühungen, künftige Emissionen deutlich einzuschränken (RCP4.5), wird die Vegetationsperiode im österreichischen Durchschnitt immerhin noch um 32,7 Tage länger werden. Auch bei einem optimistischen Ausblick und im besten Fall, wie es die Szenarien des Treibhausgaskonzentrationspfades RCP4.5 zeigen, wird die Auswirkung der Klimaveränderung auf die Vegetationsperiode zu signifikanten Änderungen in der Landwirtschaft führen. Dies betrifft sowohl die Art der Landnutzung als auch die Bewirtschaftungsformen und traditionellen Abläufe.

Mit dem ClimGrass-Versuch und der Möglichkeit, ein um 3 °C wärmeres Klima zu simulieren, können die konkreten Auswirkungen der durch die Vegetationsperiode bedingten Entwicklungsdynamischen Veränderungen am Grünlandbestand untersucht werden. Ausgewählte Ergebnisse dazu werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Entwicklungsdynamiken von Grünlandbeständen

Temperaturen und Aufwuchsperioden

Die unterschiedlichen Varianten des ClimGrass-Versuches weisen eine einheitliche Bewirtschaftung auf, um den Fokus

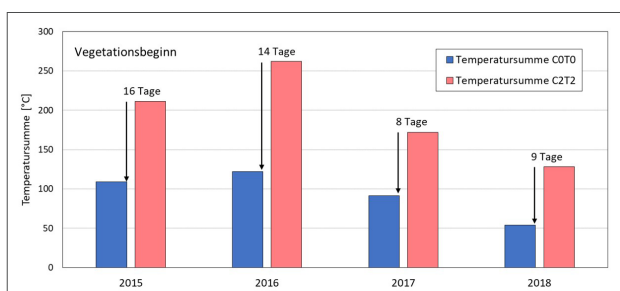


Abbildung 4: Temperatursummen der Varianten C0T0 und C2T2 zum beobachteten Vegetationsbeginn.

vollständig auf den Klimaeffekt zu richten. Neben gleicher Düngung werden unabhängig von Beheizung und Begasung auch alle Parzellen dreimal pro Jahr gleichzeitig geerntet. Dies berücksichtigt zwar nicht die unterschiedlich schnelle Entwicklung von Beständen unbehandelter Parzellen im Vergleich zur Klimavariante, ermöglicht aber die Untersuchung aller Einflüsse während einer gleichgeschalteten Aufwuchsperiode. Entwicklungsdynamiken sind in hohem Maß von Temperatursummen abhängig bzw. bieten sie einen großen Beitrag zur Erklärung phänologischer Phaseintritte (Lauscher, 1960). Um den Klimaeinfluss zu quantifizieren, werden Temperatursummen für beide Varianten (C0T0 und C2T2) zu Vegetationsbeginn und zu den einzelnen Erntezeitpunkten gebildet und miteinander verglichen.

Eine Gegenüberstellung der Temperatursummen zum Zeitpunkt des beobachteten Vegetationsbeginns für die Jahre 2015 bis 2018 in *Abbildung 4* zeigt, dass die für den Start der Vegetation erforderliche Temperatursumme bei der Variante C2T2 im Durchschnitt bereits 11,8 Tage früher erreicht wird. Die Taganzahl in den dargestellten Jahren ist unterschiedlich und hängt vom Temperaturverlauf im jeweiligen Jahr ab, wo sich C0T0 und C2T2 abgesehen von der 3-Grad-Verschiebung kaum unterscheiden. Zusätzlich ist für die Berücksichtigung eines Temperaturwertes für die Summenbildung ein Mindestwert von 4 °C relevant. Ein warmer Frühling mit rasch ansteigenden Temperaturen wie in den Jahren 2015 und 2016 führt bei dieser Auswertung zu einem höheren Tagesabstand, kältere Frühjahre zu kürzeren Abständen.

Die in *Abbildung 4* gezeigten Differenzen können aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen Temperatur und dem Eintritt phänologischer Phasen als Richtwert für das Maß eines früheren Vegetationsbeginns herangezogen werden. Weitere phänologische Phasen zu Beginn der vegetativen Entwicklung hängen unmittelbar vom Startzeitpunkt der Vegetation ab. Eine sehr markante und relativ frühe Entwicklungsstufe im Grünland ist die Löwenzahnblüte (*Taraxacum officinale*), die im Rahmen von botanischen Erhebungen jedes Jahr beobachtet wird und zur Evaluierung der zeitlichen Phasenunterschiede zwischen C0T0 und C2T2 herangezogen werden kann. Die mittlere Differenz zwischen den beiden Varianten beträgt 10,8 Tage und entspricht in etwa jenem mittleren Abstand, der sich auch aus dem Temperatursummenvergleich zu Vegetationsbeginn ergibt. Höhere Temperaturen wirken sich auch auf das Erreichen der für den optimalen Schnitzeitpunkt maßgeblichen phänologischen Phase des Ähren- und Rispschiebens aus. In *Abbildung 5* ist ein Vergleich der Temperatursummen für

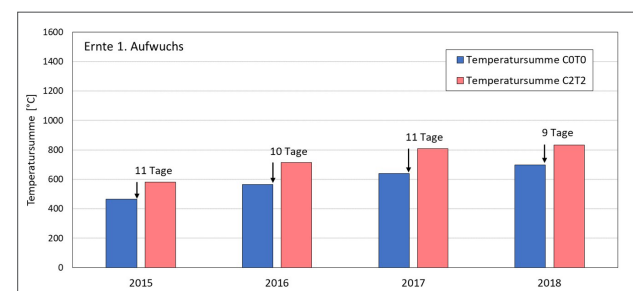


Abbildung 5: Temperatursummen der Varianten C0T0 und C2T2 zum Zeitpunkt des ersten Schnittes.

den ersten Aufwuchs dargestellt, wobei die Summe ab Vegetationsbeginn gebildet wird. Wie bereits bei *Abbildung 4* gezeigt, werden auch hier die Tage entlang des Temperaturverlaufs im jeweiligen Jahr ermittelt. Mit einer mittleren Differenz von 10,3 Tagen ist hier ein sehr deutliches und über die unterschiedlichen Jahre stabiles Signal zu sehen. Es zeigt, dass unter künftigen Klimabedingungen sich nicht nur der Vegetationsbeginn ändert, sondern auch der Erntetermin des für den Jahresertrag maßgeblichen ersten Aufwuchses signifikant früher anzusetzen sein wird.

Für die Folgeaufwüchse ergibt sich ein ähnliches Bild. Der zweite Aufwuchs erreicht in der Variante C2T2 die Temperatursumme von C0T0 8,8 Tage früher, beim dritten Aufwuchs sind es 15,5 Tage. Auch hier wird nach jedem Schnitt mit der Summenbildung bis zum Folgeschnitt neu gestartet. Die zeitlichen Differenzen resultieren daher nicht aus einem kumulativen Effekt vom Beginn der Vegetationsperiode an, sondern sind immer aufwuchsbezogen zu betrachten. Ein früher Vegetationsbeginn und vergleichsweise hohe Temperaturen während der ganzen Saison ermöglicht aufgrund der rascheren phänologischen Entwicklung eine Erhöhung der Schnittfrequenz.

Entwicklungsgeschwindigkeit

Da Temperatursummen lediglich als Prädiktoren für Entwicklungsphasen gelten, sind Beobachtungen der Pflanzenbestände für einen direkten Vergleich unterschiedlicher Entwicklungsstadien unerlässlich. Die Makrostadien gemäß BBCH-Skala nach Meier *et al.* (2009) von Knaulgras (*Dactylis glomerata*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Varianten C0T0 und C2T2. In *Abbildung 6* ist der Verlauf für die drei Aufwüchse im Jahr 2016 mit den dazugehörigen akkumulierten Temperaturen dargestellt. Bei der Prüfung auf statistische Signifikanz mit der Methode Mixed Model (SAS Proc Mixed) wurden alle Beobachtungsjahre (2015 bis 2018) einbezogen.

Während sich zu Beginn eines jeden Aufwuchses die Varianten kaum unterscheiden, zeigt sich bei Knaulgras gegen Ende der Aufwuchsperiode ein deutlicher Entwicklungsvorsprung in der Klimasimulationsvariante. Im Gegensatz dazu ist bei der zweiten beobachteten Pflanzenart Goldhafer (*Trisetum flavescens*) keine signifikante Unterscheidung zwischen den Behandlungsvarianten möglich (*Abbildung 7*). Dieses Beispiel zeigt, dass bei einem Grünlandmischbestand immer von einer sehr heterogenen Entwicklung aller enthaltenen Arten ausgegangen werden muss und es unmöglich ist, eine bestimmte Entwicklungsphase für den gesamten Pflanzenbestand festzumachen. Manche Arten entwickeln sich stärker im ersten Aufwuchs, andere eher in den Folgeaufwüchsen. Beim Goldhafer in *Abbildung 7* zeigen sich in den Folgeaufwüchsen beispielsweise steilere Kurven als im ersten Aufwuchs oder bei einem Vergleich mit Knaulgras. In der Praxis behilft man sich damit, dass die Phänologie der wichtigsten, bestandesbildenden Gräser beobachtet werden, um Managemententscheidungen zu treffen.

Entwicklung der Artenzusammensetzung

Vor jeder Ernte wird auf allen Parzellen das Artengruppenverhältnis innerhalb des Ernteringes bestimmt. Die Auswertung für die Varianten C0T0 und C2T2 zeigt bei

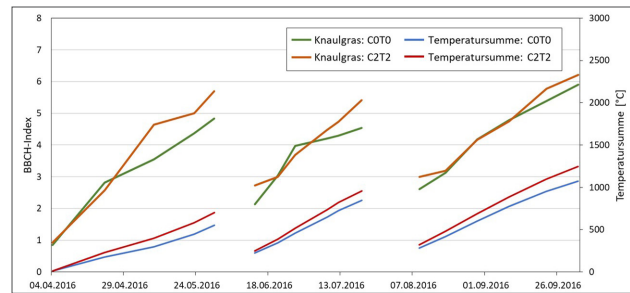


Abbildung 6: Entwicklungstadien von Knaulgras für das Jahr 2016 auf der Grundlage von BBCH-Makrostadien.

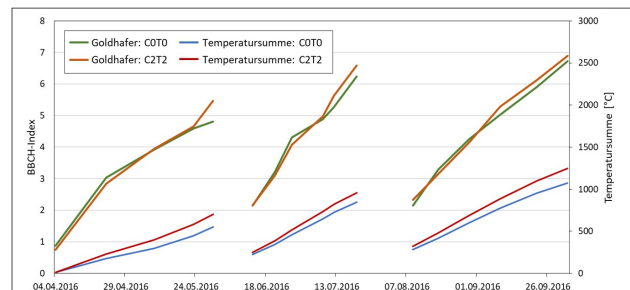


Abbildung 7: Entwicklungstadien von Goldhafer für das Jahr 2016 auf der Grundlage von BBCH-Makrostadien.

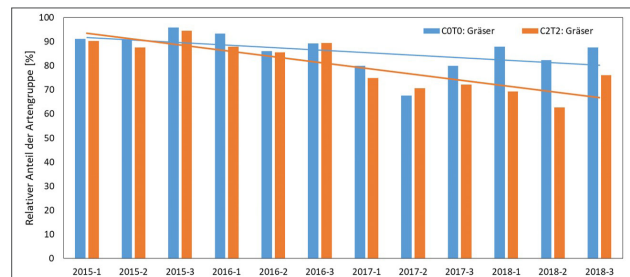


Abbildung 8: Entwicklung der Gräser im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

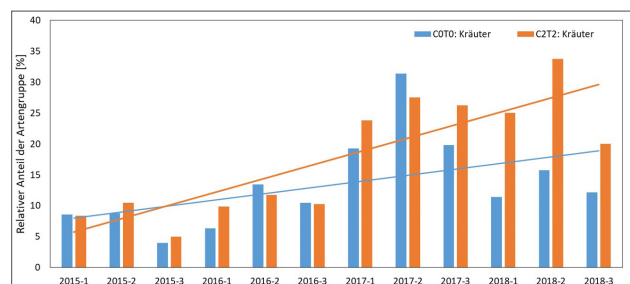


Abbildung 9: Entwicklung der Kräuter im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

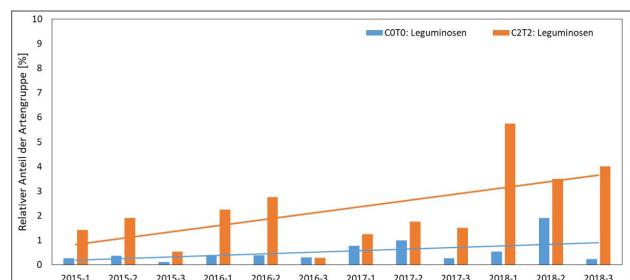


Abbildung 10: Entwicklung der Leguminosen im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

jeder Artengruppe einen deutlichen Einfluss der Klimasimulation. Die Gräser, dargestellt in *Abbildung 8*, nehmen zwar im Verlauf der vier Versuchsjahre in beiden Varianten ab, bei C2T2 sind es mit einer Reduktion von -29,1 % aber deutlich mehr als in C0T0 (-12,6 %). In gleichem Ausmaß profitieren Kräuter und Leguminosen. Bei den Kräutern beträgt die Steigerung ihres Anteils auf den Parzellen der Klimasimulationsvariante C2T2 +26,0 %, bei der unbehandelten Variante C0T0 sind es +11,9 % (*Abbildung 9*). Bei den Leguminosen, deren Anteil grundsätzlich niedrig ist, beträgt die Zunahme bei C2T2 +3,1 % und bleibt bei C0T0 mit +0,7 % auf einem niedrigem Niveau (*Abbildung 10*).

Wuchshöhen und Blattflächenindex

Sowohl die Bestandeshöhe als auch der Blattflächenindex werden unter anderem zur Schätzung der Biomasse bzw. des Ertrages herangezogen (Fang *et al.*, 2012, Fricke *et al.*, 2011, Punalekar *et al.*, 2018, Reddersen *et al.*, 2014). Beide Parameter beschreiben somit wichtige und ertragsrelevante Eigenschaften des Grünlandbestandes und zeigen im Vergleich zwischen ambienter und beheizter/begaster Variante, wie stark und auf welche Weise ein sich veränderndes Klima auf diese Bestandeseigenschaften wirkt.

Die Wuchshöhe in den Parzellen der ambienten Variante (C0T0) ist bis auf wenige Ausnahmen deutlich höher als in den Parzellen der Variante C2T2 und hat sowohl im ertragreichen Jahr 2016 (*Abbildung 11*) als auch im eher durchschnittlichen Jahr 2017 (*Abbildung 12*) das etwa gleiche Erscheinungsbild. Der höhere Pflanzenbestand in C0T0-Parzellen ist in der Regel von Beginn des Aufwuchses bis hin zur Ernte mit leicht unterschiedlichen Differenzen gegeben. Offenbar hängt die Ausbildung und Höhe der strukturellen Pflanzenteile von Umwelteinflüssen ab, die unter anderem durch die Klimasimulation verändert werden.

Im Jahr 2017 wurde aufgrund der Durchführung des Dürreexperimentes die Beobachtungsreihe auch auf jene Parzellen ausgedehnt, die unter den Regendächern liegen. Während *Abbildung 12* nur die Mittelwerte der C0T0- und C2T2-Parzellen enthält, die nicht vom Dürreexperiment betroffen waren, wurden für die Auswertung in *Abbildung 13* ausschließlich jene Daten verwendet, die auf den vier C0T0- und den vier C2T2-Parzellen erhoben wurden. Der Vergleich beider Datensätze zeigt, dass die Wuchshöhen beider Varianten während der Dürre im zweiten Aufwuchs (Juni bis Juli) stark abfallen.

Trockenstress vermindert die Ausprägung eines hohen Bestandes deutlich stärker, jedoch mit vergleichbaren Differenzen zwischen den beiden Varianten wie bei den C0T0- und C2T2-Parzellen ohne Stress. Die Daten zeigen, dass eine kontinuierliche Klimaveränderung zwar dazu beiträgt, dass Bestände über alle Aufwüchse hinweg niedriger wachsen, bei einer Kombination von Klimaveränderung und Dürreextrem das Niveau der Wuchshöhe allerdings insgesamt sinkt.

Beim Vergleich des darauffolgenden Aufwuchses fällt auf, dass die Parzellen, die vorher einem Trockenstress ausgesetzt waren, sich in beiden Varianten unterschiedlich verhalten. Während die Trockenstress-Variante C2T2 im dritten Aufwuchs nur geringfügig höhere Wuchshöhen (vgl. *Abbildung 13*) aufweist, als die nicht gestressten Parzellen

(vgl. *Abbildung 12*), ist bei den ambienten Parzellen ein deutlicher Unterschied gegeben. Die Wuchshöhen der im zweiten Aufwuchs gestressten ambienten Parzellen sind im Verlauf des gesamten dritten Aufwuchses deutlich höher. Der kompensatorische Effekt auf die Wuchshöhe wirkt demnach in Abhängigkeit der Intensität einer Dürre, nach einem Stress unter gegenwärtigem Klima (C0T0) erholt sich der Bestand offensichtlich schneller und besser als bei verändertem Klima und damit intensiverer Dürre (C2T2).

Der Blattflächenindex zeigt ein der Wuchshöhe gegenläufiges Ergebnis. Bei fast allen Spektralmessungen ergibt sich für die Variante C2T2 ein höherer Indexwert als für die Variante C0T0. In *Abbildung 14* wird wieder das Jahr 2016 dargestellt, in *Abbildung 15* das Jahr 2017, diesmal allerdings als gemischter Datensatz. Für den ersten Aufwuchs werden alle C0T0- und C2T2-Parzellen in die Mittelwertbildung einbezogen und ab dem zweiten Aufwuchs

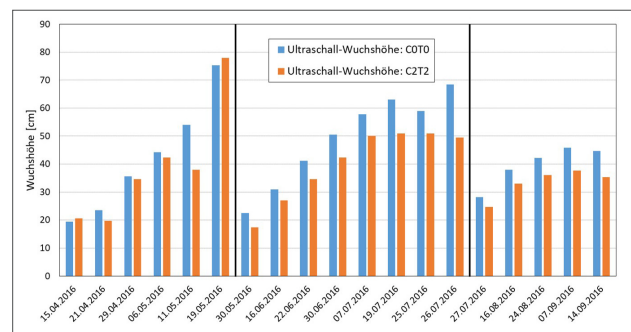


Abbildung 11: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) für die drei Aufwüchse im Jahr 2016.

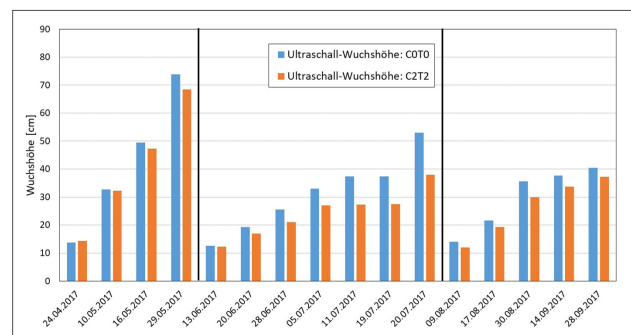


Abbildung 12: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) für die drei Aufwüchse im Jahr 2017.

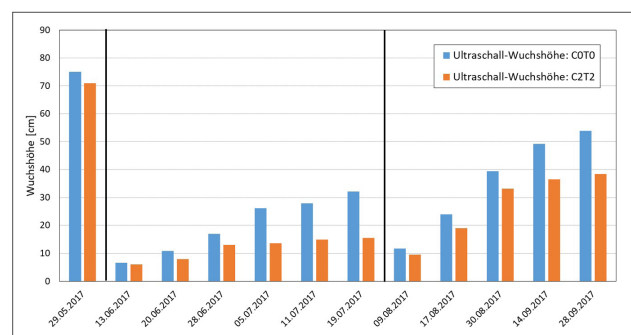


Abbildung 13: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) auf den Parzellen des Dürreexperimentes im Jahr 2017.

nur jene C0T0- und C2T2-Parzellen, die sich unter den Regendächern befinden und während des zweiten Aufwuchses einem Trockenstress ausgesetzt wurden. Während der Trockenstressphase zeigt sich im Vergleich zu den beiden anderen Aufwüchsen eine Umkehrung des Verhältnisses von C0T0 zu C2T2, was darauf schließen lässt, dass die Blattfläche besonders stark auf das Extremereignis Dürre reagiert.

Die gemeinsame Betrachtung von Wuchshöhen und Blattflächenindex führt zur Erkenntnis, dass eine Zunahme der Temperatur und CO₂-Konzentration zu „gedrungeren“ Grünlandbeständen führt, die zwar etwas niedriger, dafür aber blattreicher sind. Dieses Ergebnis bestätigt die visuelle Beobachtung der ClimGrass-Parzellen, bei der genau dieser Unterschied zwischen den Parzellen der einzelnen Varianten festzustellen ist.

Erträge im Kontext der Vegetationsentwicklung

Das Ergebnis jeder Bestandesentwicklung ist der Ertrag, der mit einer destruktiven Probenahme den Entwicklungszyklus abrupt beendet. Der Biomassertrag sowie die Quantifizierung der Inhalts- und Nährstoffe als Qualitätsparameter bildet die Summe aller Effekte ab, die auf den Pflanzenbestand während einer Aufwuchsperiode einwirken.

In Berücksichtigung der Auswertungen zur Wuchshöhe, zum Blattflächenindex und zum Artgruppenverhältnis zeigt sich, dass der Klimaeffekt nicht isoliert an einzelnen Parametern festgemacht werden kann, sondern das Ergebnis von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Eigenschaften eines Pflanzenbestandes und deren Einflussfaktoren ist. Es kann allerdings ohne weiter-

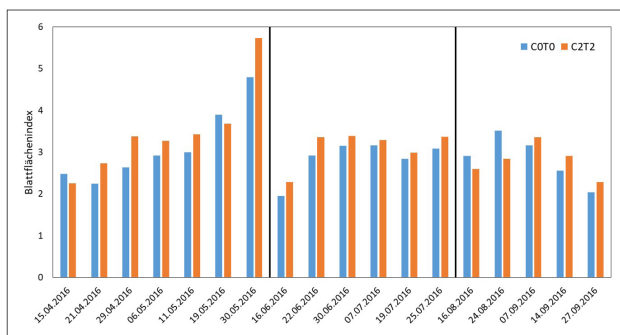


Abbildung 14: Verlauf des Blattflächenindex (Feldspektrometernmessungen) im Jahr 2016.

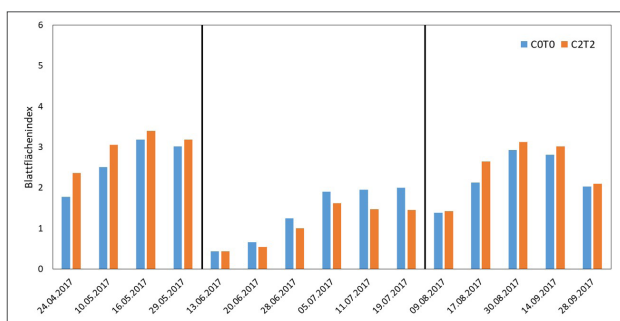


Abbildung 15: Verlauf des Blattflächenindex (Feldspektrometernmessungen) unter Einbeziehung des Dürreexperiments während des 2. Aufwuchses im Jahr 2017.

gehende Analysen, die bei dieser Thematik zweifellos notwendig sind, festgestellt werden, dass die Kombination von kontinuierlicher Klimaveränderung und Extremereignissen eine negative Auswirkung auf die Erträge im Grünland hat.

Schlussfolgerungen

Die Klimaveränderung zeigt sich in erster Linie in der Zunahme der mittleren Temperaturen. Untrennbar damit verbunden ist auch eine Zunahme der CO₂-Konzentration, die als eine Ursache des Treibhauseffektes und damit der Temperaturerhöhung zu sehen ist. In ClimGrass wird die kombinierte Wirkung beider Parameter auf Dauergrünland untersucht und berücksichtigt damit die in einem zukünftigen Klima zwangsläufig bestehende Wechselwirkung zwischen Temperatur- und CO₂-Effekt.

Höhere Temperaturen wirken sich unmittelbar auf die Vegetationsperiode aus. Früherer Beginn und späteres Ende verlängern die Saison, in der Anbau, Pflege und Ernte landwirtschaftlicher Kulturen stattfindet. Vergleiche von Temperatursummen zwischen aktuellem (C0T0) und zukünftigem Klima (C2T2) zeigen, dass die vom Temperaturverlauf abhängige phänologische Phase der Schnittrufe bei einem zukünftigen Klima bei jedem Aufwuchs um fast zwei Wochen früher erreicht wird. Für das Wirtschaftsgrünland erfordert dies eine Anpassung und damit die Erhöhung der Schnittanzahl mit einhergehender Intensivierung der Bewirtschaftung. Grundsätzlich führt dies zu höheren Erträgen; das trifft allerdings nur dann zu, wenn eine Region auch ausreichend mit Wasser versorgt ist. In den Klimaszenarien sind Aussagen zur Veränderung zur Veränderung von Niederschlägen mit großen Unsicherheiten behaftet, sodass regionsspezifische Vorhersagen zukünftiger Ertragspotenziale kaum möglich sind. Es gilt allerdings als gesichert, dass die Schwankungsbreiten in einem zukünftigen Klima zunehmen und Extremereignisse wie beispielsweise Trockenheit und Dürre öfter und intensiver auftreten werden. Die Erträge im Grünland werden dadurch jährlichen Schwankungen unterworfen sein, die von überdurchschnittlichen Erträgen bis hin zu kompletten Ertragsausfällen reichen.

Die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes bildet die Grundlage des Ertrages und der Futterqualität. Die Klimaveränderung führt zu Veränderungen des Pflanzenbestandes, indem Gräser zurückgehen und deren Lücken hauptsächlich von Kräutern geschlossen werden, aber auch der Anteil an Leguminosen steigt an. Pflanzenbestandsparameter wie Wuchshöhe und Blattfläche verändern sich gegenläufig. Während die Wuchshöhe unter geänderten Klimabedingungen abnimmt, erhöht sich die Blattfläche; Bestände werden tendenziell niedriger, aber blattreicher.

Um auch den Effekt eines Dürreereignisses im Kontext des sich verändernden Klimas untersuchen zu können, besteht im ClimGrass-Versuch die Möglichkeit, neben der Temperaturerhöhung und der erhöhten CO₂-Konzentration auch das Auftreten von Dürre durch die Abschirmung von Niederschlägen zu simulieren. Im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018 wurde eine solche Dürre für den zweiten Aufwuchs 2017 simuliert. Bestände, welche einem massiven Trockenstress ausgesetzt sind (C2T2 + Dürre), wachsen kaum in die Höhe und entwickeln im Vergleich zur Vari-

ante mit Trockenstress unter aktuellen Klimabedingungen (C0T0 + Dürre) deutlich weniger Blattfläche. Der Ertrag sinkt in der Extremvariante demzufolge sehr stark ab.

Gerade das Dürreexperiment zeigt, dass bei einer Veränderung des Klimas die Extremereignisse besonders drastisch auf Grünland und dessen Vegetations- und Ertragsdynamik einwirken. Das Risiko einer ausreichenden und kontinuierlichen Versorgung des Viehbestandes steigt damit erheblich und verursacht eine große Planungsunsicherheit. Die Entwicklung von Anpassungsstrategien und deren Umsetzung ist somit eine wichtige Voraussetzung für die Erhaltung bestehender Strukturen von Grünland- und Viehwirtschaftsbetrieben.

Literatur

- Aasen, H.; M.L. Gny, Y. Miao and G. Bareth, G. (2014): Automated Hyperspectral Vegetation Index Retrieval from Multiple Correlation Matrices with HyperCor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 80 (8), 785-795.
- Atzberger, C.; R. Darvishzadeh, M. Immitzer, M. Schlerf, A. Skidmore and G. le Maire (2015): Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 43, 19-31.
- Baret, F.; M. Weiss, P. Bicheron and B. Berthelot (2010): Sentinel-2 MSI Products WP1152 Algorithm Theoretical Basis Document for Product Group B, INRA-EMMAH, Avignon, France.
- Biewer, S.; T. Fricke and M. Wachendorf (2009): Determination of Dry Matter Yield from Legume-Grass Swards by Field Spectroscopy. *Crop Science* 49 (5), 1927-1936.
- Broad, H.J. and M.N. Hough (1993): The growing and grazing season in the United Kingdom. *Grass and Forage Science* 48 (1), 26-37.
- Chmielewski, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In Endlicher und Gerstengarbe (Eds.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut, Berlin, 75-85.
- Darvishzadeh, R.; C. Atzberger, A. Skidmore and M. Schlerf (2011): Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: A comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (6), 894-906.
- Deutscher Wetterdienst (1991): Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. Vorschriften und Betriebsunterlagen 17, 3. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 155 S.
- Dorigo, W.A. (2008): Retrieving canopy variables by radiative transfer model inversion - a regional approach for imaging spectrometer data. Dissertation, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, 230 S.
- Dorigo, W.A.; M. Bachmann and W. Heldens (2006): AS Toolbox & Processing of field spectra, User's manual, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 31 S.
- ESA (2018): Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF), 5 S., https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/Wk0TKajiISaR/content/sentinel-2a-spectral-responses.
- Fang, H.; Z. Xiao, Y. Qu and J. Song (2012): Chapter 11 - Leaf Area Index. In Liang et al. (Eds.): *Advanced Remote Sensing*, Academic Press, Boston, 347-381.
- Frich, P.; L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank and T. Peterson (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19, 193-212.
- Fricke, T.; F. Richter and M. Wachendorf (2011): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 79 (2), 142-152.
- Jacquemoud, S.; W. Verhoef, F. Baret, C. Bacour, P.J. Zarco-Tejada, G.P. Asner, C. François and S.L. Ustin (2009): PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113, Supplement 1 (0), S56-S66.
- King, R.L.; C. Ruffin, F.E. LaMastus and D.R. Shaw (1999): The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-practical issues (Part 2). *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings, Hamburg, IEEE, 1, June 28 - July 2, 1999, 398-400.*
- Klapp, E. (1930): Zum Ausbau der Graslandbestandsaufnahme zu wissenschaftlichen Zwecken. *Pflanzenbau* 6, 197-210.
- Lauscher, F. (1960): Lufttemperatur. In Steinhauser et al. (Eds.): *Klimatographie von Österreich, Band 3, 2. Lieferung, Denkschriften der Gesamtakademie, Springer Verlag, Wien, 138-206.*
- MacArthur, A.; C.J. MacLellan and T. Malthus (2012): The Fields of View and Directional Response Functions of Two Field Spectroradiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (10), 3892-3907.
- Meier, U.; H. Bleiholder, L. Buhr, C. Feller, H. Hack, M. Heß, P.D. Lancashire, U. Schnock, R. Staub, T. Van den Boom, E. Weber and P. Zwerger (2009): The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. *Journal für Kulturpflanzen* 61 (2), 41-52.
- Menzel, A. (2007): Phänologische Modelle. *promet - Meteorologische Fortbildung* 33 (1/2), 20-27.
- Milton, E.J.; M.E. Schaepman, K. Anderson, M. Kneubühler und N. Fox (2009): Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 113 (Supplement 1), S92-S109.
- ÖKS15 (2016): Klimaszenarien für Österreich, Daten - Methoden - Klimaanalyse. ÖKS15-Arbeitsgruppe, Wien, 358 S.
- Pötsch et al. (2019): Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland. Tagungsbericht zum 21. Alpenländischen Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, S 49-54.
- Pötsch, E.M. (2009): Einflussfaktoren auf Ertrag und Qualität von Grünlandfutter. Fortbildungsveranstaltung „Tierärztliche Bestandsbetreuung von Milchviehbetrieben in Österreich“, Gumpenstein, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 4.-6. Juni 2009, 5-13.
- Punalekar, S.M.; A. Verhoef, T.L. Quaife, D. Humphries, L. Bermingham and C.K. Reynolds (2018): Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment* 218, 207-220.
- Reddersen, B.; T. Fricke and M. Wachendorf (2014): A multi-sensor approach for predicting biomass of extensively managed grassland. *Computers and Electronics in Agriculture* 109 (0), 247-260.
- Ruffin, C. and R.L. King (1999): The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-theoretical basis (Part 1). *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings, Hamburg, IEEE, 2, June 28 - July 2, 1999, 756-758.*
- Sanderson, M.A.; C.A. Rotz, S.W. Fultz and E.B. Rayburn (2001): Estimating Forage Mass with a Commercial Capacitance Meter, Rising Plate Meter, and Pasture Ruler. *Agronomy Journal* 93 (6), 1281-1286.
- Savitzky, A. und M.J.E. Golay (1964): Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36 (8), 1627-1639.
- Schaumberger, A.; Schellberg, J. und Hollberg, J. (2015): Spektrometrie - moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen.

20. Alpenländisches Expertenforum zum Thema „Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland“, Gumpenstein, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 1.-2. Oktober 2015, 23-32.
- Sparks, T.H.; Croxton, P.; Collinson, J.N. und Grisenthwaite, D.A. (2005): The grass is greener (for longer). *Weather* 60 (5), 121-125.
- Verhoef, W. (1984): Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment* 16 (2), 125-141.
- Weng, H.T. (2017): Estimation and Validation of the Biophysical Parameter Leaf Area Index for Agricultural Areas from Satellite Sentinel-2A Data. Master Thesis, University of Natural Resources and Life Science, Vienna, Institute of Surveying, Remote Sensing and Land Information, 48 S.
- ZAMG (2000): Anleitung zur phänologischen Beobachtung in Österreich, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimatologie, 31 S., http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/fileadmin/bilder/phaenoanleitung1.pdf, (20.09.2011).
- Zheng, G. und Moskal, L.M. (2009): Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* 9 (4), 2719-2745.