

Auswirkungen der Trockenheit auf die Produktivität des Schweizer Grünlands

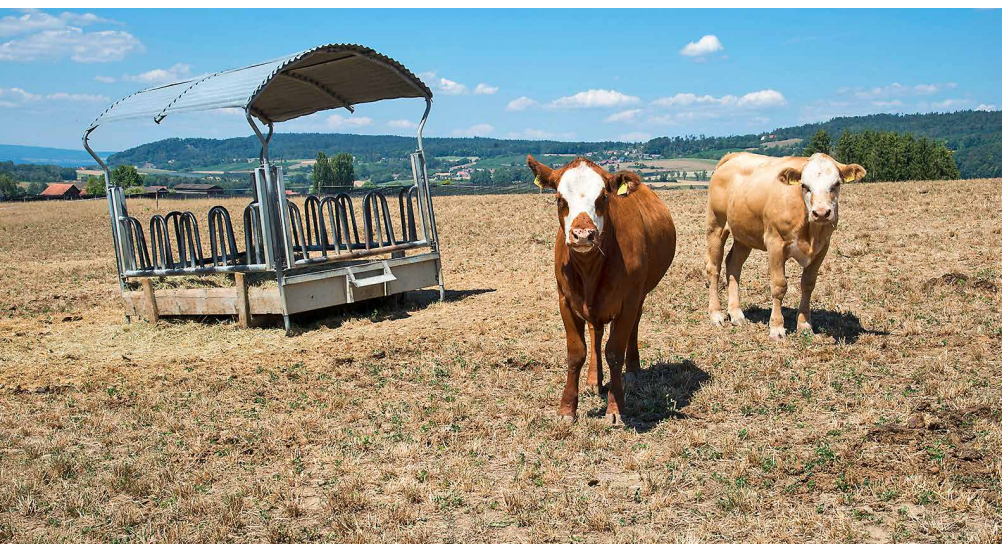
Pierluigi Calanca¹, Chloé Wüst-Galley¹, Silvano Giuliani² und Daniel Erdin²

¹Klima und Landwirtschaft, Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Agristat, Schweizer Bauernverband, 5201 Brugg, Schweiz

Auskünfte: Pierluigi Calanca, E-Mail: pierluigi.calanca@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs13-135> Publikationsdatum: 24. August 2022



Im trockenen Sommer 2018 ist die Raufutterproduktion in der Schweiz massiv eingebrochen.
(Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit untersuchten wir, inwieweit Sommertrockenheit die zwischen 1990 und 2021 beobachteten Schwankungen der landesweit durchschnittlichen Wiesen- und Weideerträge aus den Raufutterberechnungen des Schweizer Bauernverbands erklären kann. Als Mass für die Sommertrockenheit wählten wir die relative Verdunstung, d. h. das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Verdunstung, die wir auf Basis der räumlichen Klimaanalysen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie mit einem vereinfachten Ansatz schätzten. Die Ergebnisse aggregierten wir mit Hilfe der Arealstatistik für die drei Grünlandkategorien Kunstwiesen, Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiet sowie Sömmerungsweiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die

Variabilität der relativen Verdunstung bis zu 60 % der Variabilität der durchschnittlichen Erträge von Wiesen und Weiden erklären kann und dass in Jahren, in denen weite Teile unseres Landes unter Dürre standen (dies war 2003, 2015 und 2018 der Fall), bis zu 25 % der gesamten Raufutterproduktion der Schweiz verloren gehen können. Darüber hinaus decken unsere Auswertungen Unterschiede in den räumlichen Mustern der Sommertrockenheit auf. Diese Resultate unterstreichen die Anfälligkeit der Raufutterproduktion für Sommertrockenheit und die Notwendigkeit der Anpassung des Futterbaus an den Klimawandel.

Key words: summer aridity, grassland yields, variability, spatial analyses, extreme years

Einleitung

Rund drei Viertel der Landwirtschaftsflächen der Schweiz sind Grasland. Gemäss Arealstatistik machen die Naturwiesen und die Heimweiden ca. ein Drittel der Landwirtschaftsflächen aus. Eine ähnlich grosse Fläche wird von den extensiven Sömmerungsgebieten eingenommen. Die Kunstwiesen sind Teil des Ackerlandes und stellen zusätzliche acht Prozent der Fläche dar. Die jährliche inländische Produktion der Wiesen und Weiden bewegt sich in der Grössenordnung von 5,5 Millionen Tonnen Trockensubstanz. Somit deckt das inländische Grünland ca. 75 % des Futterbedarfs für die Haltung von Rindern, Schafen, Ziegen und Pferden. Der Rest wird durch inländische Produkte bzw. Nebenprodukte aus dem Ackerbau und durch Importe gedeckt.

Anhaltende Trockenheit kann das Wachstum von Wiesen und Weiden erheblich verringern (Mosimann *et al.*, 2012). In der Schweiz ist die erste Wachstumsphase im Frühjahr nur selten von Wasserknappheit betroffen, aber im meteorologischen Sommer, d.h. in den Monaten Juni bis August, ist Wassermangel keine Seltenheit. Eine grossflächig auftretende Trockenheit kann zu einem landesweiten Rückgang der Produktion führen, der durch Importe gedeckt werden muss. Wie die Statistiken des Schweizer Bauernverbands belegen, gingen die Produktionsverluste der Jahre 2003, 2006, 2015 und 2018, die hauptsächlich der Trockenheit zugeschrieben werden müssen, in der Tat mit einem steilen Anstieg der Heuimporte gegenüber den Vorjahren (zusätzlichen 60 000 bis 80 000 Tonnen) einher (Erdin, 2018).

Die kurz- und mittelfristigen Auswirkungen von Trockenheit auf das Wachstum von Wiesen und Weiden sowie die Erholung der Vegetation nach einer Dürreperiode wurden in jüngster Vergangenheit in zahlreichen Feldexperimenten mit Regenschutzdächern eingehend erforscht (Meisser *et al.*, 2013; Hahn *et al.*, 2019). Weitere Studien haben zudem gezeigt, dass prozessbasierte Grünlandmodelle diese lokalen Effekte realistisch abbilden können (Calanca *et al.*, 2016). Nach unserem besten Wissen ist jedoch die Frage, welche Rolle die Trockenheit im Hinblick auf die durchschnittlichen Wiesen- und Weideerträge in der Schweiz während den letzten dreissig Jahren tatsächlich gespielt hat, noch nicht quantitativ untersucht worden, dies obwohl Schwankungen der Erträge durch die Statistiken des Bauernverbands (SBV, 2022) gut belegt sind. Eine Antwort auf diese Frage zu geben, war das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Um dieses Ziel zu erreichen, untersuchten wir die Korrelation zwischen Raufuttererträgen, die wir aus der Raufutterberechnung des schweizerischen Bauernver-

bands ableiteten, und der relativen Verdunstung der Sommermonate Juni–August im Zeitraum 1990–2021. Die Bedeutung der relativen Verdunstung, d.h. des Verhältnisses zwischen aktueller und potentieller Verdunstung, für die Ertragsbildung ist in der Pflanzenphysiologie zu suchen, denn Kohlenstoffassimilation und Transpiration gehen beide mit einem Gasaustausch über die Spaltöffnungen einher und sind somit zu einem ähnlichen Ausmass von einem Wasserdefizit betroffen. Bei der Ernährungs- und Wirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) liefert die relative Verdunstung die Basis für die Schätzung des Wasserbedarfs der Kulturen (Doorenbos & Kassam, 1979; Steduto *et al.*, 2012). In der Schweiz wurde die relative Verdunstung für die Beurteilung der Bewässerungsbedürftigkeit in der Landwirtschaft eingesetzt (Fuhrer und Jasper, 2009). Unsere Bewertung der relativen Verdunstung basiert auf den räumlichen Klimaanalysen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), die in einer räumlichen Auflösung von 1 km × 1 km vorliegen (MeteoSchweiz, 2022). Die hohe räumliche Auflösung dieser Produkte erlaubte es uns, nicht nur eine gesamtschweizerische Aussage betreffend Auswirkungen der Trockenheit zu machen, sondern auch deren räumliche Muster zu kartieren und regionale Aspekte der Sommer-trockenheit mit Blick auf Extremjahren zu diskutieren.

Daten und Methoden

Wiesen- und Weideerträge

Die Produktionsdaten von Wiesen und Weiden stammen aus der Raufutterberechnung von Agristat, dem statistischen Dienst des Schweizer Bauernverbands. Diese Statistik war ursprünglich Teil der Futtermittelbilanz und wurde 2005 gründlich revidiert. Ab diesem Zeitpunkt flossen die Daten auch in andere Berechnungen ein, wie die landwirtschaftliche Gesamtrechnung, die Stickstoffbilanz oder die Materialflussrechnung. Die Raufutterberechnung umfasst den ganzen Bereich von der Grasproduktion bis zum Verbrauch in allen seinen Formen (Heu, Grassilage, Trockengras usw.).

Die ermittelten Erträge entsprechen der verwendbaren Produktion der Wiesen und Weiden: Die Konservierungsverluste werden dabei nicht berücksichtigt. Die Graserträge werden nicht direkt erhoben, sondern aufgrund von indirekten Informationen geschätzt. Neben Witterung werden auch Faktoren wie Höhenlage, Extensivierungsgrad der Flächen, Tierbestände, Futtervorräte Ende Winter, Dauer der Grünfutterperiode, Rau-

futterimporte usw. herangezogen. Aufgrund der Datenlage werden die Raufuttermengen nur für die Schweiz als Ganzes geschätzt.

Für die Plausibilisierung der Ergebnisse spielen die Raufuttermengen Ende Jahr eine zentrale Rolle. Sie bewegen sich je nach Landwirtschaftsjahr nach oben oder nach unten, dürfen sich mittelfristig jedoch nicht einseitig entwickeln. Tritt dieser Fall trotzdem auf, wird die Raufutterstatistik rückwirkend korrigiert. Auch bei Änderungen der Grundlagedaten werden die Ergebnisse rückwirkend neu berechnet, wobei in diesem Fall alle Statistiken zurück bis 1990 aktualisiert werden.

Die Produktivität von Wiesen und Weiden hängt stark von der Höhenlage und der Bewirtschaftung ab. Auch ist sie beim Dauergrünland anders als bei den Kunstwiesen, die in einer Fruchtfolge integriert sind. Um dies berücksichtigen zu können, wurden die Erträge für folgende Grünlandkategorien geschätzt: Kunstwiesen, Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiet, Sömmerungsweiden.

Unsere Berechnungen decken die Jahre 1990 bis 2021 ab. Es ist davon auszugehen, dass die absoluten Ertragsniveaus in diesem Zeitraum auch durch den Wandel der agronomischen Praxis und Veränderungen anderer Rahmenbedingungen gelenkt wurden. Da diese Faktoren nicht berücksichtigt werden konnten, wurden die Zeitreihen trendbereinigt.

Aus dem Gesichtspunkt der Korrelation mit der relativen Verdunstung sind nicht die absoluten, sondern die relativen Erträge wichtig, d. h. das Verhältnis zwischen erzielten und potenziellen Erträgen. Unter potenziellen Erträgen sind diejenigen Erträge zu verstehen, die unter optimaler Witterung während der ganzen Vegetationszeit in jedem Jahr hätten realisiert werden können. Diese sind allerdings nicht bekannt und mussten auf der Basis der verfügbaren Daten geschätzt werden. Unter der Annahme, dass es über einen längeren Zeitraum immer wieder Jahre mit günstigen Witterungsbedingungen gibt, gingen wir davon aus, dass der potenzielle Ertrag dem maximalen Ertrag in einem 11-jährigen Zeitfenster entspricht, erhöht um 5%. Die damit verbundene Unsicherheit setzten wir auf +/-10%.

Relative Verdunstung

Wie bereits erwähnt bildeten die räumlichen Klimaanalysen von MeteoSchweiz den Ausgangspunkt für die Schätzung der relativen Verdunstung. Die potentielle Verdunstung (in mm pro Monat), bestimmten wir mit Hilfe der Formel von Blaney und Criddle (1962), welche gemäss Schrödter (1985) für mitteleuropäische Klimabedingungen wie folgt approximiert werden kann:

$$ET_p = d_m \{-1,55 + 0,96 [p (0,457 T_m + 8,128)]\} \quad (1)$$

worin d_m die Anzahl Tage im Monat bezeichnet, T_m die monatsmittlere Temperatur [°C], und p ein Faktor ist, welcher die Anzahl der Tagesstunden in Prozent der Summe der jährlichen Tagesstunden ausdrückt.

Die relative Verdunstung schätzten wir nach einem Ansatz, der auch in der Ingenieur-Hydrologie zum Einsatz kommt und im deutschsprachigen Raum als Bagrov-Verfahren bekannt ist (Dyck & Peschke, 1995; Miegel *et al.*, 2013). Wir verwendeten dabei folgende Formel (Zhang *et al.*, 2014):

$$\frac{ET_a}{ET_p} = 1 + \frac{N_m}{ET_p} - \left[1 + \left(\frac{N_m}{ET_p} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} \quad (2)$$

wobei ET_a die aktuelle Verdunstung und N_m die Niederschlagssumme bezeichnen (beide in mm pro Monat), und w ein Parameter ist, der eigentlich den Einfluss von Bodenbeschaffenheit und Vegetation abbilden sollte, den wir aber als konstant annahmen (mit einem Referenzwert von $5,0 \pm 1,5$).

Die Angemessenheit von Gleichung (2) überprüften wir, indem wir die daraus gewonnenen mittleren jährlichen Verdunstungshöhen denjenigen im Hydrologischen Atlas der Schweiz gegenüberstellten (Menzel *et al.*, 1999). Der Vergleich (Anhang) zeigte eine gute Übereinstimmung, sowohl bezüglich der absoluten Mengen als auch hinsichtlich der räumlichen Muster.

Landnutzung

Die Raufutterberechnung von Agristat berücksichtigt grundsätzlich drei Grünlandkategorien: die Kunstwiesen, die Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiets und die Sömmerungsweiden. Für die räumliche Aggregation der relativen Verdunstung für die gleichen Grünlandkategorien zogen wir die Arealstatistik der Jahre 1979–1985, 1992–1997, 2004–2009 und 2013–2018 bei (BFS, 2020 und 2021a). Der Anteil Kunstwiesen im Ackerbaugebiet schätzten wir basierend auf Angaben in den Landwirtschaftlichen Strukturhebungen (BFS, 2021b). Für die zeitliche Interpolation bzw. Extrapolation nahmen wir an, dass die vier Datensätze nominal für die Jahre 1982, 1995, 2007, 2016 gültig sind. Interpoliert wurde dann linear; extrapoliert unter Annahme konstant bleibender Landnutzung.

Die räumliche und Höhenverteilung der betrachteten Grünlandkategorien ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die drei Kategorien unterschiedliche Höhenlagen beanspruchen.

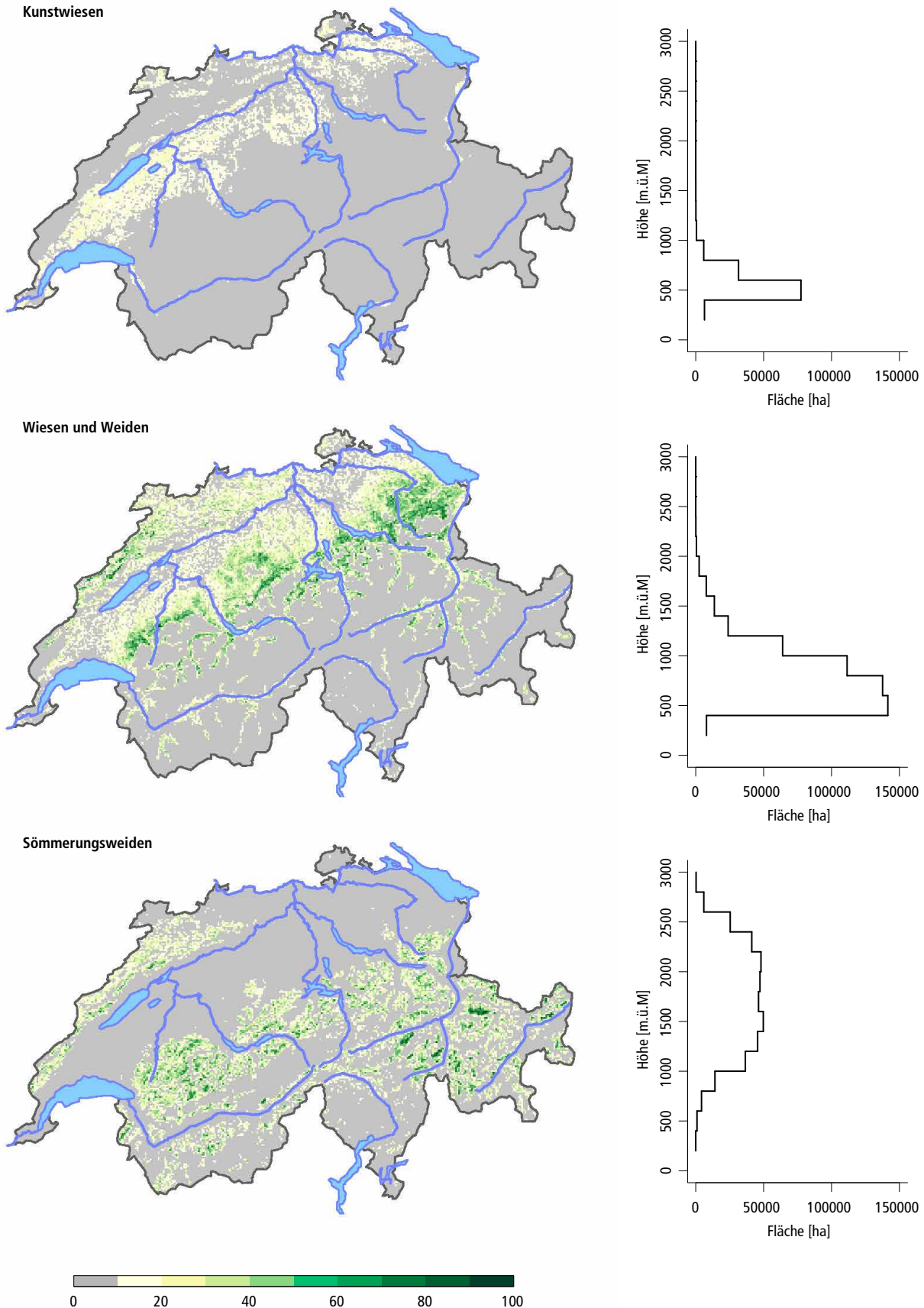


Abb. 1 | Räumliche (links) und Höhenverteilung (rechts) von Kunstwiesen (oben), Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiet (Mitte) und Sömmerungsweiden (unten), am Beispiel des Jahres 2021. Die ursprünglichen Daten in 100 m × 100 m Auflösung wurden auf die 1 km × 1 km Auflösung der Klimadaten von MeteoSchweiz aggregiert. Dargestellt in den Karten links ist der prozentuale Anteil der drei Landnutzungskategorien in einer 1 km × 1 km Gitterzelle (Farbskala am unteren Rand der Abbildung).

Resultate

Zeitverlauf

Der Zeitverlauf der relativen Erträge im Vergleich zum Zeitverlauf der räumlich aggregierten, mittleren relativen Verdunstung für die Monate Juni–August (Abb. 2) zeigt, dass Sommertrockenheit eine Hauptursache für die Ertragsschwankungen der letzten 30 Jahre war, wenn auch die Übereinstimmung bei weitem nicht perfekt ist. Die Variabilität der relativen Verdunstung er-

klärt nämlich bei allen drei Grünlandkategorien rund 50–60 % der beobachteten Ertragsvariabilität. In der untersuchten Zeitspanne bewegten sich die in Folge von anhaltendem Wassermangel auftretenden Ertragsverluste zwischen 10 und 40 % (Kunstpflanzen) und zwischen 10 und 30 % (Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiets sowie Sömmerungsweiden). Deutlich zu erkennen in Abbildung 2 sind insbesondere die Produktivitätseinbrüche der Jahre 1998, 2003, 2013, 2015 und 2018.

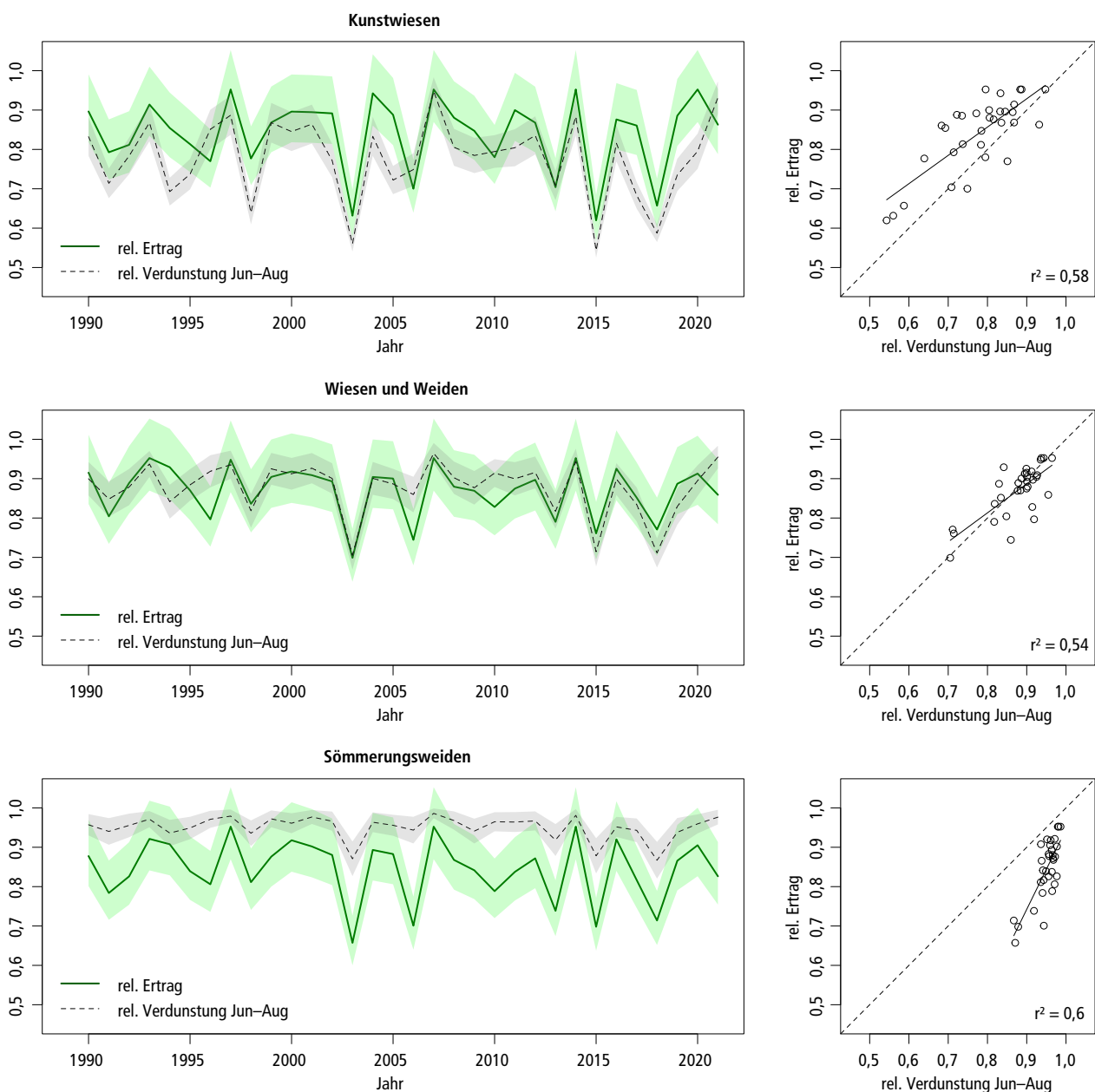


Abb. 2 | Links: zeitlicher Verlauf 1990–2021 der relativen Erträge (grün durchgezogene Linie) und der relativen Verdunstung (schwarz gestrichelte Linie) für Kunstpflanzen (oben), Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebiets (Mitte) und Sömmerungsweiden (unten). Rechts: Streudiagramm der Beziehung zwischen relativer Verdunstung und relativen Erträgen. Die Regressionsgerade (durchgezogen) und die 1:1-Linie (gestrichelt) sind ebenfalls eingezeichnet. Der Bestimmtheitskoeffizient ist in der unteren rechten Ecke eingetragen.

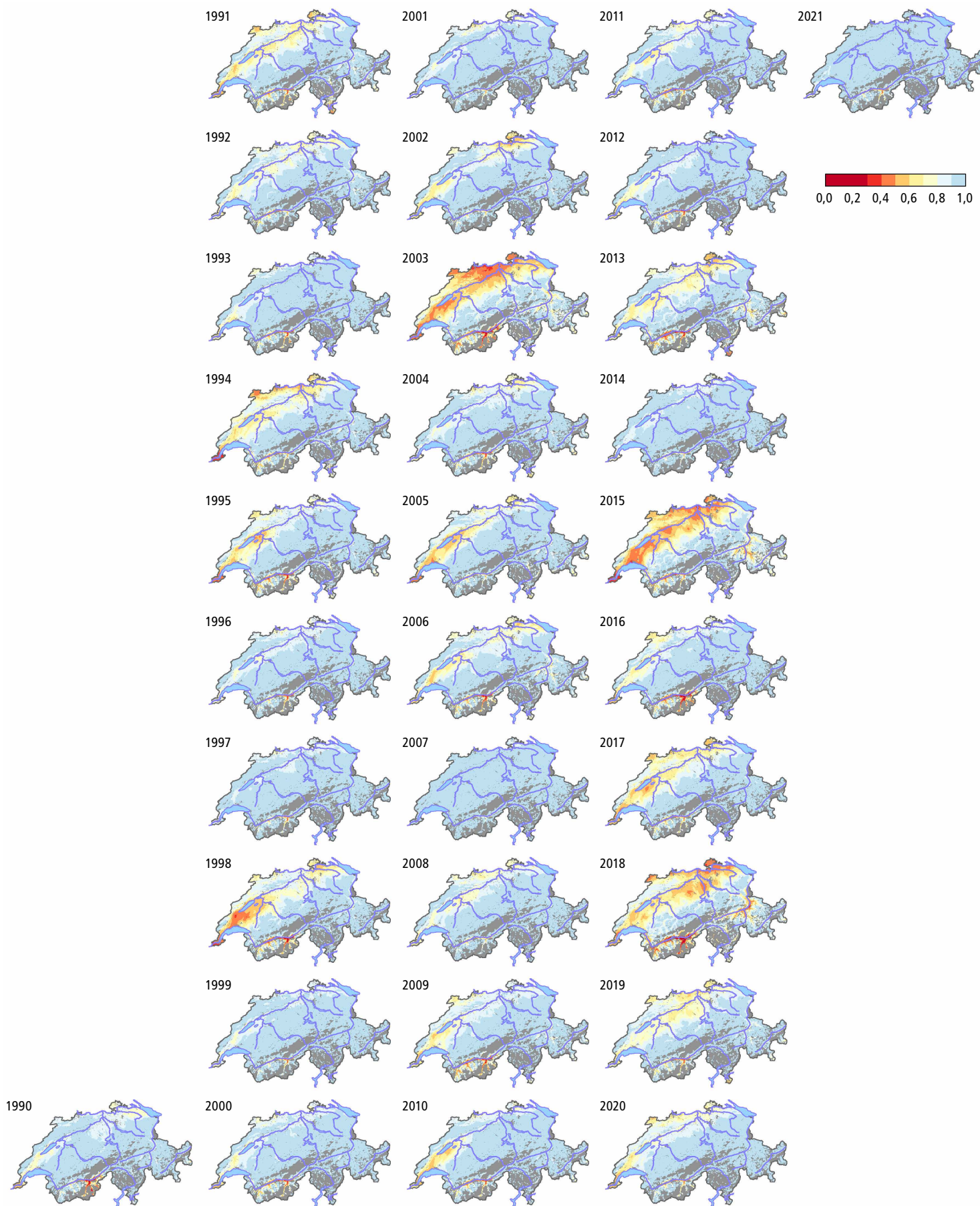


Abb. 3 | Räumliche Verteilung der relativen Verdunstung (Mittel der Sommermonate Juni–August) in den Jahren 1990–2021. In der Karte sind nur 1 km × 1 km Gitterzellen eingefärbt, in denen der Flächenanteil aller drei Grünlandkategorien zusammen mehr als 10% beträgt. Gebiete, die nicht einer der drei Grünlandkategorien zugewiesen wurden, sind dunkelgrau eingefärbt. Die Farbskala ist oben rechts ersichtlich. Je roter die Farbe, desto ausgeprägter die Trockenheit.

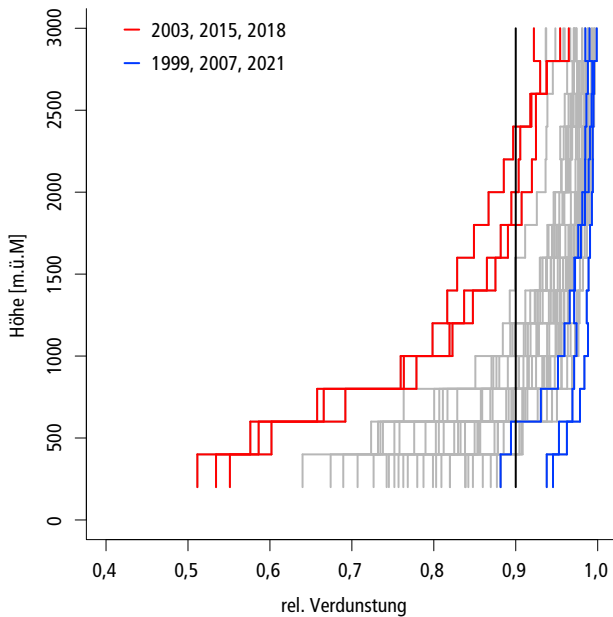


Abb. 4 | Höhenverteilung der relativen Verdunstung (Mittelwert der Sommermonate Juni–August) innerhalb des Grünlands (Summe aller Kategorien in Abb. 1). Je drei sehr trockene (2003, 2015, 2018; rot) und sehr feuchte Jahre (1999, 2007, 2021; blau) sind farblich hervorgehoben. Die vertikale Linie bei einer relativen Verdunstung von 0,9 ist als Interpretationshilfe zu betrachten.

Räumliche Muster

Da wir die relative Verdunstung auf dem gleichen räumlichen Gitter wie die Klimaanalysen von MeteoSchweiz berechneten, erlauben die Ergebnisse auch einen Einblick in die räumlichen Muster der Sommertrockenheit. Die Abfolge von Karten in Abbildung 3 verdeutlicht die unterschiedliche Ausprägung der Trockenheit sowohl in Jahren, in denen die Trockenheit eher von lokaler bis regionaler Natur war (1998, 2005, 2006, 2010 und 2017), als auch in Extremjahren, in denen grosse Teile der Westschweiz (Gebiete am Ufer des Genfersees und das Drei-Seen-Land) sowie die Region um Basel und die Nordostschweiz von Wassermangel betroffen waren (2003, 2015 und 2018).

Bei näherer Betrachtung der Jahre 2003 und 2018 werden auch regionale Unterschiede in der Verteilung der unter extremer Trockenheit stehenden Gebieten offenbart. Während 2003 vor allem die Westschweiz (Ebenen der Orbe und Broye), das Gebiet zwischen Basel, dem Fricktal und Schaffhausen sowie die Region zwischen Solothurn und Bülach unter Dürre litten, waren es 2018 in erster Linie die Region Schaffhausen, das untere Reusstal (zwischen Sins und Wohlen) und, im Osten, das Vorderrhein- und Rheintal.

Höhenverteilung

In Abbildung 1 haben wir gezeigt, dass die Grünlandkategorien Kunstwiesen, Wiesen und Weiden ausserhalb der Sömmerungszone und Sömmerungsgebiete unterschiedliche Höhenlagen beanspruchen. Die relative Verdunstung weist ebenfalls einen deutlichen Höhengradienten auf (Abb. 4). In den nassen Jahren 1999, 2007 oder 2021 (in Abb. 4 blau eingefärbt) erreichte sie auf allen Höhenstufen Werte von über 0,9 und war für keine der Grünlandkategorien als kritisch zu betrachten.

In Jahren mit mässig trockenem Sommer (in Abb. 4 grau eingefärbt) waren nur Regionen unterhalb von etwa 1000 m über dem Meeresspiegel durch eine relative Verdunstung von weniger als 0,9 gekennzeichnet. Es ist daher davon auszugehen, dass in diesen Jahren nur die Kunstwiesen und die tiefer gelegenen Wiesen und Weiden unter den Folgen der Trockenheit litten, weniger so jedoch die Sömmerungsweiden. In Jahren mit andauernder Sommertrockenheit wie 2003, 2015 und 2018 (in Abb. 4 rot eingefärbt) hingegen waren alle Grünlandkategorien von Dürre betroffen, denn die Gebiete mit potenziell hoch ausfallenden Ertragseinbussen erstreckten sich bis 1500 m über Meer und zum Teil noch weit darüber.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Auswirkung der Sommertrockenheit auf die mittleren Erträge

Es steht ausser Frage, dass unter den biotischen und abiotischen Faktoren, die das Graswachstum beeinträchtigen können, Trockenheit eine besonders wichtige Rolle spielt. Andauernde Dürre macht sich oft nicht nur auf lokaler Ebene bemerkbar, sondern hat negative Folgen für die Ertragsbildung grosser Gebiete, was sich wiederum in den landesweiten Produktionsstatistiken niederschlägt. In unserer Arbeit konnten wir zeigen, dass etwa 60 % der zwischen 1990 und 2021 beobachteten Schwankungen der Durchschnittserträge aus den Raufutterberechnungen von Agristat durch Änderungen von Jahr zu Jahr in der Wasserversorgung der Grünlandvegetation erklärt werden können. Dieses Bild deckt sich gut mit demjenigen von Studien auf Europäischer Ebene (EEA, 2022). Wie unsere Schätzungen zeigen, ging die Produktivität in Jahren mit einem extrem trockenem Sommer um 30–40 % zurück, was mit den Ergebnissen von Feldversuchen mit Regenschutzdächern übereinstimmt (Meisser *et al.*, 2013). Bei durchschnittlichen Produktionsmengen des Graslandes in der Grössenordnung von jährlich 5,5 Millionen Tonnen beliefen sich die entsprechenden

Produktionsausfälle im Extremfall auf bis zu 1,2 Millionen Tonnen. Dies liegt weit über den rund 250 000 Tonnen Futter, die in einem Jahr wie 2018 importiert wurden (Erdin, 2018). Diese Zahlen unterstreichen die Anfälligkeit der Futtermittelproduktion für extreme klimatische Ereignisse.

Hohe Ertragsverluste bei Dürre sind nicht nur als Folge des Wassermangels allein zu verstehen, sondern auch der Nichtverfügbarkeit von Nährstoffen, die durch die Verlangsamung der Bodenaktivität bei fortschreitendem Wasserdefizit verursacht wird. Im Allgemeinen ist zudem davon auszugehen, dass Dürre nicht nur Auswirkungen auf die Menge, sondern auch auf die Qualität des Grases hat (Meisser *et al.*, 2018).

Im untersuchten Zeitraum war der trockenheitsbedingte Rückgang der Produktivität bei den Kunstwiesen stärker ausgeprägt als bei den Wiesen und Weiden ausserhalb der Sömmerungsgebiete und den Sömmerungsweiden. Einerseits könnte dies damit zu tun haben, dass Kunstwiesen Teil einer Fruchtfolge sind und immer wieder neu angelegt werden und im ersten Jahr noch nicht über ein voll entwickeltes Wurzelsystem verfügen, mit dem sie vorübergehende Wasserknappheit abfedern können. Andererseits sind Kunstwiesen praktisch nur in den tiefen Lagen des Mittellandes zu finden, wo die Dynamik und Intensität von Dürreperioden in der Vergangenheit am stärksten ausgeprägt war.

Methodische Aspekte

Der von uns gewählte Ansatz beruht auf einer vereinfachten Berechnung der potenziellen und der relativen Verdunstung. Wir haben unsere Schätzungen auf ihre Plausibilität hin überprüft, aber es steht ausser Zweifel, dass die Methodik in Zukunft verbessert werden muss. Zu den wichtigen Aspekten, die in unserer Arbeit nicht berücksichtigt wurden, gehören die Rolle der Bodeneigenschaften und der Topografie für den Wasserkreislauf in Grünlandökosystemen, die Niederschlagsdynamik im Winter und Frühjahr, die sich auf die Wasserverfügbarkeit zu Beginn der Sommersaison auswirken kann, sowie der Zeitpunkt und die Intensität der Bewirtschaftung, die insbesondere in der Anfangsphase die Entwicklung der Trockenheit beeinflussen können. Es ist klar, dass komplexere Modelle erforderlich sind, um die damit verbundenen Prozesse bei der Bestimmung der relativen Verdunstung berücksichtigen zu können. Die räumlichen Analysen von MeteoSchweiz erlaubten es dennoch, eine detaillierte Kartierung der sommerlichen Trockenheit und Unterschiede im Auftreten von Wasserknappheit sowohl zwischen den Regionen als auch zwischen den Jahren auszumachen.

In Bezug auf Kunstwiesen sowie Wiesen und Weiden ausserhalb des Sömmerungsgebietes konnten wir zeigen, dass die relative Verdunstung nicht nur einen grossen Teil der Gesamtvariabilität erklärt, sondern auch die absoluten Werte der relativen Erträge gut wiedergibt. Dies war nicht der Fall für die Sömmerungsweiden. Wir vermuten, dass mit unserem Ansatz im Fall des Sömmerungsgebietes die relative Verdunstung in trockenen Jahren deutlich überschätzt wird. Eine mögliche Erklärung dieser Feststellung liegt darin, dass die in Gleichung (2) eingesetzten Niederschlagssummen die für die Vegetation relevanten Wassermengen vor allem oberhalb von etwa 1000 m über Meer überschätzten. Bekanntlich nehmen die Niederschlagsmengen im Alpenraum mit der Höhe zu (Lang, 1985). Jedoch nimmt auch die mittlere Hangneigung auf Grund der steiler werdenden Topographie zu, während die Bodenmächtigkeit abnimmt. Dies führt dazu, dass in höher gelegenen Gebieten ein grösserer Anteil des Niederschlags zur Bildung des Abflusses beiträgt und nicht im Boden verbleibt (und für die Vegetation verfügbar ist).

Eine quantitative Betrachtung der Prozesse, die zur Abflussbildung beitragen, sollte bei einer Aktualisierung der vorliegenden Ergebnisse auf jeden Fall einbezogen werden. Wichtig wäre zudem, die Betrachtung räumlich stärker zu differenzieren, damit die Heterogenität von Topographie, Böden und Landnutzung besser abgebildet werden kann. In den inneralpinen Tälern des Wallis und Graubündens wird ein Teil der Wiesen und Weiden traditionsgemäss bewässert. Dies ist eine weitere Facette, die bei zukünftigen Untersuchungen mehr Aufmerksamkeit verdienen sollte.

Ausblick

Eine kürzlich publizierte Analyse von Scherrer *et al.* (2022) hat für das Schweizer Mittelland, rückblickend auf die letzten 40 Jahre, eine Tendenz zu trockeneren Sommerhalbjahren ergeben. Scherrer *et al.* (2022) haben diesen Trend mit einer signifikanten Zunahme der Verdunstung und einer statistisch nicht signifikanten Abnahme der Sommerniederschlagssummen in Verbindung gebracht. Wenn wir uns der Zukunft zuwenden, können wir sagen, dass ein zusätzlicher Anstieg der Temperatur bis Mitte Jahrhundert so gut wie unvermeidbar ist. Zudem deuten aktuelle Klimaszenarien für die Schweiz (NCCS, 2018) auf eine weitere Abnahme der Sommerniederschlagssummen hin. Es ist auch wahrscheinlich, dass Extremereignisse häufiger und intensiver werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die Raufutterproduktion in der Schweiz weiterhin mit den Auswirkungen der Trockenheit zu kämpfen haben wird. ■

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) für die Bereitstellung der räumlichen Klimaanalysen.

Literatur

- Blaney H. F., & Criddle, W.D. (1962). Determining Consumptive Use and Irrigation Water Requirements. USDA Agric. Res. Serv., Techn. Bull. No 1275.
- BFS (2020). Die Arealstatistik 2004/09. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area/geschichte/area-2004-09.html>. [27.09.2020]. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.
- BFS (2021a). Datenbeschreibung: Geodaten in Hektarauflösung zur Arealstatistik nach Nomenklatur 2004. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.
- BFS (2021b). Landwirtschaftliche Strukturhebung. Daten sind als «STAT-TAB – interaktive Tabellen» abgerufen worden (<https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/>). Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.
- Calanca, P., Deléglise, C., Martin, R., Carrère, P., & Mosimann, E. (2016). Testing the ability of a simple grassland model to simulate the seasonal effects of drought on herbage growth. *Field Crops Res.*, 187, 12–23.
- Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). Yield response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 193 S.
- Dyck, S., & Peschke, G. (1995). Grundlagen der Hydrologie. Verlag f. Bauwesen, Berlin, 546 S.
- EEA (2022). Drought impact on ecosystems in Europe. <https://www.eea.europa.eu/ims/drought-impact-on-ecosystems-in-europe>. European Environmental Agency, Kopenhagen.
- Erdin, D. (2018). Das Trockenjahr 2018. AGRISTAT 11–18, Schweizer Bauernverband, Brugg. https://www.sbv-usp.ch/fileadmin/sbvuspch/04_Medien/Agristat_aktuell/2018/Aktuell_AGRISTAT_2018-11.pdf
- Fuhrer, J., & Jasper, K. (2009). Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* 16 (10), 396–401.
- Hahn, C., Lüscher, A., Ernst-Hasler, S., Suter, M., & Kahmen, A. (2019). Timing of drought in the growing season and strong legacy effects determine the annual productivity of temperate grasses in a changing climate. *Biogeosciences*, 18, 585–604, <https://doi.org/10.5194/bg-18-585-2021>
- Lang, H. (1985). Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: Sevruck, B., Der Niederschlag in der Schweiz. Bericht der Arbeitsgruppe «Niederschlag» der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG). Kommissionsverlag: Geographischer Verlag Kümmerly + Frey, Bern, S. 149–157.
- Meisser, M., Deléglise, C., Mosimann, E., Signarbieux, C., Mills, R., Schlegel, P., Buttler, A., & Jeangros, B. (2013). Auswirkungen einer ausgeprägten Sommertrockenperiode auf eine montane Dauerweide im Jura. *Agrarforschung Schweiz* 4 (11–12), 476–483.
- Meisser, M., Vitra, A., Stévenin, L., Mosimann, E., Mariotte, P., & Buttler, A. (2018). Auswirkungen von Trockenperioden auf die Futterproduktion von Graslandsystemen. *Agrarforschung Schweiz* 9 (3), 82–91.
- Menzel L., Lang, H., & Rohmann, M. (1999). Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992. *Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 4.1.* (<https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/verdunstung/tafel-4-1>; digitale Version: https://hydromaps.ch/#de/8/46.830/8.193/bl_hds)
- MeteoSchweiz (2022). Räumliche Klimaanalysen. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich-Flughafen. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/raeumliche-klimaanalysen.html>
- Miegel, K., Bohne, K., & Wessolek, G. (2013). Vorhersage der regionalen, langjährigen bodenbürtigen Grundwasserneubildung mit hydrologischen Pedotransferfunktionen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 57. Jahrgang, Heft 6. https://doi.org/10.5675/HyWa_2013_6_2
- Mosimann, E., Meisser, M., Deléglise, C., Jeangros, B. (2012). Das Futterpotenzial der Juraweiden. *Agrarforschung Schweiz* 3 (11+12), 516-523.
- NCCS (Hrsg.) (2018). CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services (NCCS), Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2.
- Scherrer, S. C., Hirschi, M., Spirig, C., Maurer, F., & Kotlarski, S. (2022). Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. *Environ. Res. Commun.* 4 025004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ac4fb9>
- Schrödter, H. (1985). Verdunstung – Anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag, Berlin, 186 S.
- SBV (2022). Statistische Erhebungen und Schätzungen. Digitale Ausgabe. Schweizer Bauernverband, Brugg. <https://www.sbv-usp.ch/de/services/agristat-statistik-der-schweizer-landwirtschaft/statistische-erhebungen-und-schaetzungen-ses/>
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 500 S. <https://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf>
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W., & Briggs, P. R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, Vol. 40, W02502, <https://doi.org/10.1029/2003WR002710>

Anhang

Plausibilisierung der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstungshöhen 1973–1992

Um unsere Berechnung der relativen Verdunstung zu plausibilisieren, haben wir die daraus resultierende Jahressumme der aktuellen Verdunstung (Mittelwert für die Jahre 1973–1992) mit den mittleren jährlichen aktuellen Verdunstungshöhen aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz (Menzel *et al.*, 1999) verglichen. Die Gegenüberstellung (Abb. A1) zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung, obwohl die jährlichen Verdunstungswerte im Hydrologischen Atlas der Schweiz eine höhere Heterogenität aufweisen. Dies ist auf die Berücksichtigung der feinskaligen Struktur der Landnutzung durch Menzel *et al.* (1999) bei ihren Modellierungsarbeiten zurückzuführen.

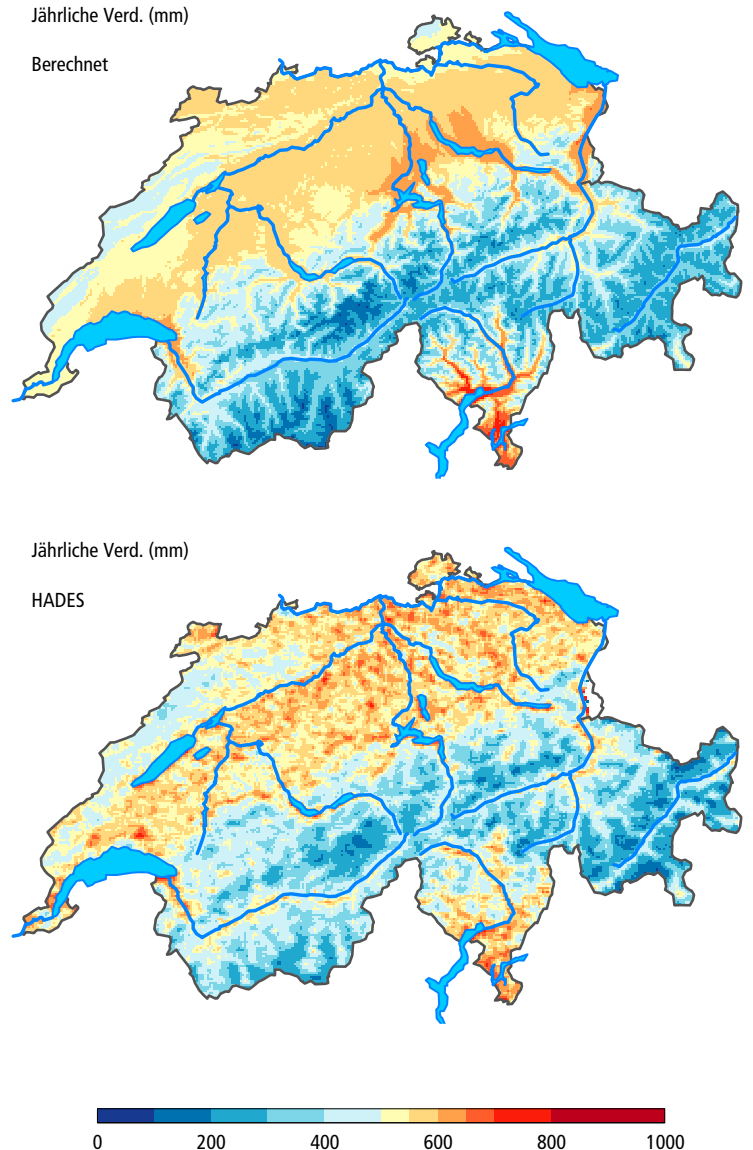


Abb. A1 | Vergleich zwischen den von uns geschätzten mittleren jährlichen Höhen der aktuellen Verdunstung (oben) und den entsprechenden Werten aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz, HADES (unten).