

Auswirkung von Trockenperioden auf Wiesen

Marco Meisser, Claire Deléglise, Luc Stévenin und Eric Mosimann
 Agroscope, Institut für Nutztierwissenschaften INT, 1260 Nyon, Schweiz
 Auskünfte: Marco Meisser, E-Mail: marco.meisser@agroscope.admin.ch



Simulation unterschiedlicher Niederschlagsmengen in Gewächshauttunneln.

Einleitung

Wiesen-Ökosysteme reagieren empfindlich auf Wassermangel (Lemaire und Pflimlin 2007). In der Westschweiz können in extremen Jahren Trockenperioden im Sommer Ertragseinbussen von bis zu 40 % zur Folge haben (Mosimann *et al.* 2012). In Versuchen mit simuliertem Trockenstress betrug die jährliche Abweichung zwischen 10 % und 50 % (Gilgen und Buchmann 2009; Meisser *et al.* 2013).

Trockenperioden beeinflussen auch den Nährwert von Futter, allerdings in geringerem Ausmass als den Ertrag (Buxton und Casler 1993; Buxton und Fales 1994). Studien zu den Auswirkungen von Trockenheit kommen zu widersprüchlichen Ergebnissen. Jensen *et al.* (2010) zeigen, dass eine mässige Trockenheit eine Erhöhung des Gehalts an Rohprotein (RP) und eine Verminderung des Anteils an Zellwandbestandteilen zur Folge hat, teilweise aufgrund einer langsameren Reifung der Pflanzen (Halim *et al.* 1989). Andere Autoren beobachten dagegen bei grossem Stress einen Rückgang des Gehalts an

RP, entweder wegen der vorzeitigen Alterung der Blätter (Buxton 1996) oder wegen der beeinträchtigten Fähigkeit von Leguminosen, atmosphärischen Stickstoff zu fixieren, wobei dieser Rückgang stärker ist als die Abnahme des Wachstums (Küchenmeister *et al.* 2013).

Trockenstress kann den Nährwert auch indirekt über Veränderungen der Zusammensetzung der botanischen Arten beeinflussen. Grant *et al.* (2014) kommen zum Schluss, dass Veränderungen der Artenzusammensetzung und die Alterung die zwei wichtigsten Faktoren sind, welche den Nährwert bei Trockenheit verändern. Während die Abundanz der einzelnen Arten im Verlaufe der Vegetationsperiode beträchtlich schwanken kann, ist deren Ersetzung (*Turnover*) im Allgemeinen viel langsamer.

Da objektive Kriterien fehlen, die das Ausmass des Stresses beschreiben, dem Pflanzen bei Trockenheit ausgesetzt sind, ist ein Vergleich der Trockenversuche schwierig. Vicca *et al.* (2012) betonen die Notwendigkeit, Indikatoren festzulegen, welche das Ausmass des Stresses quantifizieren. Die Reaktionen auf Wassermangel hängen in erster Linie von der Menge und Verteilung der Niederschläge ab. Die Art des Bodens (Tiefe, Textur) und die Eigenschaften der Vegetation (Artenzusammensetzung, funktionelle Eigenschaften der Pflanzen) sind weitere wichtige Faktoren. Schliesslich beeinflussen auch klimatische Parameter (Einstrahlung, Wind, Temperatur) die Evapotranspiration und folglich den Wasserzustand des Bodens. Um die Versuche und die Reaktionen der Wiesen-Ökosysteme besser interpretieren zu können, muss der Stress beschrieben werden, dem die Pflanzen ausgesetzt sind. Leider gibt es nur wenige Studien, in denen die Entwicklung des Wassergehalts oder des Wasserpotenzials in den verschiedenen Bodenhorizonten gemessen wird. Eine solche kontinuierliche Beobachtung wäre aber wichtig, um die Wasserreserven und die Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanzen beurteilen zu können (Vicca *et al.* 2012).

Dieser Artikel beschreibt die Aussagekraft verschiedener Indikatoren, um die Intensität von Trockenperioden quantifizieren zu können. Es werden die bei den Trockenversuchen beobachteten Ertragseinbussen präsentiert und hinsichtlich dieser Indikatoren diskutiert. Aus-

serdem werden Veränderungen des Nährwerts und der Artenzusammensetzung erörtert, die sehr kurzfristig, d.h. während dem Trockenstress, festgestellt wurden.

Material und Methoden

Versuchsstandorte und Trockenbehandlungen

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Eigenschaften der Versuchsstandorte aufgeführt. Die Ergebnisse in diesem Artikel stammen ausschliesslich von Dauer- und Kunstwiesen, die intensiv bewirtschaftet, d.h. alle vier bis fünf Wochen gemäht oder beweidet wurden.

Der Trockenstress wurde mit Hilfe von seitlich geöffneten Folientunnels simuliert. 2012 und 2013 erhielten die Flächen mit Trockenbehandlung (in den Folientunneln) während des Behandlungszeitraums kein Wasser. Die Vergleichsflächen befanden sich im Freien (natürliche Niederschläge; Tab. 1). Die Temperaturen, welche unter den Folientunneln gemessen wurden, waren fast dieselben wie jene, die auf den Kontrollparzellen ermittelt wurden. 2014 wurden an den beiden Standorten Coinsins und Bière in den Tunneln mit Hilfe einer Beregnungsanlage mit Durchflussmesser unterschiedliche Regenmengen simuliert. Die Behandlungen sahen wie folgt aus: 100% (Referenzbehandlung), 66% und 33% der Niederschlagsnorm (Tab. 1). Die Häufigkeit der Beregnung wurde in ähnlichen Schritten reduziert: acht bis zehn Tage «Regen» pro Monat bei der 100%-Behandlung, und sechs bzw. drei Tage «Regen» für die 66%- bzw. 33%-Behandlung. Im Vergleich zu einer Behandlung ohne Beregnung weist diese Simulation der Niederschlagsmengen zwei Vorteile auf: Die Situationen simulieren wirkliche Trockenperioden viel besser und die Bedingungen hinsichtlich Temperatur und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) sind bei allen Behandlungen gleich (Vogel *et al.* 2013).

Die in dieser Studie betrachteten Zeiträume beziehen sich auf die Wachstumsperioden und decken sich nicht immer mit dem Beginn oder Ende der simulierten Trockenperioden. Der 2012 berücksichtigte Zeitraum umfasst zum Beispiel die Vegetationszyklen 2 bis 4 (96 Tage; Tab. 1). Die Trockenheitsbehandlung begann dagegen erst während dem zweiten Zyklus und endete am Schluss des vierten Zyklus (76 Tage). 2013 war die Trockenperiode in Chéserey ebenfalls ein wenig kürzer als die beiden Vegetationszyklen (47 bzw. 58 Tage).

Meteorologische Daten

Bei allen Versuchsstandorten wurden Regenmesser und Sonden zur Messung von Luft- und Bodentemperatur (in 2 m und 30 cm bzw. -12 cm) installiert. Der Wassergehalt des Bodens wurde in La Frêtaz kontinuierlich gemessen

Zusammenfassung

Um (simulierte oder natürliche) Trockenperioden beurteilen zu können, sind allgemeine Kriterien erforderlich, welche den Stress berücksichtigen, dem die Pflanzen bei solchen Ereignissen ausgesetzt sind. Diese Studie untersucht die Aussagekraft verschiedener Indikatoren für die Beschreibung der Intensität von Perioden mit Wassermangel. Diese Indikatoren wurden mit Hilfe der Ergebnisse von Trockenversuchen (Simulationen im Folientunnel) evaluiert, die von Agroscope zwischen 2012 und 2014 auf Kunstwiesen in 470 bis 1200 m Höhe durchgeführt worden sind. Indikatoren, die einzig auf klimatischen Parametern basieren, können die Intensität einer Trockenheitsbehandlung nicht ausreichend beschreiben. Das Wasserdefizit, (N-ETP) genügt zum Beispiel nicht, um die Intensität des Stresses zu beschreiben, dem die Pflanzen ausgesetzt sind. Dieser Parameter berücksichtigt nämlich den Zusammenhang zwischen Vegetation und Boden nicht. Aussagekräftiger sind Indikatoren, die auf dem im Boden verfügbaren Wasser beruhen, da sie die Ertragsunterschiede zwischen Flächen mit Wassermangel und ausreichend versorgten Flächen besser erklären. In unseren Versuchen beliefen sich die Ertragsunterschiede je nach Situation zwischen 13% und 60%. Schwieriger als die Ertragsunterschiede sind Auswirkungen von Trockenperioden auf den Nährwert zu bestimmen. Die oben erwähnten Indikatoren können die beobachteten Abweichungen der Nährwerte nicht erklären. So beeinflusst Trockenstress die Vegetation und deren Umgebung über verschiedene Prozesse, die sich in manchmal gegenläufiger Weise auf die Futterqualität auswirken. Wenn es jedoch zu keiner bedeutenden Veränderung der botanischen Zusammensetzung kommt, hat eine Trockenperiode einen viel geringeren Einfluss auf die Futterqualität als auf den Ertrag.

(Sonden: Decagon EC-5; Datenlogger: EM-50). 2013 und 2014 wurde das Wasserpotential mit Hilfe eines Tensiometers kontinuierlich aufgezeichnet (Watermark-Sensoren; Datenlogger: Irrrometer).

Die anderen für die Berechnung der Evapotranspiration erforderlichen meteorologischen Parameter (Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit) stammen von MeteoSchweiz-Messstationen (Standorte La Frêtaz, Chéserey und Coinsins) und von einer durch uns installierten mobilen Campbell-Anlage (Standort Bière).

Tab. 1 | Eigenschaften der Versuchsstandorte und Daten zu Trockenbehandlungen

Standort (Koord. NK)	Jahr	Höhe (m)	Vegetation	Verfahren ¹	n ²	Daten	Dauer (d)	Nutzung ³	Niedersch. (mm) ³	Temp. (°C) ⁴
Frêtaz 533'435 / 181'780	2012	1200	Dauerwiese	Kontrolle	4	25.05 – 30.08	96	3	355	14,3
			*	Stress			96	3	109	
Chésereux 501'930 / 139'550	2013	540	Dauerwiese	Kontrolle	3	20.06 – 16.08	58	2	257	19,0
			**	Stress			58	2	73	
Coinsins 507'160 / 141'630	2014	460	Kunstwiese	100%	3	23.04 – 30.07	99	3	248	15,8
			***	66%			99	3	162	
				33%			99	3	82	
Bière 517'115 / 145'500	2014	700	Kunstwiese	100%	3	06.05 – 07.08	94	3	311	15,6
			****	66%			94	3	209	
				33%			94	3	116	

* Wichtigste Arten: Wiesenrispengras, Gemeines Rispengras, Rotes Straussgras, Englisches Raigras, Wiesenschwingel, Knautgras, Weissklee.

** Wichtigste Arten: Englisches Raigras, Timotheegrass, Wiesenschwingel, Wiesenrispengras, Weissklee.

*** Wichtigste Arten: Englisches Raigras, Knautgras, Rotklee, Weissklee, Luzerne.

**** Wichtigste Arten: Englisches Raigras, Knautgras, Weissklee.

¹Kontrolle: natürliche Niederschläge (Regenwasser); Stress: keine Wasserzufuhr während des Beobachtungszeitraums; 100%, 66% und 33%: Wasserzufuhr im Vergleich zur Niederschlagsnorm; ²Anzahl Wiederholungen; ³Anzahl Nutzungen bzw. Niederschläge während des Trockenstresses; ⁴Tagesdurchschnittstemperatur.

Beschreibung der Intensität der Trockenheit

Es wurden drei Ansätze zur Evaluation der Intensität der Trockenheit verglichen. Der erste Ansatz stützt sich nur auf klimatische Parameter. Beim zweiten werden zusätzlich Bodenbedingungen (Berechnung der Wasserbilanz) berücksichtigt. Der dritte Ansatz kombiniert Parameter zu Klima, Boden und Vegetation.

1. In der Praxis wird oft die Differenz zwischen den effektiven Niederschlägen und der potenziellen Evapotranspiration berechnet (N–ETP). Die Referenz-Evapotranspiration (ET₀, nachfolgend ETP) kann mit Hilfe verschiedener Formeln geschätzt werden. Von der FAO wird die Formel von Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998) empfohlen, die gut an die Berechnung der ETP von Wiesen des Schweizer Mittellands geeignet ist (Calanca *et al.* 2011).

2. Der zweite Ansatz beruht auf der ziemlich engen Beziehung zwischen dem Ertrag einer Kultur und der Wassermenge, welche diese Kultur über Verdunstung abgibt. Ein Rückgang des Ertrags ist direkt proportional zur relativen Reduktion der Evapotranspiration (Doorenbos und Kassam 1979). Bei der Berechnung der Evapotranspiration wurde ein Korrekturfaktor (K_s) angewendet, welcher den Rückgang der Evapotranspiration berücksichtigt, wenn den Pflanzen weniger Wasser zur Verfügung steht. Die Einführung dieses Faktors hängt vom Zustand der Wasserreserven im Boden ab und erfordert eine vereinfachte Aufstellung der Wasserbilanz, für die wiederum die Art und Tiefe des Bodens bekannt sein muss. In den nachfolgend dargestellten Situationen wurde die Berechnung der Bodenfeuchtigkeit an die im Feld gemessenen Werte angepasst.

3. Der dritte Ansatz stützt sich ebenfalls auf die Entwicklung der Wasserreserven im Boden, berücksichtigt aber zusätzlich die Art der Vegetation. Sie beruht auf dem Verhältnis zwischen der verfügbaren Wassermenge (R) und dem Vorrat an Bodenwasser (auch nutzbare Feldkapazität [nFK] genannt), wobei R die Wassermenge bezeichnet, die für die Pflanzen am Tag *t* verfügbar ist und nFK den Anteil des Haftwassers, der von den Pflanzen genutzt werden kann. Die nFK wird ausgehend von Textur und Bodentiefe geschätzt. Das Verhältnis R/nFK, das zwischen 0 und 1 liegt, stellt also den Anteil des am Tag *t* nutzbaren Wassers dar. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass 50 bis 65 % der nFK für die Vegetation leicht zugänglich sind. Wenn das Verhältnis R/nFK unter einen bestimmten Schwellenwert sinkt (z.B. 0,5), hat die Kultur die leicht zugänglichen Wasserreserven aufgebraucht und tritt in einen Stresszustand. Die Summe der Tage mit R/nFK < Stressschwellenwert ist ein Mass für die Dauer des Stresszustands. Analog kann die Trockenstressintensität gemäss folgender Formel von Granier *et al.* (2007) berechnet werden:

$$\text{Stressintensität} = \sum (\text{Maximum} [0, (\text{Schwellenwert} - R/nFK) / \text{Schwellenwert}])$$

In dieser Studie wurde ein Schwellenwert von 0,50 für Bodenbedeckungen auf der Basis von Gräsern und Weissklee angewendet und von 0,40 für Bodenbedeckungen, die reich an Luzerne und Rotklee sind.

Ertragsmessungen

Bei jeder Ernte wurde das Futter zuerst gewogen und gemischt. Dann wurden zwei Proben entnommen: die

Tab. 2 | Parameter und Indikatoren zur Bewertung der Intensität der Trockenheit

Standort	Jahr	Verfahren	Bodentiefe ¹ (mm)	ETP – N ² (mm)	1 – (ET _a / ET _o) ³	Stressdauer _{WB} (d)	Stressintensität _{WB}
Frétaz	2012	Kontrolle	500	27	0,01	0	0
		Stress		-219	0,45	57	39
Chéserey	2013	Kontrolle	800	-15	0,03	0	0
		Stress		-199	0,45	29	11
Coinsins	2014	100	400	-44	0,06	0	0
		66		-130	0,28	15	2
		33		-210	0,49	57	19
Bière	2014	100	700 - 800	-8	0,02	0	0
		66		-110	0,22	40	4
		33		-203	0,39	64	16

¹Durchschnittliche Bodentiefe ²N: Niederschläge, ETP: Evapotranspiration; ³ET_a / ET_o: relative Abnahme der Evapotranspiration, mehr Details unter dem Kapitel «Material und Methoden».

erste zur Bestimmung der Trockensubstanz (TS) und die zweite für chemische Analysen. Der Ertrag an Biomasse wurde jeweils errechnet, indem die im betrachteten Zeitraum geernteten Mengen an Biomasse summiert wurden (Tab. 1). Der Ertragsunterschied entspricht der Differenz des Ertrags bei einer Trockenbehandlung im Vergleich zur Kontrolle:

$$\text{Ertragsunterschied} = [1 - (\text{Ertrag}_{\text{Trockenheit}} / \text{Ertrag}_{\text{Kontrolle}})]$$

Erhebungen der botanischen Arten

Die botanischen Erhebungen erfolgten mit der Punkt-Quadrat-Methode. Die dargestellten Ergebnisse wurden bei Beobachtungen am Ende der Trockenperioden gewonnen. 2012 wurden die Erhebungen in zwei Bereichen jeder Fläche mit Hilfe eines Rasters durchgeführt (insgesamt 100 Punkte). Ab 2013 wurden die botanischen Analysen entlang zweier Transekte vorgenommen

(40 Punkte pro Fläche von 4 m²). Für jede Fläche wurden die %-Anteile berechnet (Daget und Poissonet 1971).

Chemische Analysen

Der Gehalt an Rohprotein (RP), Zellwandbestandteilen (NDF und ADF) und Zuckern wurde mittels NIRS geschätzt. Der Gehalt an Mineralstoffen (P bzw. K) wurde nach Kalzinierung (550 °C) mit optischer Emissionsspektrometrie (ICP-OES) bestimmt. Der Gehalt an Nährstoffen über den gesamten betrachteten Zeitraum (je nach Standort zwei oder drei Nutzungen) wurden errechnet, indem der Gehalt jeder Ernte jeweils mit dem betreffenden Ertrag gewichtet wurde.

Statistische Analysen

Die statistische Auswertung der Erträge, der Nährstoff-Gehalte und des Anteils der Arten erfolgte mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (Wasserhaushalt). ➤

Tab. 3 | Ertrag während der Trockenperiode und Gehalt an Rohprotein (RP), Zellwandbestandteilen (ADF und NDF), löslichen Zuckern, Phosphor (P) und Kalium (K)

Standort	Verfahren	Ertrag (t/ha)	RP ¹ (g/kg TS)	ADF ¹ (g/kg TS)	NDF ¹ (g/kg TS)	Zucker ¹ (g/kg TS)	P ¹ (g/kg TS)	K ¹ (g/kg TS)
Frétaz	Kontrolle	4,80	198	255	446	93	4,3	34,7
	Stress	1,94	196	236	419	115	3,4	30,1
	LSD	1,00	ns	15,8	ns	15,9	0,35	1,90
Chéserey	Kontrolle	2,41	197	240	401	–	–	–
	Stress	1,43	192	248	407	–	–	–
	LSD	0,75	ns	ns	ns	–	–	–
Coinsins	100	4,72	194	274	367	120	–	–
	66	4,11	194	271	362	121	–	–
	33	2,92	182	265	358	125	–	–
	LSD	1,22	9,7	ns	ns	ns	–	–
Bière	100	5,77	204	237	341	121	–	–
	66	3,80	206	228	332	125	–	–
	33	2,50	208	220	325	138	–	–
	LSD	0,52	ns	ns	ns	12,2	–	–

¹Werte nach Gewichtung der verschiedenen Ernten mit dem jeweiligen Ertrag.

Werte mit signifikantem Unterschied sind fett dargestellt (P < 0,05); ns: 0,1 > P > 0,05; ns: nicht signifikant; '–' kein Wert.

Tab. 4 | Entwicklung der botanischen Artenzusammensetzung nach den wichtigsten Artengruppen während der Trockenperiode

Standort	Verfahren	Abgestorb. Pfl. (%)	Gräser ¹ (%)	Leguminosen ¹ (%)	Andere Pfl. ¹ (%)
Frêtaz	Kontrolle	2,3	66,7	19,3	14,0
	Stress	37,7	69,8	12,6	17,6
	<i>ppds</i>	5,4	<i>ns</i>	<i>ms</i>	<i>ns</i>
Chésereux	Kontrolle	0,7	63,8	4,9	31,3
	Stress	38,9	74,2	3,7	22,1
	LSD	9,2	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Coinsins	100	0,0	31,6	68,0	0,4
	66	0,0	30,4	69,7	0,0
	33	2,8	32,0	68,0	0,0
	LSD	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Bière	100	0,0	55,3	44,4	0,3
	66	0,0	56,4	43,6	0,0
	33	40,6	71,6	27,7	0,7
	LSD	3,2	12,0	11,3	<i>ns</i>

¹Für die Anteile der drei Gruppen wurden abgestorbene Pflanzen nicht berücksichtigt (nur grüne Pflanzenteile). Werte mit signifikantem Unterschied sind fett dargestellt ($P < 0,05$); *ms*: $0,1 > P > 0,05$; *ns*: nicht signifikant.

Der Test auf geringste signifikante Differenz (LSD) nach Fisher wurde verwendet, um die Durchschnitte miteinander zu vergleichen.

Resultate und Diskussion

Beschreibung der Intensität der Trockenheit

Die Indikatoren zur Beschreibung der Intensität der Trockenheit sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Erträge an den verschiedenen Standorten und bei den verschiedenen Behandlungen sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Unterschiede zwischen Trockenbehandlung(en) und Kontrolle bewegen sich zwischen 13 % und 60 %. Die grössten Ertragseinbußen wurden in La Frêtaz und Bière festgestellt, der geringste Unterschied in Coinsins bei der 66 %-Behandlung.

In den Abbildungen 1 bis 3 sind die Beziehungen zwischen den Indikatoren für Trockenstress und die relativen Ertragsunterschiede aufgeführt. Die Kriterien $N-ETP$ und $[1 - (ET_a / ET_b)]$ zeichnen insgesamt das gleiche Bild (Abb. 1 und 2), auch wenn sich die Klassifizierung der Situationen nach Stressniveau nicht vollständig deckt. In den Abbildungen 1 und 2 lassen sich Chésereux und Coinsins 33 % nicht unterscheiden: Die beiden Standorte zeigen dasselbe Stressniveau und dieselbe Reaktion, was vermuten lässt, dass sich die beiden Vegetationen gleich verhalten. Während die Reaktionen von Coinsins deutlich unter der Regressionsgeraden liegen, befinden sich die Werte für Bière oberhalb der Geraden. Diese Unterschiede stehen in Zusammenhang mit der Art der Bodenbedeckung: Die Wiese in Coinsins (hauptsächlich bestehend aus Luzerne und Rotklee) ist gegenüber Trockenheit resistenter als die Wiese in Bière (vorherrschend Englisch-Raigras und Weissklee). Der in Abbildung 3.1 dargestellte Zusammen-

hang ist viel enger ($R^2 = 0,71$) als in den zwei vorhergehenden Abbildungen, aufgrund der Berücksichtigung der Empfindlichkeit der Vegetation gegenüber Trockenheit. Der Standort Chésereux unterscheidet sich klar von Coinsins 33 % (gleiche Ertragsabweichung aber unterschiedliches Stressniveau) und scheint empfindlicher gegenüber Trockenheit zu sein, was sich bei den beiden vorhergehenden Indikatoren nicht feststellen lässt, die zu ungenau sind, um die Intensität der Behandlung zu widerspiegeln. Mit einem Wert von R^2 von 0,81 scheint der Indikator, der auf der Stressintensität basiert (Abb. 3.2) von den vier Indikatoren der aussagekräftigste zu sein. Einige Überlegungen wert ist jedoch die logarithmische Form der Beziehung: der Ertragsunterschied variiert mit ansteigender Stressintensität immer weniger. Bei einer Betrachtung dieses Indikators unterscheidet sich La Frêtaz sehr deutlich von den anderen Standorten hinsichtlich der Stressintensität. Mit absteigender Stressintensität folgen die Standorte Coinsins 33 % und Bière 33 %, dann Chésereux, Bière 66 % und schliesslich Coinsins 66 %.

Einfluss der Trockenheit auf den Nährwert

In den Tabellen 3 und 4 ist die Entwicklung des Nährstoffgehalts beziehungsweise der botanischen Zusammensetzung dargestellt. Diese Parameter können nicht mit Hilfe der oben dargestellten Stressindikatoren analysiert werden, weil die Auswirkungen der Trockenheit auf den Nährwert oft antagonistisch sind und von Fall zu Fall diskutiert werden müssen.

In La Frêtaz war der Rückgang von Weissklee marginal signifikant ($0,10 > P > 0,05$) und fast 40 % der Vegetation war von der Alterung (Seneszenz) betroffen. Hinsichtlich des Nährwerts war der Gehalt an Lignocellulose (ADF) bei der Trockenheitsbehandlung signifikant tiefer,

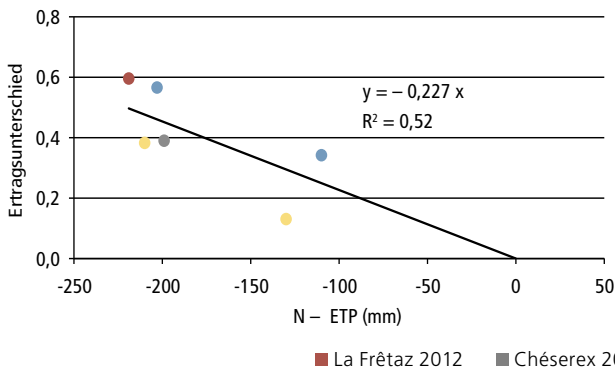


Abb. 1 | Beziehung zwischen Wasserdefizit und relativer Ertrags- einbusse.

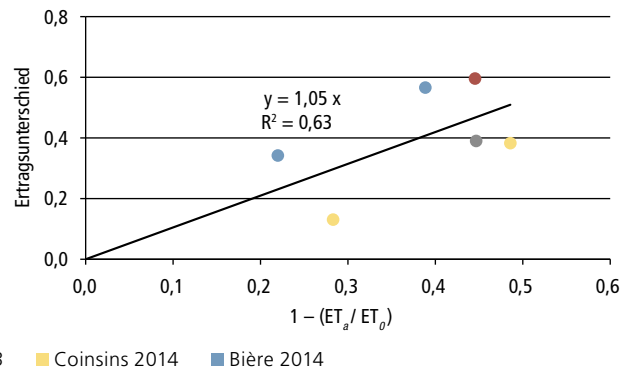


Abb. 2 | Beziehung zwischen relativem Evapotranspirationsrück- gang und relativer Ertragseinbusse.

was wahrscheinlich auf den erhöhten Gehalt an löslichen Zuckern zurückzuführen ist. Dieser Anstieg erzeugt eine passive Verringerung der Konzentrationen der anderen Nährstoffe, namentlich der Zellwandbestandteile (ADF und NDF). Eine schwere Trockenheit kann eine Verminderung des Nährwerts zur Folge haben, insbesondere durch eine frühzeitige Alterung der Pflanzen (oder der Pflanzenteile, die am nährstoffreichsten sind, wie die Blätter), was eine Umlagerung der Zucker und des RP in die bodenständigen Pflanzenteile auslöst (Buxton 1996). Für La Frêtaz haben wir im gesamten berücksichtigten Zeitraum (Zyklen 2 bis 4; 96 Tage) keine Verminderung des Nährwerts beobachtet. Der RP-Gehalt war jedoch bei der vierten Nutzung im Falle der Trockenheitsbehandlung im Vergleich zur Kontrolle deutlich tiefer (nicht präsentierte Daten, $P < 0,001$). Diese Abweichung ganz am Ende des Beobachtungszeitraums ist in Tabelle 3 nicht aufgeführt, in der jeweils der mit dem Ertrag gewichtete Gehalt präsentiert ist.

In Chésèrèx wurde keine Veränderung der botanischen Artenzusammensetzung festgestellt und der Gehalt an Nährstoffen wurde durch die Trockenheitsbehandlung nicht beeinflusst. Die einzige Auswirkung

betraf die Bildung von abgestorbenen Pflanzenteilen. Auch in Coinsins blieb die Artenzusammensetzung unverändert mit einem geringen Anteil abgestorbener Pflanzenteile. Wegen dem hohen Anteil von Leguminosen (beinahe 70 %) könnte die ausgeprägte Trockenheitsbehandlung (33 %) die Fixierung von atmosphärischem Stickstoff beeinträchtigt haben, was eine deutliche Abnahme des RP-Gehalts zur Folge hatte. Küchenmeister *et al.* (2013) stellten fest, dass Trockenstress die Fixierung von atmosphärischem Stickstoff stärker einschränkt als das Wachstum der Leguminosen.

In Bière ging bei der stärksten Trockenheitsbehandlung (33 %) der Anteil des Weissklee zugunsten der Gräser zurück. Die Bildung abgestorbener Pflanzenteile war erheblich (etwa 40 %) und der Gehalt an Zuckern höher als bei den anderen Behandlungen. Die zunehmende Stressintensität (Trockenbehandlung 100 % bis 33 %) bewirkte tendenziell eine Erhöhung des RP-Gehalts und eine Senkung des Gehalts an ADF. Die gut mit Wasser versorgten Wiesen weisen oft einen etwas tieferen Nährwert auf als Wiesen mit Wasserdefizit (Mosi- mann *et al.* 2013; Grant *et al.* 2014). Dieser Unterschied kann mit einem Verdünnungseffekt erklärt werden

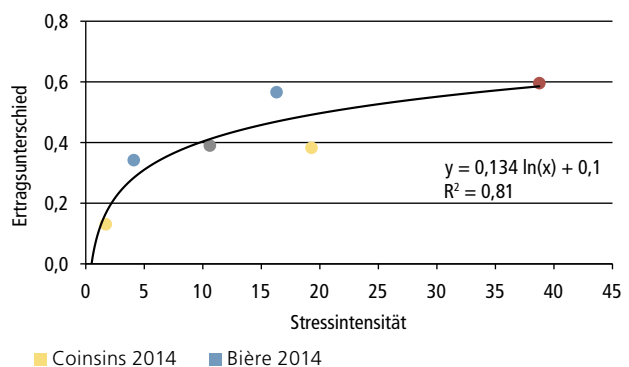
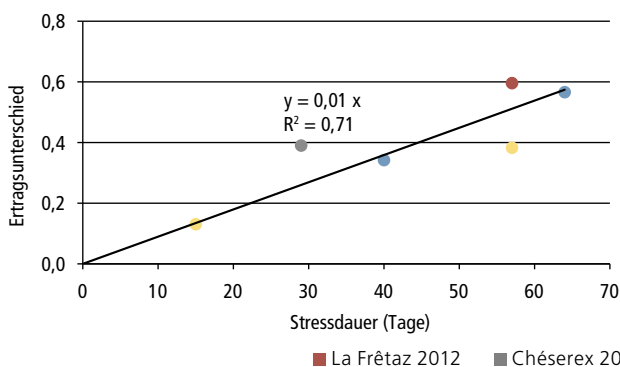


Abb. 3.1 und 3.2 | Indikatoren auf der Grundlage der Wasserbilanz bei Berücksichtigung eines für die Art der Vegetation spezifischen Schwellenwerts für den Stress.

Der Stressschwellenwert (Abbildung 3.1 und 3.2) wurde bei 0,5 für La Frêtaz, Chésèrèx und Bière festgelegt und bei 0,4 für Coinsins (gegenüber Trockenheit resistenzere Vegetation mit Luzerne und Rotklee). Genauere Informationen finden sich im Kapitel «Material und Methoden».

(Lemaire und Gastal 1997). So geht die Bildung von Biomasse im Rahmen der ontogenetischen Entwicklung der Pflanzen einher mit einer Abnahme der Stickstoffkonzentrationen. Während ihres Wachstums investieren Pflanzen eher in (relativ stickstoffarmes) Material zum Aufbau der Pflanzenstruktur, auf Kosten des stickstoffreichen Zytoplasmas. Durch den hemmenden Einfluss von Trockenstress auf das Pflanzenwachstum wird auch der Verdünnungseffekt gebremst.

Insgesamt decken sich diese Ergebnisse mit jenen von Dumont *et al.* (2015): Bei Trockenheit steigt tendenziell der RP-Gehalt (in der erwähnten Studie um durchschnittlich 5%), während der Gehalt an Zellwandbestandteilen (NDF) eher abnimmt (um durchschnittlich 3%).

Die wichtigsten beobachteten Veränderungen bezüglich der Artenzusammensetzung betrafen den Weissklee. Der Rückgang dieser Art war bei drei der vier Standorte nur vorübergehend. In La Frêtaz hielt die geringere Häufigkeit des Weissklee jedoch bis zum Beginn der folgenden Vegetationsperiode an. Da der Anteil von Weissklee relativ beschränkt ist (10 bis 20% der Vegetation), hatten die in La Frêtaz beobachteten Beiträge wahrscheinlich nur wenig Einfluss auf den Nährwert des Futters.

Schlussfolgerungen und Perspektiven

Es besteht ein grosses Interesse an Indikatoren, mit denen sich die Intensität von Trockenheitsereignissen bewerten lässt. Mit diesen Indikatoren können die Behandlungen und Versuche verglichen und Erklärungen für den Umfang der Ertragseinbussen gesucht werden. Indikatoren, welche Parameter zu Klima, Boden und Vegetation kombinieren, scheinen für die Analyse

der Reaktionen am aussagekräftigsten zu sein. Ein Teil der Schwankungen lässt sich aber auch damit nicht erklären.

In Bezug auf den Nährwert ist es schwierig, eine klare Aussage zu machen. Wassermangel beeinflusst die Vegetation oder ihr Umfeld über vielfältige Prozesse, die sich nur bedingt isoliert betrachten lassen: physiologische Reaktionen (zum Beispiel Rückgang der Fixierung von atmosphärischem Stickstoff), Effekte im Zusammenhang mit der ontogenetischen Entwicklung der Pflanzen, Verschiebungen der Anteile verschiedener Nährstoffe (passive Entwicklung der Konzentrationen), Veränderungen der botanischen Zusammensetzung und/oder auch eine eingeschränkte Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden. Um die Reaktionen auf Trockenheit besser zu verstehen, ist es unerlässlich, die Bedeutung dieser verschiedenen Prozesse besser zu identifizieren. Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf sehr kurzfristige Reaktionen auf punktuelle Ereignisse, die zwar intensiv, aber zeitlich sehr begrenzt sind. Die scheinbare Stabilität der botanischen Artenzusammensetzung muss im Rahmen von Versuchen mit wiederholten Trockenheitsbedingungen bestätigt werden (über mehrere Jahre aufeinanderfolgende Ereignisse).

Zu den Hauptaufgaben der Forschung gehört es nicht nur, Referenzen verfügbar zu machen, sondern auch Indikatoren bereitzustellen, mit denen die Reaktionen von Pflanzengesellschaften auf Trockenstress abgeschätzt werden können. Dazu ist ein ganzheitlicher Ansatz mit einer engen Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen (Agronomie, Ökophysiologie, Ökologie der Lebensgemeinschaften, Bioklimatologie) wichtig. Dies ist auch ein Hauptziel des Projekts von GrassAlt (<http://p3.snf.ch/Project-156282>), mit dem 2015 begonnen wurde. ■

Literatur

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & Smith M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. Rome, FAO.
- Buxton D. R. & Casler M. D., 1993. Environmental and genetic effects on cell wall composition and digestibility. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (Ed. H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield & J. Ralph). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Buxton D. R. & Fales S. L., 1994. Plant environment and quality. In: Forage quality, evaluation and utilization (G. C. Jr. Fahay, M. Collins, D. R. Mertens & L. E. Moser). ASA, CSSA & SSSA, Lincoln, NE.
- Buxton D. R., 1996. Quality-related characteristics of forages as influenced by plant. *Anim. Feed Sci. Tech.* 59, 37–49.
- Calanca P., Smith P., Holzkamper A. & Ammann C., 2011. Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. *Agrarforschung Schweiz* 2, 176–183.
- Daget P. & Poissonet J., 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. *Annales Agronomiques* 22, 5–41.
- Doorenbos J. & Kassam A. H., 1979. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 33. Rome, FAO.
- Dumont B., Andueza D., Niderkorn V., Lüscher A., Porqueddu C. & Picon-Cochard C., 2015. A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass Forage Sci.* 70, 239–254.
- Gilgen A. K. & Buchmann N., 2009. Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. *Biogeosciences* 6, 2525–2539.
- Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I. A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Bernhoger P., Bernhofer C. et al. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 123–145.
- Grant K., Kreyling J., Dienstbach L. F. H., Beierkuhnlein C. & Jentsch A., 2014. Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 11–22.
- Halim R. A., Buxton D. R., Hattendorf M. J. & Carlson R. E., 1989. Water-Stress Effects on Alfalfa Forage Quality after Adjustment for Maturity Differences. *Agron. J.* 81, 189–194.
- Jensen K. B., Waldron B. L., Peel M. D. & Robins J. G., 2010. Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass Forage Sci.* 65, 92–101.
- Küchenmeister K., Küchenmeister F., Kayser M., Wrage-Mönnig N. & Isselstein J., 2013. Influence of drought stress on nutritive value of perennial forage legumes. *Int. J. Plant Prod.* 7, 693–710.
- Lemaire G. & Gastal F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis on the nitrogen status in crops (Ed. G. Lemaire). Springer-Verlag, Heidelberg, 3–43.
- Lemaire G. & Pflimlin A., 2007. Les sécheresses passées et à venir: quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers? *Fourrages* 190, 163–180.
- Meisser M., Deléglise C., Mosimann E., Signarbioux C., Mills R., Schlegel P., Buttler A. & Jeangros B., 2013. Auswirkungen einer ausgeprägten Sommertrockenperiode auf eine montane Dauerweide im Jura. *Agrarforschung Schweiz* 4, 476–483.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Das Futterpotenzial der Jura-weiden. *Agrarforschung Schweiz* 3, 516–523.
- Mosimann E., Deléglise C., Demenga M., Frund D., Sinaj S. & Charles R., 2013. Wasserverfügbarkeit und Futterproduktion im Ackerbaugesbiet. *Agrarforschung Schweiz* 4, 468–475.
- Vicca S., Gilgen A. K., Serrano M. C., Dreessen F. E., Dukes J. S., Estiarte M., Gray S. B., Guidolotti G., Hoepfner S. S., Leakey A. D. B., Ogaya R., Ort D. R., Ostrogovic M. Z., Rambal S., Sardans J., Schmitt M., Siebers M., van der Linden L., van Straaten O. & Granier A., 2012. Urgent need for a common metric to make precipitation manipulation experiments comparable. *New Phytologist*, 195, 518–522.
- Vogel A., Scherer-Lorenzen M. & Weigelt A., 2012. Grassland Resistance and Resilience after Drought Depends on Management Intensity and Species Richness. *PLoS ONE* 7, e36992. doi:10.1371/journal.pone.0036992.

Riassunto**Eventi di siccità: caratteristiche ed effetti sui servizi agronomici dei prati**

Il paragone di eventi di siccità (simulati o naturali) richiede criteri comuni che riflettano lo stress «percepito» dalle piante. Questo studio valuta la pertinenza di diversi indici per esprimere il grado di severità dei periodi di deficit idrico. Le riflessioni relative agli indici si basano sui risultati dei test di siccità (simulazioni sotto serre a tunnel) condotti da Agroscope tra il 2012 e il 2014 su prati intensivi situati tra i 470 e i 1200 metri di altitudine. Gli indici basati sui soli parametri climatici non sono adatti a descrivere l'intensità di un trattamento di siccità. Il deficit teorico ($P - ETP$), ad esempio, non permette di esprimere l'intensità dello stress «percepito» dalle piante, in quanto non considera le relazioni tra la vegetazione e il suolo. Gli indici basati sull'acqua disponibile nel suolo si rivelano più pertinenti e consentono di spiegare meglio gli scarti di resa tra gli appezzamenti esposti a siccità e quelli debitamente riforniti d'acqua. Nell'ambito dei nostri test, gli scarti di resa sono oscillati dal 13 al 60 %, a seconda delle situazioni.

Gli effetti della siccità sul valore nutritivo sono più difficili da determinare rispetto agli effetti sulla resa. Gli indici summenzionati non permettono di spiegare le variazioni osservate nel valore nutritivo. Lo stress idrico, infatti, influisce sulla vegetazione o il suo ambiente tramite processi che talvolta agiscono in maniera contrastante sulla qualità del foraggio. Nonostante ciò, in assenza di un cambiamento di rilievo della composizione botanica, la siccità si ripercuote molto meno sulla qualità del foraggio che sulla resa.

Summary**Drought events: characterisation and effects on grassland agronomic services**

The comparison of drought events requires common criteria reflecting the stress 'experienced' by plants. This study evaluates the relevance of different indices for the characterization of the intensity of drought stress. The reflections concerning the indices are based on the results of drought trials (simulations with rain-out shelters) conducted by Agroscope between 2012 and 2014 on intensively managed grasslands situated at an altitude of between 470 and 1200 m. The indices based solely on climatic parameters are inadequate for describing the intensity of a drought treatment. The balance between evapotranspiration and precipitation ($P - ETP$), for example, does not permit us to characterise the intensity of the stress 'experienced' by plants, since it does not take into account the relationships between vegetation and soil. The indices based on the ratio between the actual water reserve in soil and the available water capacity are more relevant, and allow a better explanation of the yield gap between the plots exposed to drought and those properly supplied with water. In our trials, the yield gaps varied between 13 % and 60 %, depending on the situation.

The effects of drought on the nutritive value are more difficult to pinpoint than the effects of drought on yield. The aforementioned indices do not permit an explanation of the observed variations in nutritional value. Drought affects vegetation and/or the environment via different processes, which may influence in an antagonistic way the quality of the forage. Despite this, in the absence of a major change in botanic composition, drought has much less impact on the quality of forage than on yield.

Key words: drought stress, plant available water, precipitation manipulation experiments, grassland, nutritive value.