

Simulation des Graswachstums und der Erträge auf Wiesen und Weiden durch ModVege

Alexandre Bittar¹, Marco Meisser¹, Eric Mosimann^{1,3} und Pierluigi Calanca²

¹Agroscope, 1260 Nyon, Schweiz

²Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

³Parc Jura vaudois, 1188 St-George

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



Die Wachstumsdaten, die dazu dienen die Zuverlässigkeit des Modells bei der Einschätzung des Graswachstums zu prüfen, stammen aus einem Versuchsnetz mit Graslandflächen, die verschiedenen Bedingungen bezüglich der Wasserversorgung ausgesetzt wurden. (Foto: Agroscope)

Einleitung

In den letzten Jahren wurde die Futterproduktion wiederholt durch klimatische Extremereignisse beeinträchtigt, beispielsweise durch die Trockenheit von 2015, die zu bedeutenden Einbußen vor allem im Jura führte. Wegen der klimatischen Schwankungen und des Ziels, die Bewirtschaftung von Weiden zu optimieren, werden Werkzeuge für die Entscheidungsfindung immer wichtiger. Im Ausland wurden in diese Richtung bereits zahlreiche Anstrengungen unternommen. In Frankreich beispielsweise liefert das System ISOP (Suivi Objectif des Prairies) auf der Grundlage von Simulationen mit dem Modell STICS-Prairies betriebsrelevante Schätzungen zum Ertrag von Wiesen auf regionaler Ebene (Ruget *et al.* 2006). Die Schweiz verfügt bisher noch nicht über eine solche für die Bewirtschaftung von Graslandflächen nützliche Plattform.

Die Einschätzung des Graswachstums ist die Grundlage für die Bewirtschaftung von Weiden. Bei der Wahl des Simulationsmodells müssen verschiedene Kriterien

berücksichtigt werden: biologische und physikalische Grundsätze, die den Beziehungen zwischen Pflanzen und Boden zugrunde liegen; eine auf das Notwendige reduzierte mathematische Komplexität; ein leichter Zugriff auf Parameter und Daten; die einfache Anwendung im operationellen Betrieb. Ein Modell wie STICS (Brisson *et al.* 2008) bietet Vorteile auf konzeptueller Ebene, ist für den Anwender wegen der Komplexität jedoch anspruchsvoll. Bei der Prüfung der Möglichkeit, ein System zur Entscheidungsfindung für die Schweiz zu entwickeln, orientierte sich die Wahl aus diesem Grund an einem Modell mit einfacherer Struktur. ModVege, ein am INRA von Jouven *et al.* (2006a und 2006b) entwickeltes Modell, entspricht diesen Kriterien. Es beschreibt mit einem Minimum an Gleichungen das Graswachstum für vier verschiedene Typen von Grasland, von Wiesen mit früher phänologischer Entwicklung und einer hohen akkumulierten stehenden Biomasse bis zu weniger produktiven Wiesen mit später phänologischer Entwick-

lung (Cruz *et al.* 2002). Die Standard-Version des Modells wurde unter Verwendung von Daten aus einem Versuchspartellen-Netz von Agroscope (Mosimann 2005; Mosimann *et al.* 2012) getestet (Calanca *et al.* 2016). Anschliessend wurden die simulierten Ergebnisse mit den in den Feldversuchen gemessenen Werten verglichen. In diesem Artikel werden die Ergebnisse und erzielten Verbesserungen kurz umrissen. Schliesslich wird die Einrichtung einer Plattform zur Analyse und Vorhersage des Graswachstums vorgeschlagen.

Funktionsweise von ModVege

In Abbildung 1 ist eine Übersicht zur Struktur des Modells wiedergegeben. Das Modell umfasst verschiedene Parameter, welche die Vegetationsart und den Boden (Feuchtigkeit und Nährstoffzustand) beschreiben, sowie Eingabevariablen, zu denen tägliche meteorologische Daten und die Nutzungen zählen. Das Wachstum wird in Tages-Zeitschritten simuliert, wobei die Schwankungen der Biomasse von vier strukturellen Kompartimenten einbezogen werden: grüne Blätter und Blattscheiden, grüne Stängel und Blüten, abgestorbene Blätter und Blattscheiden, abgestorbene Stängel und Blüten. Die Biomasse der grünen Kompartimente wird über die Differenz zwischen Wachstum und Seneszenz berechnet, wobei eine empirische Funktion verwendet wird, um die reproduktive Wachstumsphase zu bestimmen.

Das potentielle Wachstum hängt von der Sonneneinstrahlung und der Blattoberfläche ab. Zusätzlich berücksichtigt die Simulation verschiedene Limitierungen im Zusammenhang mit klimatischen Bedingungen sowie dem Wasserhaushalt und der Fruchtbarkeit des Bodens. Für Situationen mit Trockenstress haben wir den bisherigen Ansatz von Joven *et al.* (2006a) durch den Ansatz von Allen *et al.* (1998) ersetzt, bei dem ein kritischer Wert für die Bodenfeuchtigkeit als Funktion der potenziellen Evapotranspiration festgelegt ist, bei dessen Unterschreitung das Wachstum immer stärker eingeschränkt ist. Der Verlust an Biomasse geht auf die Seneszenz und Abszission zurück, wobei die Alterung aufgrund der gegenwärtigen Biomasse, der Temperatur und des Alters der Bodenbedeckung beschrieben wird.

Eine der grössten Einschränkungen von ModVege besteht darin, dass nur das Wachstum der oberirdischen Biomasse simuliert wird. Die Wechselwirkung zwischen den oberirdischen Teilen und dem Wurzelhorizont wird vom Modell ebenso wenig berücksichtigt wie saisonale Einflüsse auf diese Entwicklung. Diese Beziehungen sind wichtig, weil sie die Wasserreserven und die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden beeinflussen können.

Zusammenfassung

Eine Vorhersage des Graswachstums wäre sehr nützlich, um die Beweidung zu steuern oder den optimalen Erntezeitpunkt für Mähwiesen zu bestimmen. Das Simulationsmodell ModVege wurde mittels einer repräsentativen Auswahl von 125 Situationen (Wiese × Jahr × Bewirtschaftung), die aus Beobachtungen bei Graslandflächen in der Schweiz stammen, getestet und verbessert. Der Vergleich der simulierten mit den gemessenen Werten zeigt, dass das Modell in der Mehrzahl der Situationen relativ zuverlässig ist. Abweichungen wurden bei längeren Trockenperioden festgestellt. Es ist vorgesehen, die Simulationen mittelfristig über die Plattform Agrometeo zur Verfügung zu stellen.

Simulationen

ModVege wurde aufgrund von Ertragsdaten im Jura, die zwischen 2014 und 2016 erhoben wurden, bei insgesamt 125 Situationen (Wiese × Jahr × Bewirtschaftung) getestet (Vuffray *et al.* 2017; Bossuyt *et al.* 2018). Diese Daten stammen aus Versuchen, in denen die Auswirkungen der Bewirtschaftung (Zeitpunkt und Häufigkeit von Schnitten) auf das Wachstum von Kunst- und Dauerwiesen unter verschiedenen Wasserversorgungsbedingungen untersucht wurden. Die Möglichkeiten und Grenzen des Modells werden nachfolgend mit Hilfe einiger Beispiele aufgezeigt. Bei den numerischen Simulationen der einzelnen Versuche wurden die botanischen Merkmale und die Bodeneigenschaften der verschiedenen Wiesen berücksichtigt.

Die Qualität der numerischen Simulationen wurde anhand von drei statistischen Kennzahlen geprüft: der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient (r ; Hedderich und Sachs 2016), der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (NSC; Nash

Tab. 1. | Mittelwerte \pm Standardabweichung von drei statistischen Kennzahlen zur Güte des Modells bezüglich der Simulation des täglichen Wachstums ($\text{kg TS ha}^{-1} \text{Tag}^{-1}$). DW: Dauerwiesen; KW: Kunstwiesen.

Häufigkeit der Nutzung (Bewirtschaftung)	Wiesenart	r (Spearman)	NSC	WIA
7–8 Nutzungen/Jahr (Weiden)	DW	0,83 \pm 0,08	0,72 \pm 0,17	0,76 \pm 0,08
	KW	0,64 \pm 0,32	0,74 \pm 0,14	0,75 \pm 0,08
4–5 Nutzungen/Jahr (Mähwiesen)	DW	0,76 \pm 0,15	0,06 \pm 1,10	0,66 \pm 0,18
	KW	0,72 \pm 0,18	-0,53 \pm 1,36	0,56 \pm 0,20

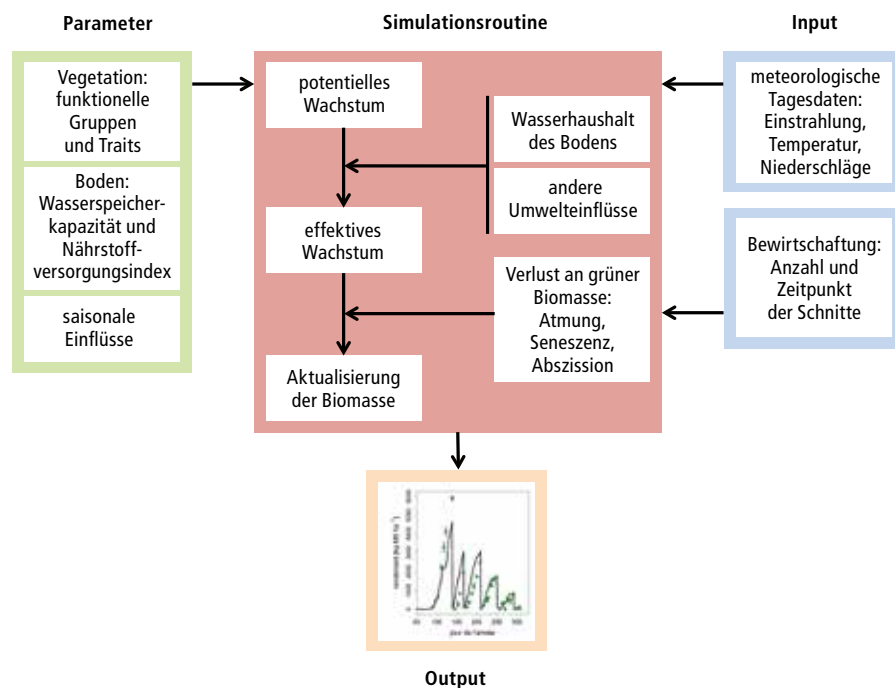


Abb. 1 | Schema zur Funktionsweise von ModVege, mit der Festlegung der Parameter (links), der Eingabe der meteorologischen Daten und der Bewirtschaftung (rechts), der Simulationsroutine (in der Mitte) und der Ausgabe (unten).

und Sutcliffe 1970) und der Übereinstimmungsindex von Willmott (Willmott Index of Agreement oder WIA; Willmott 1984 und Willmott *et al.* 2012). Ohne genauer auf Details einzugehen, ergibt der Rangkorrelationskoeffizient eine Schätzung zur Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Werten, wenn die Werte nach ihrem Rang geordnet werden. Der zweite Koeffizient liefert eine Schätzung zur Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten im Verhältnis zur Abweichung der Messungen von ihrem Mittelwert. Die dritte Kennzahl schliesslich widerspiegelt die mittlere absolute Abweichung zwischen den Messungen und den simulierten Werten. Die Simulation des Modells wird als zufriedenstellend bewertet, wenn $r > 0,6$, $NSC > 0,5$ und $WIA > 0,6$ (Jamieson *et al.* 1991).

Resultate

Nutzungshäufigkeit und Wiesenarten

Mit Ausnahme des NSC für die Bewirtschaftung «Mähwiese» zeigen die in Tabelle 1 aufgeführten Werte für r , NSC und WIA, dass das Modell zuverlässige Prognosen liefert, wobei sich die Qualität der Simulationen in den Standardabweichungen widerspiegelt. Bei den Simulationen für Mähwiesen beträgt die mittlere relative Abweichung der Jahreserträge 2016 für Dauerwiesen 6 % und für Kunstwiesen 13 %. Aus diesen Ergebnissen lässt

sich schliessen, dass die Qualität der Simulationen je nach Situation unterschiedlich ausfällt, insbesondere je nach Nutzungshäufigkeit und Wiesenart (Dauerwiesen gegenüber Kunstwiesen).

Die Ergebnisse in Tabelle 1 werden mit zunehmender Nutzungshäufigkeit zufriedenstellender. Bei sieben bis acht Nutzungen pro Jahr (Bewirtschaftung «Weide») ist die Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Simulationen im Allgemeinen besser als bei vier bis fünf Nutzungen (Bewirtschaftung «Mähwiese»), insbesondere bezüglich des NSC. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass die Anzahl der pro Standort/Jahr verfügbaren Stichproben bei der Bewirtschaftung «Mähwiese» gemäss Definition geringer ist (vier bis fünf Schnitte pro Jahr) als bei der Bewirtschaftung «Weide» (etwa acht Nutzungen pro Jahr), wodurch die statistischen Kennzahlen im ersten Fall weniger robust sind.

Bei den Wiesenarten zeigt Tabelle 1, dass das Modell für Dauerwiesen etwas zuverlässigere Prognosen liefert als für Kunstwiesen. Diese Ergebnisse entsprechen insofern den Erwartungen, als das Modell für intensiv genutzte Dauerwiesen entwickelt wurde (Jouven *et al.* 2006a).

Situationen mit Trockenheit

Calanca *et al.* (2016) haben darauf hingewiesen, dass ModVege das Wachstum unter Bedingungen länger anhaltender Trockenheit mangelhaft simuliert. Um

das Problem aufzuzeigen, wurden zwei Simulationen durchgeführt, eine 2016 am Standort Bière (Dauerwiese, fünf Schnitte/Jahr, gute Stickstoffversorgung, 150 mm Wasserspeicherkapazität), die andere 2015 am Standort Carrouge (Kunstwiese, vier Schnitte/Jahr, geringere Stickstoffversorgung, 125 mm Wasserspeicherkapazität). In der Westschweiz lagen in beiden Jahren die Niederschläge im Sommer unter dem Durchschnitt, wobei das Defizit 2015 ausgeprägter war als 2016.

Die Simulation des Wasserhaushalts des Bodens für den Standort Bière zeigt, dass die Niederschläge 2016 bis Ende Juni ausreichen (Abb. 2A und 2B, Tag 180), um die Verluste durch Evapotranspiration auszugleichen. In den Monaten Juli und August lag das nutzbare Bodenwasser nahe beim kritischen Wert, ohne dass das Wachstum dadurch deutlich beeinträchtigt wurde. Erst im September erreichte der Trockenstress ein bedeutendes Ausmass. In dieser Situation überschätzt das Modell die Auswirkungen des Trockenstresses auf das Wachstum (Abb. 2D). Weil der Schnitt jedoch beim vierten, wenig produktiven Aufwuchs erfolgte, hatte dies kaum Auswirkungen auf die Simulation der stehenden Biomasse (Abb. 2C). Die Kennzahlen zur Übereinstimmung zeigen eine sehr treffende Einschätzung durch ModVege (Abb. 2C und 2D, oben rechts).

Die Situation war 2015 am Standort Carrouge völlig unterschiedlich. Die geringen Niederschläge des Monats Mai führten bereits Ende Frühling zu einer starken Reduktion des nutzbaren Bodenwassers (Abb. 3A und 3B). Im Juni und Juli (Tage 150 bis 220) lag das verfügbare Bodenwasser ständig unter dem kritischen Wert. Diese Trockenperiode trat nach dem zweiten Schnitt auf (Abb. 3C), zu einem Zeitpunkt, der einen grösseren Einfluss auf das Wachstum hat. ModVege berücksichtigt nur die oberirdischen Teile der Pflanzenbedeckung, namentlich den Blattflächenindex, der zu diesem Zeitpunkt sehr gering war. Deshalb prognostiziert das Modell einen Wachstumsstopp von Juli bis August (Abb. 3D). Zum Zeitpunkt des dritten Schnitts beträgt der berechnete Ertrag nahezu Null, während die Messungen im Versuch im Bereich von 1500 kg TS ha⁻¹ lagen (Abb. 3D). In dieser Situation sind die Kennzahlen zur Übereinstimmung folglich unbefriedigend.

Ausblick

Diese Arbeit bestätigt, dass sich ModVege zur Schätzung des Wachstums und der Erträge von Wiesen und Weiden in der Schweiz eignet. Insgesamt ergaben die verwendeten Daten relativ gute Kennzahlen zur Übereinstimmung

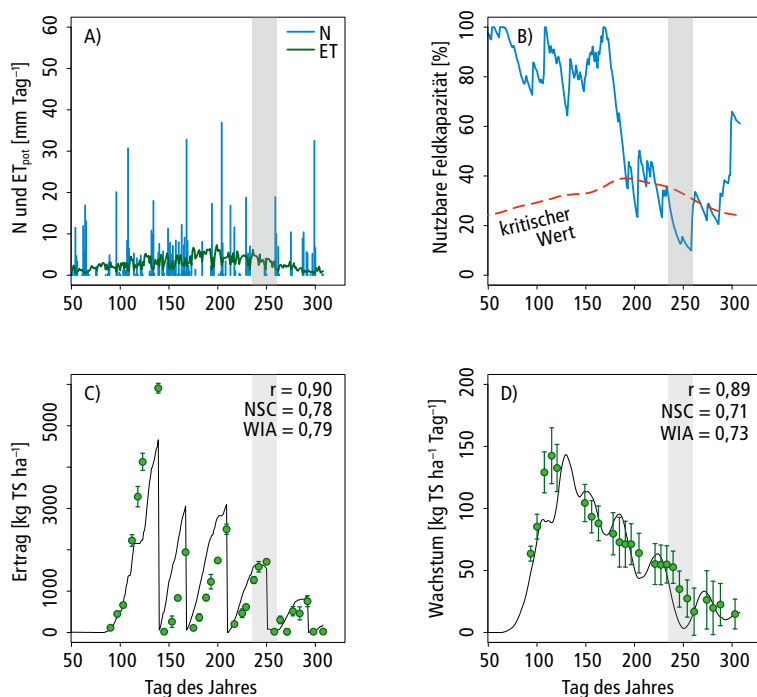


Abb. 2 | Jahresverlauf von A) Niederschlag (N) und potentieller Verdunstung (ET_{pot}), B) simulierter nutzbarer Feldkapazität, im Vergleich zum entsprechenden kritischen Wert, C) beobachtetem (Punkte mit Fehlerbalken) und simuliertem (Linie) Ertrag, und D) beobachtetem (Punkte mit Fehlerbalken) und simuliertem Wachstum (Linie) am Standort Bière, 2016. Statistische Kennzahlen zur Güte der Simulation sind in C) und D) angegeben. Der graue Band hebt die Zeit des Auftretens von Wasserstress in der Simulation hervor.

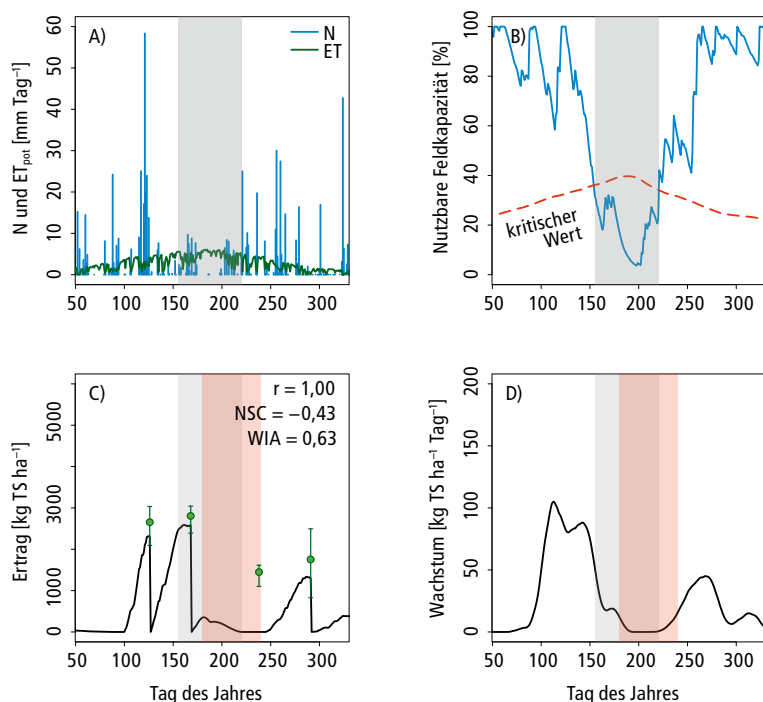


Abb. 3 | Wie Abb. 2, aber für die Simulation am Standort Carrouge, 2015. Dazu zeigt der rote Band die Zeit, in welcher in der Simulation kein Wachstum stattfand.

(Tab. 1). Zu beachten ist allerdings, dass die botanische Zusammensetzung, Eigenschaften des Bodens und die vorgesehene Nutzung für die Anwendung des Modells und für zuverlässige Ergebnisse bekannt sein müssen.

Die Schwierigkeiten bei der Erfassung von Situationen mit Trockenstress und bei der Prognose der Auswirkungen auf das Wachstum können unserer Ansicht nach nicht einfach mit einer Anpassung der Parameterwerte oder der mathematischen Formel gelöst werden, die den Trockenstress aufgrund der Verfügbarkeit des Wassers im Boden beschreibt (Calanca *et al.* 2016). Vielmehr müsste der Ansatz selbst geprüft werden und zwar auf der Grundlage neuer Erkenntnisse.

Bezüglich Anwendungspotenzial von ModVege wurden verschiedene Verbesserungen eingeführt. Dazu gehören die Berechnung der phänologischen Entwicklung und die Simulation der Schneedecke im Winter und Frühling (damit die Anwendung auf höher liegende Gebiete erweitert werden kann). Wir haben ausserdem eine systematische Behandlung der Fehlerfortpflanzung eingeführt, mit der die Ausbreitung der Unsicherheiten in den Parameterwerten und den Eingabevariablen quantifiziert werden kann. Im Hinblick auf einen operationellen Einsatz des Modells planen wir auch die Integration meteorologischer Prognosen, um das Graswachstum einige Wochen vorherzusagen. Die Verwendung kurzfristiger

Prognosen ist bereits Bestandteil verschiedener Werkzeuge zur Entscheidungsfindung (siehe die Plattform <http://www.agrometeo.ch>).

Schlussfolgerungen

Trotz bestehender Einschränkungen bietet das auf ModVege basierende System zur Analyse und Vorhersage des Graswachstums den Produzenten nützliche Informationen, mit denen sie die Bewirtschaftung des Graslands besser planen können. Aus diesem Grund wird gegenwärtig an der Entwicklung einer Oberfläche auf der Plattform Agrometeo gearbeitet.

Letztlich wird sich jedoch die Nützlichkeit eines solchen Systems zur Entscheidungsfindung bei der Zusammenarbeit mit den Produzenten erweisen und es werden sich in diesem Rahmen kontinuierliche Verbesserungen umsetzen lassen. Gegenwärtig werden die Bemühungen fortgesetzt, die klimatischen Daten, den Nährwert, die botanische Zusammensetzung und die phänologische Entwicklung miteinander in Beziehung zu setzen, mit dem Ziel diese verschiedenen Parameter in einem möglichst umfassenden Werkzeug zu integrieren. Auf dem Weg zu diesem Ziel ist die Modellierung des Graswachstums eine wichtige erste Etappe. ■

Riassunto**Simulazione della crescita dell'erba e delle rese dei pascoli con ModVege**

La previsione della crescita dell'erba potrebbe avverarsi molto utile per gestire i pascoli o decidere del momento migliore per il raccolto dei prati da sfalcio. Il modello ModVege è stato testato e migliorato in base a un campione di 125 situazioni (prato × anno × gestione) raccolto in Svizzera. I confronti tra i valori simulati e quelli misurati evidenziano risultati relativamente affidabili nella maggior parte dei casi. I problemi riscontrati insorgono durante i periodi di siccità prolungata. A medio termine si prevede di diffondere le simulazioni sulla piattaforma Agrometeo.

Summary**Simulation of grass growth and pasture yields with ModVege**

Predicting grass growth could be very useful for the management of pastures, or deciding the best time to harvest hay meadows. The ModVege model was tested and improved using a set of 125 situations (meadow × year × management) collected from grassland areas in Switzerland. Comparisons between simulated and measured data show relatively reliable outputs in a majority of situations. However, the results were less satisfying during periods of prolonged drought. In the medium term, it is planned to disseminate the simulations via the Agrometeo platform.

Key words: grassland management, grass growth, simulation model, decision support system.

Literatur

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage n° 56. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 300 p.
- Bossuyt N., Wirthner J., Dussoulier C., Frund D., Meisser M., Ampuero Kragten S. & Mosimann E., 2018. Wann sollten intensiv genutzte Wiesen gemäht werden? *Agrarforschung Schweiz* 9 (1), 12–19.
- Brisson N., Launay M., Mary B. & N. Beaudoin (eds.), 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quæ, INRA, Versailles Cedex, 297 p.
- 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 Research* 187, 12–23.
- Cruz P., Duru M., Therond O., Theau J. P., Ducourtieux C., Jouany C., Al Haj Khaled R. & Ansquer P., 2002. Une nouvelle approche pour caractériser les prairies naturelles et leur valeur d'usage. *Fourrages* 172, 335–354.
- Hedderich J. & Sachs L., 2016. Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Spektrum, Berlin & Heidelberg, 968 p.
- Jamieson P. D., Porter J. R. & Wilson D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27, 337–350.
- Jouven M., Carrère P. & Baumont R., 2006a. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass Forage Science* 61, 112–124.
- Jouven M., Carrère P. & Baumont R., 2006b. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation. *Grass Forage Science* 61, 125–133.
- Mosimann E., 2005. Caractéristiques des pâturages pour vaches laitières dans l'ouest de la Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 37 (3), 99–106.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Das Futterpotenzial der Juraweiden. *Agrarforschung Schweiz* 3, 516–523.
- Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282–290.
- Ruget F., Novak S. & Granger S., 2006. Adaptation du modèle STICS à la prairie. Mise en œuvre dans le système ISOP (Informations et Suivi Objectif des Prairies) pour l'estimation de la production fourragère française. *Fourrages* 186, 241–256.
- Vuffray Z., Deléglise C., Schori F., Glauser W., Calanca P., Meisser M., Frund D., Stévenin L., Bittar A. & Mosimann E., 2017. Typologie der Produktion von Weiden. *Agrarforschung Schweiz* 8 (11+12), 428–437.
- Willmott C. J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 184–194.
- Willmott C. J., Robeson S. M. & Matsuura K., 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32, 2088–2094.