

Untersuchungen zur Aktualisierung der Futterbewertung im Futtermittellabor Rosenau

Teil 2a: Ergebnisse zur Verdaulichkeit und Energiebewertung von Wiesenfutter auf Basis einer Meta-Analyse spezifischer Verdauungsversuche an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Investigations into updating the feed evaluation in feedstuff laboratory of Rosenau

Part 2a: Results of digestibility and energy evaluation of grass forage based on meta-analysis of specific digestibility trials at AREC Raumberg-Gumpenstein

Leonhard Gruber^{1,2*}, Thomas Guggenberger¹, Stefanie Gappmaier¹, Georg Terler¹, Anton Schauer¹ und Julia Wöber²

Zusammenfassung

Die Verdaulichkeit der organischen Masse (dOM) entscheidet in einem hohen Ausmaß über die Energiekonzentration eines Futtermittels und ist daher Ausgangspunkt und Basis für deren Berechnung. In einem Futtermittellabor mit einem hohen Durchsatz an sehr unterschiedlichen und größtenteils aus der landwirtschaftlichen Praxis stammenden Proben ist die Bestimmung bzw. Abschätzung der dOM eine gewisse Schwierigkeit. Verdauungsversuche *in vivo* kommen auf Grund des dafür erforderlichen hohen Kosten- und Zeit-Aufwandes nicht in Frage, auch Verdaulichkeitsuntersuchungen mit *in vitro*-Methoden erscheinen aus Kosten- und Zeit-Gründen nicht in der erforderlichen großen Anzahl durchführbar. Daher werden üblicherweise Verdauungskoeffizienten aus Futterwert-Tabellen herangezogen (z. B. DLG Futterwerttabellen Wiederkäuer 1997). In der vorliegenden Arbeit werden daher auf Basis einer Meta-Analyse von spezifischen *in vivo*-Verdauungsversuchen von Wiesenfutter aus dem österreichischen Grünlandgebiet der Einfluss des Vegetationsstadiums und der Konservierung auf den Gehalt und die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und Gerüstsubstanzen sowie die Zusammenhänge zu *in vitro*-Verdaulichkeit und Energiekonzentration beschrieben und die Ergebnisse mit Angaben in Futterwerttabellen verglichen.

Für die Meta-Analyse wurden die Daten (n = 331) aus vier umfangreichen, mehrfaktoriellen und spezifischen Projekten an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein herangezogen, in denen in erster Linie der Einfluss des Vegetationsstadiums von Dauerwiesen-Futter auf Futterwert, Futteraufnahme und tierische Leistung langfristig untersucht wurde (GRUBER et al. 1995, 1996, 2000, 2006). Neben Konservierungsform (Grünfutter, Silage, Heu) und Aufwuchs (1. Aufwuchs, Folgeaufwüchse) stellte sich wie erwartet das Vegetationsstadium als der wichtigste Einflussfaktor auf Verdaulichkeit und Energiekonzentration heraus. Zwischen der Rohfaser und den Gerüstsubstanzen (NDF, ADF, ADL) bestehen sehr enge, lineare Beziehungen. Mit den Gerüstsubstanzen konnte die Verdaulichkeit der OM nicht genauer vorausgesagt werden als mit Rohfaser. Dennoch steht außer Frage, dass nur mit der Detergenzien-Analyse (bes. NDF) eine genaue Trennung in Faser- und Nichtfaser-Kohlenhydrate erfolgen kann, was für die Ernährung der Wiederkäuer von großer physiologischer Bedeutung ist. Die Verdauungsversuche zeigen, dass die Verdaulichkeit der Gerüstsubstanzen zu einem großen Teil über die Verdaulichkeit der OM und damit die Energiekonzentration entscheidet ($R^2 > 86\%$). Aus dem Datenmaterial, das einen sehr großen Streubereich hinsichtlich des Gehaltes an Gerüstsubstanzen (536 ± 73 , $323 - 706$ g NDF/kg TM) und damit Verdaulichkeit aufweist ($66,5 \pm 7,2$; $48,4 - 85,6\%$ dOM), wurden auch Gleichungen zur Schätzung der Verdaulichkeit der Rohnährstoffe sowie von NDF und NFC abgeleitet, die als Grundlage der Energiebewertung dienen können. Es wird aber empfohlen, die Energiebewertung im Futtermittellabor Rosenau künftig auf der Grundlage der *in vitro*-Verdaulichkeit (neben der Analyse der Rohnährstoffe und Gerüstsubstanzen) durchzuführen, weil damit die individuell bedingte Verdaulichkeit mitberücksichtigt werden kann, während die (wie bisher) aus Futterwerttabellen oder einer Meta-Analyse abgeleiteten Regressions-

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Nutztierforschung, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

² Universität für Bodenkultur, Institut für Nutztierwissenschaften, Gregor Mendelstraße 33, A-1180 Wien

* Ansprechpartner: Univ.-Doz. Dr. Leonhard Gruber, email: Dr.Leonhard.Gruber@gmx.at

gleichungen nur eine durchschnittliche Beziehung zwischen Gerüstsubstanzen und Verdaulichkeit in Abhängigkeit vom Gehalt an Faser (XF, NDF, ADF oder ADL) darstellen können. In einer Übersichtsarbeit haben PÖTSCH und RESCH (2005) darauf hingewiesen, dass sowohl die Nutzung und Düngung des Grünlandes als auch der Standort und Pflanzenbestand den Ertrag und die Qualität des Grünlandfutters bestimmen, wobei zwischen diesen Faktoren vielseitige Wechselwirkungen bestehen. Wie eine umfangreiche Analyse und Validierung von sechs Futtermittel-Tabellenwerken aus der Literatur zeigt (DLG, DDR, INRA, RAP, ÖAG, Rosenau), muss bei Anwendung dieser Tabellenwerke außerdem mit einer systematischen Abweichung der jeweiligen Probe vom Tabellenwert gerechnet werden (durch den Fehler in Folge Bias und Regression). Unter „Bias“ ist eine grundsätzliche, systematisch bedingte Differenz zwischen tatsächlichem und berechnetem Wert zu verstehen. Und ein durch „Regression“ bedingter Fehler sagt aus, dass die Anwendung des Tabellenwertes zu einer Unter- oder Überschätzung der Verdaulichkeit in den äußeren Bereichen der Werte führt, d. h. in den unteren und bzw. oder oberen Bereichen des Verdaulichkeitsspektrums.

An den in der vorliegenden Untersuchung *in vivo* geprüften Futtermitteln wurden auch die *in vitro*-Methoden „Hohenheimer Futterwert-Test“ (MENKE und STEINGASS 1988; HFT) und „Enzymlöslichkeit“ (DE BOEVER et al. 1988; ELOS) angewendet und die Schätzgleichungen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE 1998 und 2008) an den *in vivo* ermittelten Werten validiert. Beide *in vitro*-Verdaulichkeitsmethoden erwiesen sich dabei als gleichwertig. Die Gleichungen von GfE (2008) stellen gegenüber GfE (1998) eine Verbesserung dar. Die Gegenüberstellung von „Observed“ vs. „Predicted“ ergab für die HFT-Formel ein R^2 von 72,9 % und einen Schätzfehler von $\pm 0,50$ MJ ME im Vergleich zur ELOS-Schätzformel mit einem R^2 von 70,8 % und einem Schätzfehler von $\pm 0,52$ MJ ME. Aus dem Datenmaterial der vorliegenden Untersuchung wurden auch Gleichungen zur Schätzung der Verdaulichkeit der OM (dOM) und der Energiekonzentration (ME) abgeleitet. Dabei ergaben sich hinsichtlich Schätzgenauigkeit leichte Vorteile von ELOS gegenüber HFT (im Mittel der insgesamt 16 Formeln 4,65 % vs. 4,07 % RMSE%, Root Mean Square Error relativ zum Mittelwert). Ebenso konnte ME genauer geschätzt werden als dOM (4,19 % vs. 4,42 % RMSE%). Neben den Rohnährstoffen (XP, XL, XA) wurden auch die Faserstoffe (XF, NDF, ADF oder ADL) zur Schätzung herangezogen, die sich ebenfalls als nahezu gleichwertig erwiesen (4,57 %, 4,53 %, 4,40 %, 4,40 %). Die Schätzformel zur Bestimmung der ME auf Basis von ELOS als *in vitro*-Parameter sowie von ADL als Faser-Komponente erbrachte das beste statistische Resultat ($R^2 = 87,4$ %, RMSE = $\pm 0,34$ MJ ME).

Schlagwörter: Grünlandfutter, Dauerwiese, Verdaulichkeit, Energiekonzentration, *in vitro*-Verdaulichkeit, Futterwerttabellen

Summary

The digestibility of organic matter (dOM) decides about the energy concentration of a feedstuff to a high degree and is therefore the starting point for its calculation. The determination or estimation of dOM can be a certain challenge in a feedstuff laboratory characterized by many and often very diverse samples and coming from practical farms to a high extent. Due to the high expenditure for costs and time, *in vivo* digestibility trials cannot be considered and of the same reasons *in vitro* digestibility methods are not feasible for a great number of samples. As a consequence, digestibility coefficients from feed tables usually are used. Therefore, the impact of the growth stage and conservation method on the content and the digestibility of crude nutrients and cell walls as well as the relationship to *in vitro* digestibility and energy concentration are described in the present paper and compared to feed tables data of literature, based on a meta-analysis of specific *in vivo* digestibility trials of grass forage in Austria.

The meta-analysis was carried out using the data ($n = 331$) of four extensive, multifactorial and specific research projects undertaken at the Federal Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein in Austria. In these experiments, the impact of growth stage of forage in natural permanent grassland was investigated specifically with regard to feed value, feed intake and animal performance in the long term (GRUBER et al. 1995, 1996, 2000, 2006). Apart from conservation method (fresh grass, silage, hay) and growth (first growth, regrowths), the growth stage was the predominant factor influencing digestibility and energy concentration, as expected. Between crude fibre and the cell wall substances (NDF, ADF, ADL) there are existing very close and linear relationships. Based on cell wall substances the digestibility could not be better predicted than with crude fibre. On the other hand, it is out of question that only the detergent analysis allows the accurate

partition into fibre and non-fibre carbohydrates what is of great physiological importance in ruminant nutrition. The digestibility trials show that the digestibility of cell wall substances determines the digestibility of OM, and therefore the energy concentration to a great extent ($R^2 > 86\%$). From the data which are characterized by a wide range regarding the content of cell wall substances (536 ± 73 , $323 - 706$ g NDF/kg DM) and therefore digestibility (66.5 ± 7.2 , $48.4 - 85.6$ % dOM), equations were derived in order to estimate the digestibility of crude nutrients as well as NDF and NFC. So, they could be the basis for energy evaluation. However, it is recommended to carry out the energy evaluation in the feedstuff laboratory of Rosenau based on *in vitro* digestibility (apart from analysis of crude nutrients and cell wall substances) in future, so that the individually caused digestibility of a certain feedstuff can be accounted for. On the other hand, using equations based on feed value tables (as done before) or results from meta-analyses would represent only average relationships between cell wall substances (XF, NDF, ADF or ADL) and digestibility. In a comprehensive review, PÖTSCH und RESCH (2005) have shown that both the intensity of utilisation and fertilisation as well as site and plant community determine the yield and quality of permanent grassland forage whereby there are miscellaneous interactions between these factors. A substantial analysis and evaluation of six frequently used feed tables from literature (DLG, DDR, INRA, RAP, ÖAG, Rosenau) has demonstrated that a user of these feed tables has to anticipate some systematic deviation of the sample from the table value (this deviation is caused by so-called bias and regression). A "bias" is indicated by a general and systematically caused difference between the observed and predicted value. And a deviation caused by "regression" reveals that the application of the feed table leads to an under- or overestimation of digestibility at the exterior ranges of the digestibility spectrum.

In the present study, all forage samples ($n = 331$) were investigated both by *in vivo* digestibility trials and also by two *in vitro* digestibility methods, namely "Hohenheim Gas Test" (MENKE and STEINGASS 1988; HFT) and "Cellulase-Test" (DE BOEVER et al. 1988; ELOS). Furthermore, the regression equations published by the German Society of Nutrition Physiology (GfE 1998 and 2008) formulated to predict the ME content of grass forages were evaluated with regard to the *in vivo* data. Both *in vitro* digestibility methods turned out to be equivalent. The equations of GfE (2008) achieved better results compared to GfE (1998). The comparison of "observed" vs. "predicted" data resulted in a R^2 of 72.9% and a Root mean square error (RMSE) of ± 0.50 MJ ME for HFT compared to R^2 of 70.8% and a RMSE of ± 0.52 MJ ME for ELOS. From the present data, regression equations for estimating dOM and ME were modelled considering also the effect of conservation method and growth. In this case, ELOS achieved slightly better results than HFT (on average as a mean of 16 equations 4.65% vs. 4.07% RMSE%, RMSE relative to Mean). Similarly, ME could be estimated more accurately than dOM (4.19% vs. 4.42% RMSE%). Additionally to crude nutrients (XP, XL, XA), the cell wall substances were also used for estimation (XF, NDF, ADF or ADL) which proved to be more or less equivalent (4.57%, 4.53%, 4.40%, 4.40%). The equation estimating ME and using ELOS as *in vitro* parameter as well as ADL as fibre component yielded the best statistical result ($R^2 = 87.4\%$, $RMSE = \pm 0.34$ MJ ME).

Keywords: grass forage, natural permanent grassland, digestibility, energy concentration, *in vitro* digestibility, feed composition tables

1. Einleitung und Problemstellung

Die Verdaulichkeit der organischen Masse (dOM) bzw. der Energie (dE) entscheidet in hohem Ausmaß über die Energiekonzentration eines Futtermittels und ist daher ein wesentlicher Bestandteil von Regressionsgleichungen zur Schätzung der Energiekonzentration, d. h. des Gehaltes an umsetzbarer Energie (MJ ME/kg TM) (SCHIEMANN et al. 1971, INRA 1989, CSIRO 1990 und 2007, AFRC 1993, GfE 1995 und 2001, NRC 2001, NorFor 2011, SAUVANT und NOZIÈRE 2016). *Abbildung 1* (oben) zeigt, dass im Durchschnitt etwa 33 % der Bruttoenergie (GE) eines Futtermittels aus Wiesenfutter über den Kot (FE) ausgeschieden werden, was einen Gehalt von 12,0 MJ an verdaulicher Energie (DE) ergibt. Von der DE werden im Durchschnitt 23 % über den Harn (UE) und über Methan (CH_4 E) ausgeschieden, woraus sich ein Gehalt von 9,2 MJ ME errechnet (Durchschnittswerte von Wiesenfutter des vorliegenden Datenmaterials, pro kg TM). Die ME steht dem Organismus für Erhaltung und verschiedene Leistungsfunktionen zur Verfügung (Milch, Ansatz, Wachstum, Trächtigkeit, Bewegung etc.), wobei als Verlust Wärme entsteht. Im Falle von Milchleistung erscheint nur etwa 30 % der im Futtermittel enthaltenen GE im Produkt (5,4 MJ NEL). In *Abbildung 1* (unten) ist dargestellt, dass die Verdaulichkeit der OM (organische Masse) tatsächlich in einem sehr hohen Maß die Energiekonzentration bestimmt ($R^2 = 97,0$ %, $RSD = \pm 0,17$ MJ ME). Eine Verdaulichkeit von 50 % führt zu einem ME-Gehalt von 6,8 MJ und eine Verdaulichkeit von 85 %

ergibt 11,4 MJ ME/kg TM. In einigen Energiebewertungssystemen wird die ME nicht direkt aus der verdaulichen OM bzw. den verdaulichen Rohnährstoffen geschätzt, sondern vorerst die verdauliche Energie (DE). Die dE ist sehr eng mit der dOM korreliert (Abbildung 1 unten). Das Verhältnis dE/dOM ist abhängig vom Futtermittel (INRA 1989, vorliegende Untersuchung), sehr häufig wird jedoch von einer allgemeinen und konstanten Beziehung von dE/dOM über alle Futtermittel ausgegangen (CSIRO 1990 und 2007, AFRC 1993). In der Folge wird die ME aus dem Verhältnis ME/DE berechnet (INRA 1989, CSIRO 1990) bzw. die Energieverluste über Harn und Methan (UE und CH₄E) separat geschätzt und von der DE abgezogen (SAUVANT und NOZIÈRE 2016). Die Unterschiede zwischen den Energiebewertungssystemen verschiedener Länder sind ausführlich bei VAN DER HONING und STEG (1990) beschrieben.

Für ein Futtermittellabor (wie z. B. das Futtermittellabor Rosenau der Landwirtschaftskammer NÖ) mit einem hohen Durchsatz an zu analysierenden Proben – vorwiegend aus Praxisbetrieben – stellt sich die Frage, auf welche Art und Weise die energetische Bewertung der teils sehr unterschiedlichen Futterproben erfolgen soll. Verdauungsversuche *in vivo* kommen auf Grund des dafür erforderlichen hohen Kosten- und Zeit-Aufwandes nicht in Frage, auch Verdaulichkeitsuntersuchungen mit *in vitro*-Methoden erscheinen aus Kosten- und Zeit-Gründen nicht in der erforderlich großen Anzahl durchführbar. Daher werden üblicher Weise Verdauungskoeffizienten aus Futterwert-Tabellen herangezogen. Im Futtermittellabor Rosenau wurden in den ersten Jahren (1979 – 1991) die Verdaulichkeiten des DDR-Futterbewertungssystems zur Berechnung des Energiegehaltes verwendet (Autorenkollektiv BEYER et al. 1977), ab dem Jahr 1991 dienten die Verdaulichkeiten aus den DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer (Universität Hohenheim – Dokumentationsstelle 1991 und 1997) als Grundlage, wobei die Berechnung und Interpolation der Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe auf Basis einer linearen Regression zwischen dem Gehalt an Rohfaser und der Verdaulichkeit erfolgte (GRUBER et al.

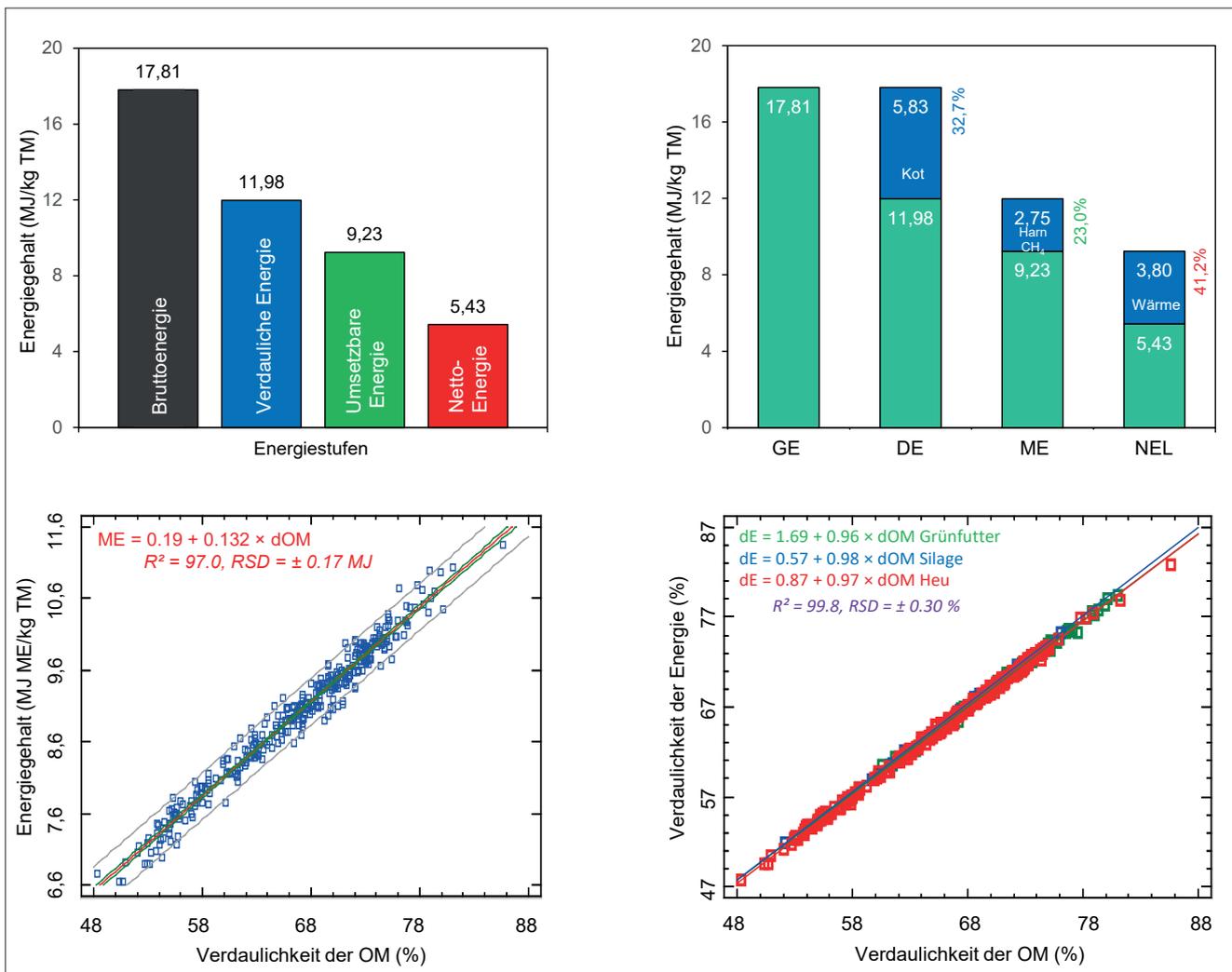


Abbildung 1: Unterschiedliche Energiestufen eines Futtermittels im Stoffwechsel (Mittelwerte des vorliegenden Datenmaterials – Wiesenfutter unterschiedlicher Vegetationsstadien und Konservierungsformen)

1991 und 1997). Der Gehalt an ME und NEL wurde immer mit den jeweils aktuellen Gleichungen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie berechnet (basierend auf SCHIEMANN et al. 1971 bzw. GfE 1995).

Bei dieser Vorgangsweise wird also davon ausgegangen, dass ausschließlich der Rohfasergehalt über das Vegetationsstadium des Wiesenfutters und damit über die Verdaulichkeit entscheidet. Unterschiede in der botanischen Zusammensetzung des Wiesenfutters und die Qualität der Konservierung können bei diesem Vorgehen nicht berücksichtigt werden. Weiters stellte sich immer die Frage, inwieweit die Angaben in den DLG-Futterwerttabellen für das artenreiche Wiesenfutter des Dauergrünlandes, besonders aus dem österreichischen Berggebiet, zutreffen. Zusätzlich ist zu bedenken, dass die Rohfaser nicht die Gesamtheit der Gerüstsubstanzen erfasst, sondern die Hemizellulose und auch Teile des Lignins beim Säure- und Laugen-Kochprozess im Zuge der Rohfaser-Analyse nach dem Weender-Verfahren in Lösung gehen und die Rohfaser somit nicht den am besten geeigneten Parameter zur Beschreibung des Vegetationsstadiums darstellt (VAN SOEST 1994).

In der vorliegenden Arbeit werden daher, auf Basis einer Meta-Analyse von spezifischen *in vivo*-Verdauungsversuchen von Wiesenfutter aus dem österreichischen Grünlandgebiet, der Einfluss des Vegetationsstadiums und der Konservierung auf den Gehalt und die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und Gerüstsubstanzen sowie die Zusammenhänge zu *in vitro*-Verdaulichkeit und Energiekonzentration beschrieben und die Ergebnisse mit Angaben in Futterwerttabellen verglichen.

2. Material und Methoden

2.1 Herkunft der Daten, Analyse von Futter und Kot, Verdauungsversuche mit Hammeln

Für die Meta-Analyse wurden die Daten aus vier umfangreichen, mehrfaktoriellen und spezifischen Projekten an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein herangezogen, in denen in erster Linie der Einfluss des Vegetationsstadiums von Dauerwiesen-Futter auf Futterwert, Futteraufnahme und tierische Leistung langfristig untersucht wurde (GRUBER et al. 1995, 1996, 2000, 2006). Nähere Angaben zu den Versuchen können den jeweiligen Publikationen entnommen werden.

Die Gehalte an Rohprotein (XP; Methode 4.1.1), Rohfett (XL; Methode 5.1.1), Rohfaser (XF; Methode 6.1.1), Rohasche (XA, Methode 8.1), Neutral-Detergenzien-Faser nach Amylasebehandlung und Veraschung (aNDFom; Methode 6.5.1), Säure-Detergenzien-Faser nach Veraschung (ADFom; Methode 6.5.2) sowie Säure-Detergenzien-Lignin (ADL; Methode 6.5.3) wurden nach den Methoden des VDLUFA (2012) ermittelt. Die Bestimmung der Gasbildung (Hohenheimer Futterwerttest, HFT) nach Methode 25.1 sowie der Enzymlöslichkeit (ELOS) nach Methode 6.6.1 erfolgte ebenfalls nach VDLUFA (2012). Der N-Gehalt des Kotes wurde in der frischen Probe untersucht, um die bei der Trocknung entstehenden Verluste zu vermeiden.

Die Verdaulichkeit *in vivo* mit Hammeln wurde nach den Leitlinien der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (GfE 1991) für die Bestimmung der Verdaulichkeit von Rohnährstoffen festgestellt (14 Tage Vorperiode und 14 Tage Sammelperiode, Futterniveau ca. 1 kg TM Versuchsration pro Tag, 4 Tiere pro Futtermittel). Damit wurde der Erhaltungsbedarf im Durchschnitt zu $94,3 \pm 0,08$ % gedeckt (101, 94, 89 % bei Grünfutter, Silage und Heu, 100 und 91 % bei Wiesenfutter 1. bzw. ≥ 2 . Aufwuchs). Die Tiere erhielten ausreichend Mineralstoffe (Ca, P, Mg, Na sowie Spurenelemente). Wasser stand den Tieren *ad libitum* zur Verfügung. Weitere methodische Hinweise zur Durchführung von *in vivo*-Verdauungsversuchen finden sich bei COCHRAN und GALYEAN (1994) sowie RYMER (2000).

Die statistische Auswertung wurde mit dem Programm Statgraphics 19 (2020) durchgeführt. Die Daten ($n = 331$) wurden mit der Prozedur GLM als Meta-Analyse unter Ausschaltung des zufälligen Einflusses des Versuches und der Berücksichtigung der fixen Effekte von Konservierung (Grünfutter, Silage, Heu) und Aufwuchs (1, 1.6, 2, ≥ 3 bzw. 1, 1.6, ≥ 2) ausgewertet (ST-PIERE 2001). Eine deskriptive Statistik wesentlicher Kriterien (Gehalt, Verdaulichkeit, Energiekonzentration) ist in *Tabelle 1* angeführt.

Wie auf Grund der Fragestellung in den einzelnen Versuchen zu erwarten war, sind die Daten durch eine große Streuung in den wesentlichen Kriterien gekennzeichnet (Gehalt an Rohprotein (141 ± 32 , von 77 bis 230 g XP/kg TM) und Gehalt an Faser (536 ± 73 , von 323 bis 706 g NDF/kg TM) sowie deren Verdaulichkeit ($64,9 \pm 7,5$, von 40,7 bis 80,6 % dXP; $65,0 \pm 8,6$, von 44,0 bis 84,9 % dNDF) und Energiekonzentration ($9,0 \pm 1,0$, von 6,7 bis 11,3 MJ ME/kg TM)). Dies ist auch an den hohen Varianzkoeffizienten (VK%) der angeführten Kriterien zu erkennen (22, 14, 8, 9 und 11 % für XP, NDF, dXP, dNDF und ME). Auch die *Abbildungen 2, 3 und 4* (Häufigkeitsdiagramme inklusive Parameter der deskriptiven Statistik) vermitteln einen Eindruck über den großen Streuungsbereich des vorliegenden Datenmaterials hinsichtlich des Gehaltes an Rohnährstoffen, Gerüstsubstanzen und Nichtfaser-Kohlenhydraten sowie deren Verdaulichkeit und die *in vivo* bzw. *in vitro* ermittelte Energiekonzentration, das sich somit zur Ableitung von sachlichen Zusammenhängen mit Hilfe der Regressionsmethodik sehr gut eignet.

Tabelle 1: Deskriptive Statistik wesentlicher Versuchs-kriterien (n = 331)

Kriterium	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Mittelw.	± s	VK (%)	Min	Max
Gehalt an Nährstoffen										
XP	g/kg TM	124	143	133	170	141	32	22,4	77	230
XL	g/kg TM	26	21	22	21	22	4	19,5	12	41
XF	g/kg TM	300	270	285	283	283	41	14,5	150	388
XX	g/kg TM	458	470	447	416	447	31	6,9	349	548
XA	g/kg TM	92	96	113	110	107	20	18,6	54	211
CHO	g/kg TM	758	741	732	699	730	47	6,4	594	844
NDF	g/kg TM	549	519	525	579	536	73	13,7	323	706
ADF	g/kg TM	341	309	317	337	322	44	13,6	170	428
ADL	g/kg TM	41	34	40	42	39	9	23,5	15	72
HEM	g/kg TM	207	210	208	242	215	37	17,1	127	301
ZEL	g/kg TM	301	275	277	295	283	37	13,2	140	382
NFC	g/kg TM	209	222	207	120	194	55	28,6	41	375
Verdaulichkeit der Nährstoffe und Energiekonzentration										
dXP	%	58,6	63,5	64,0	71,9	64,9	7,5	11,5	40,7	80,6
dXL	%	40,0	28,8	30,2	22,6	29,4	13,5	46,0	-17,4	64,2
dXF	%	63,0	66,6	63,9	73,2	66,2	8,5	12,8	46,0	86,5
dXX	%	67,2	70,0	67,3	71,9	68,8	7,8	11,3	48,4	94,7
dCHO	%	65,6	69,0	66,0	72,5	67,9	7,8	11,5	47,7	92,3
dNDF	%	63,0	66,1	61,9	72,5	65,0	8,6	13,3	44,0	84,9
dADF	%	61,2	63,2	58,6	69,0	61,9	8,9	14,5	38,6	81,7
dADL	%	-9,5	-18,8	-18,9	-7,2	-15,7	17,7	-112,6	-73,5	28,3
dHEM	%	65,6	70,0	67,0	77,1	69,5	8,8	12,7	44,6	89,2
dZEL	%	70,1	73,2	69,3	79,6	72,2	9,5	13,1	45,2	91,9
dNFC	%	71,0	74,2	76,1	69,1	73,8	10,5	14,2	16,4	100,0
dTM	%	61,0	64,8	60,5	68,6	63,0	6,9	10,9	46,8	77,5
dOM	%	64,0	67,2	64,9	71,2	66,5	7,2	10,8	48,4	85,6
dE	%	63,0	66,0	63,9	70,1	65,5	7,0	10,7	47,8	82,8
ME <i>in vivo</i> (GfE 2001)	MJ/ kg TM	8,81	9,16	8,68	9,57	8,97	0,96	10,7	6,66	11,34
Gasb.HFT	ml/200 mg TM	42,8	42,1	39,1	41,6	40,6	5,0	12,2	24,8	52,0
ELOS	g/kg TM	579	584	576	582	579	70	12,0	415	771

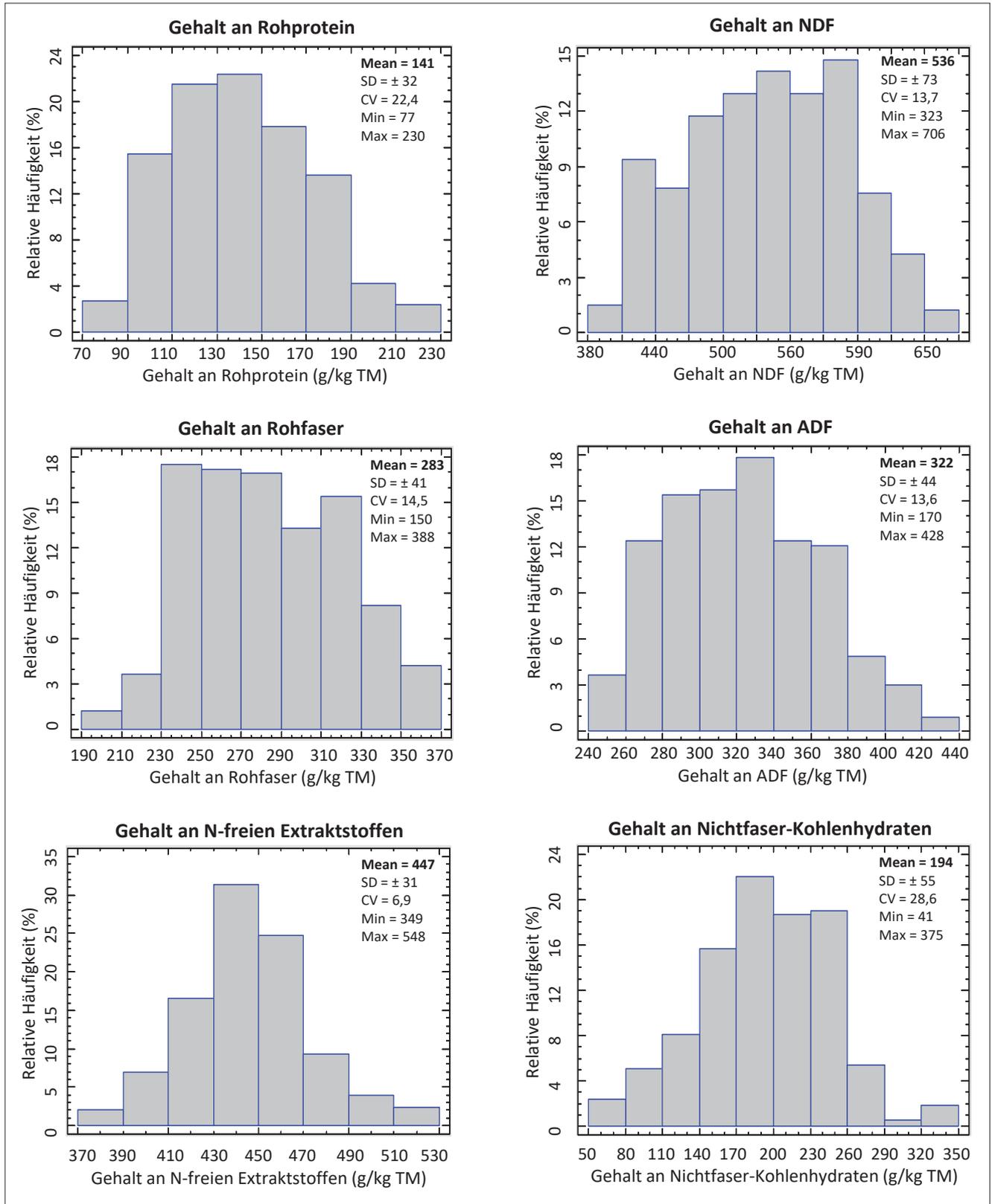


Abbildung 2: Häufigkeitshistogramm zum Gehalt an Rohnährstoffen, Gerüstsubstanzen und Nichtfaser-Kohlenhydraten

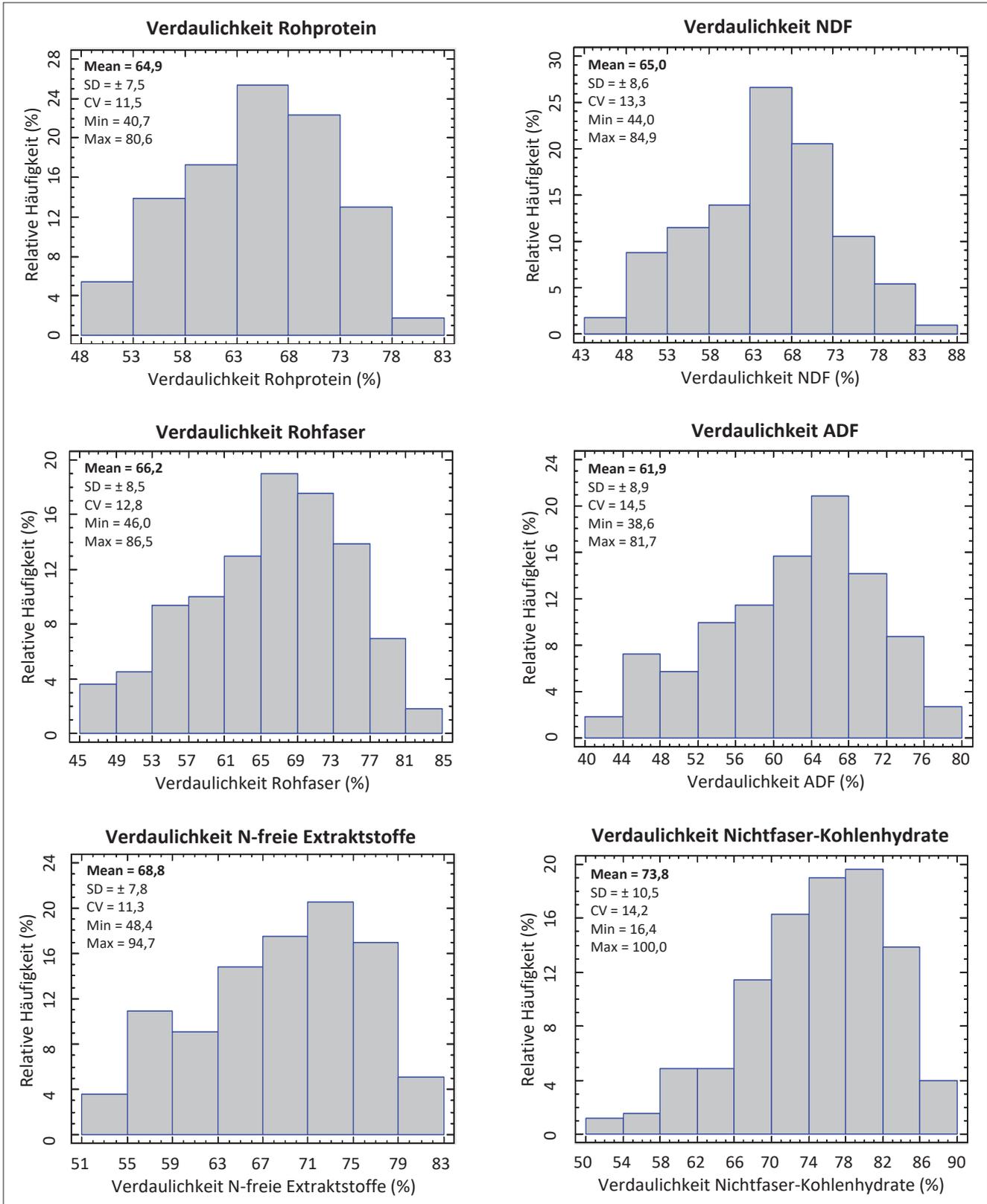


Abbildung 3: Häufigkeitshistogramm zur Verdaulichkeit der Rohnährstoffe, Gerüstsubstanzen und Nichtfaser-Kohlenhydrate

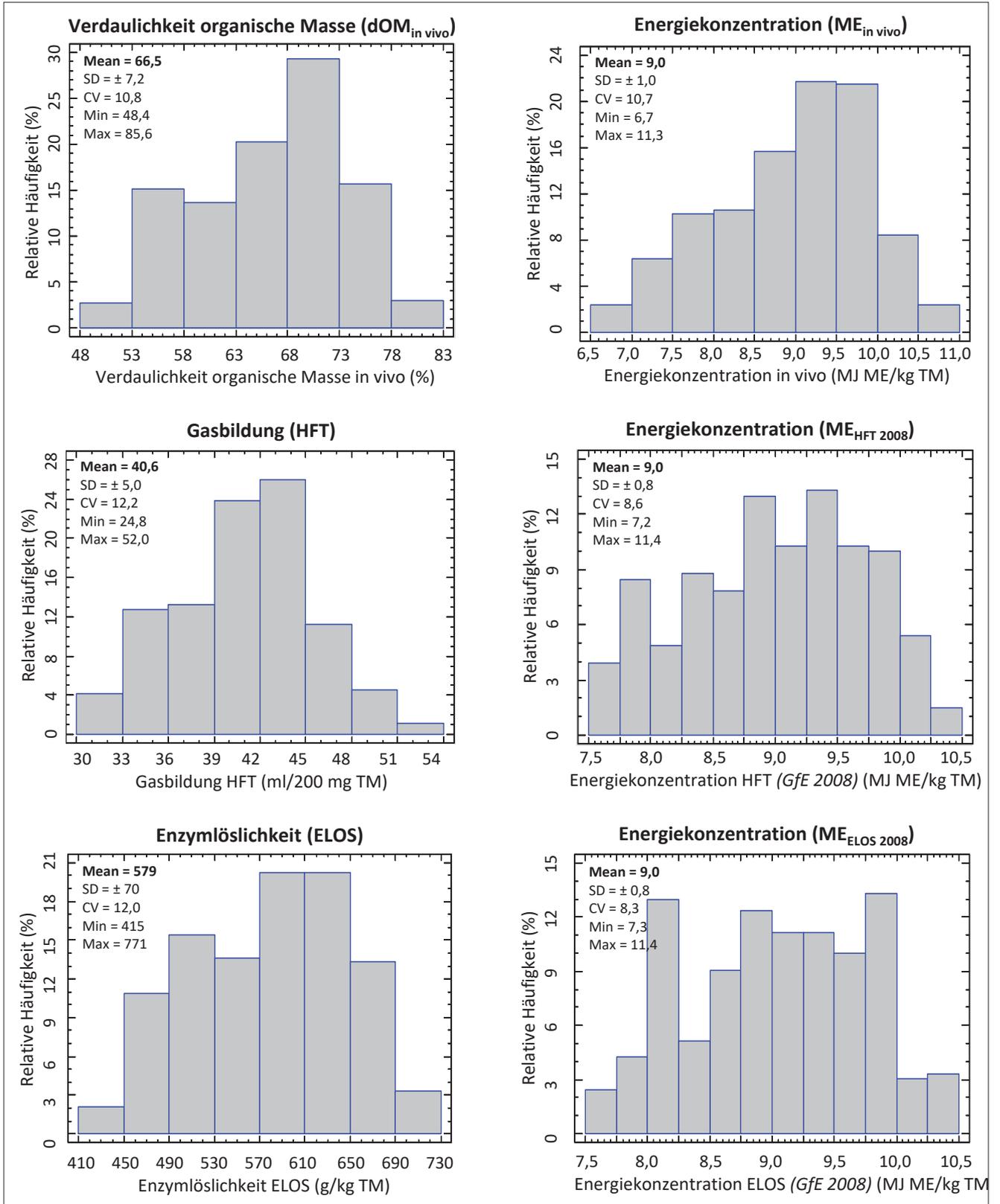


Abbildung 4: Häufigkeitshistogramm zur Verdaulichkeit der OM und Energiekonzentration (ME) sowie zu Ergebnissen der *in vitro*-Verdaulichkeitsmethoden (HFT, ELOS)

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluss von Konservierung und Aufwuchs

Der Einfluss von Konservierung und Aufwuchs auf den Gehalt an Rohnährstoffen und Gerüstsubstanzen sowie auf deren Verdaulichkeit und die Energiekonzentration ist in *Tabelle 2* angeführt. Um eine Vergleichbarkeit der Behandlungen zu ermöglichen, wurde der Gehalt an Rohfaser (im Mittel 283 g/kg TM) als Kovariable konstant gehalten. Die Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Kovariable „Rohfaser“ sind in GRUBER et al. (2021) angegeben. Mit Ausnahme der Gasbildung (Gb [HFT]) war der Einfluss der Konservierung in allen Kriterien des Nährstoffgehaltes und der Verdaulichkeit hoch signifikant ($P < 0,001$). Grünfutter wies einen höheren Proteingehalt auf als Silage oder Heu. Dagegen war der Gehalt an Rohasche bei Heu signifikant niedriger. Der multiple Mittelwertvergleich (Tukey HSD) ergab hinsichtlich der Verdaulichkeit der OM sowie der meisten Nährstoffe (Ausnahme dXL) und der Energiekonzentration signifikant höhere Werte für Grünfutter gegenüber den Konserven Silage und Heu, die sich statistisch nicht signifikant unterschieden. Dies ist eine Folge der Abbauprozesse und Verluste im Zuge der Konservierung, von der vor allem leicht lösliche Kohlenhydrate und Proteine betroffen sind (WOOLFORD 1984, McDONALD et al. 1991, GRUBER et al. 2017, KIENDLER et al. 2019). Eine zusammenfassende Auswertung von relevanten Futterwerttabellen (DLG 1997, DDR 1986, INRA 1989, RAP 1999, ÖAG 2017, Rosenau 2001; siehe Abschnitt 3.4.) ergibt für Grünfutter, Silage und Heu mittlere Energiegehalte von 9,73, 9,61 und 9,26 MJ ME/kg TM, wenn der Gehalt an Rohfaser als Kovariable konstant gehalten wird, d. h. der Einfluss des Vegetationsstadiums ausgeschaltet wird. Daraus sind gegenüber Grünfutter gewisse Konservierungsverluste zu erkennen, die natürlich stark vom Produktionsmanagement und damit vom Konservierungserfolg abhängen.

Auch der Einfluss des Aufwuchses erwies sich in den meisten Kriterien als hoch signifikant, wobei sich vor allem der 1. Aufwuchs von den weiteren Aufwüchsen abhob. (Der Aufwuchs „1,6“ in *Tabelle 1* bedeutet eine Mischung mehrerer Aufwüchse (im Mittel 40 % 1. Aufwuchs und 60 % Folgeaufwüchse), da im Projekt GRUBER et al. (2006) in Folge eines mehrfaktoriellen Versuchsdesigns (Nutzung, Düngung, Standort) die Prüfung einzelner Aufwüchse aus Kapazitätsgründen nicht möglich war). Der 1. Aufwuchs wies tendenziell ($P = 0,097$) einen geringeren Gehalt an XP auf, bei einem höheren Gehalt an NDF, ADF und besonders an ADL ($P < 0,001$). Dennoch erreichte daher der 1. Aufwuchs – bei konstantem Gehalt an XF – eine höhere Verdaulichkeit der OM (68,9 vs. 66,9 %) und Energiekonzentration (9,42 vs. 9,01 MJ ME) gegenüber den Folgeaufwüchsen. In den verschiedenen zitierten Futterwerttabellen finden sich häufig für die Folgeaufwüchse (≥ 2 . Aufwuchs) eine höhere Verdaulichkeit und Energiekonzentration, da Folgeaufwüchse häufig in einem früheren Vegetationsstadium geerntet werden als der 1. Aufwuchs. Ein Vergleich bei gleichem Rohfasergehalt weist jedoch höhere Werte für den 1. Aufwuchs auf, und zwar 9,69 vs. 9,38 MJ ME/kg TM im Mittel der 6 angesprochenen Futterwerttabellen (DLG 1997, DDR 1986, INRA 1989, RAP 1999, ÖAG 2017, Rosenau 2001), während bei dem tatsächlich gegebenen Gehalt an Rohfaser einen Energiegehalt von 9,55 bzw. 9,50 MJ ME/kg TM errechnet wurde.

PÖTSCH und RESCH (2005) haben in einer Übersichtsarbeit den Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter eingehend diskutiert. Demnach entscheiden vor allem die Nutzung, die Düngung, der Pflanzenbestand und der Standort über den Nährstoffgehalt, wobei zwischen diesen Faktoren vielseitige Wechselwirkungen bestehen. RESCH (2021) sowie RESCH und STÖGMÜLLER (2019) haben die Qualität von Silagen und Heu aus Grünlandbetrieben in Österreich auf der Basis von Gemeinschaftsprojekten der Landwirtschaftskammern, des Futtermittellabors Rosenau und der HBLFA Raumberg-Gumpenstein über mehrere Jahre hindurch untersucht. Im Mittel der Jahre von 2003 bis 2020 lag bei Grassilagen die dOM bei $73,3 \pm 2,7$ % und die Energiekonzentration bei $10,2 \pm 0,5$ MJ ME (1. Aufwuchs, $n = 3.114$), bestimmt auf Basis der *in vitro*-Methodik nach TILLEY und TERRY (1963). Die Energiekonzentration der zweiten ($n = 140$) und Folgeaufwüchse ($n = 111$) betrug $9,5 \pm 0,3$ bzw. $9,7 \pm 0,4$ MJ ME/kg TM. Die Heuproben ergaben für die Aufwüchse 1, 2, 3 und ≥ 4 durchschnittliche ME-Gehalte von $9,6 \pm 0,7$ MJ, $9,4 \pm 0,5$ MJ, $9,7 \pm 0,4$ MJ bzw. $9,7 \pm 0,5$ MJ/kg TM ($n = 1.468, 1.105, 435$ bzw. 183, Untersuchungsjahre 2007 bis 2018). Die Energiekonzentration lag im vorliegenden Projekt im Durchschnitt auf etwas niedrigerem Niveau, bedingt durch die systematische und zum Teil extreme Versuchsanstellung. Weiters kann davon ausgegangen werden, dass die Proben aus den Silage- und Heu-Projekten nicht in jedem Fall repräsentativ für die gesamte Situation in Österreich sind, sondern zum Teil überdurchschnittlich, da Futteranalysen eher gut geführte Betriebe beanspruchen.

Tabelle 2: Gehalt an Nährstoffen, Verdaulichkeit und Energiekonzentration in Abhängigkeit von Konservierung und Aufwuchs bei konstant gehaltenem Rohfaser-Gehalt (XF = 283 g/kg TM, n = 331)

Kriterium	Einheit	Konservierung			Aufwuchs			Statistische Parameter				
		Grünfutter	Silage	Heu	1	1.6	2	≥3	RMSE	P _{Kons.}	P _{Aufw.}	R ²
Gehalt an Nährstoffen												
Rohprotein (XP)	g/kg TM	170 ^a	140 ^b	135 ^b	144	147	151	151	16,9	<0,001	0,097	71,5
Rohfett (XL)	g/kg TM	22 ^a	34 ^b	21 ^a	25 ^{ab}	26 ^b	26 ^b	24 ^a	2,9	<0,001	<0,001	53,7
Rohfaser (XF)	g/kg TM	283	283	283	283	283	283	283	-	-	-	-
N-fr. Extraktst. (XX)	g/kg TM	410 ^a	427 ^a	464 ^a	449 ^c	417 ^a	433 ^b	435 ^b	24,1	<0,001	<0,001	39,3
Rohasche (XA)	g/kg TM	116 ^b	116 ^b	97 ^a	99 ^a	126 ^c	107 ^b	107 ^b	13,5	<0,001	<0,001	53,7
Kohlenhydrate (CHO)	g/kg TM	693 ^a	710 ^a	747 ^b	732 ^c	700 ^a	716 ^b	718 ^b	24,1	<0,001	<0,001	73,5
NDF	g/kg TM	577 ^a	487 ^c	534 ^b	547 ^c	520 ^a	529 ^{ab}	534 ^{bc}	25,4	<0,001	<0,001	88,0
ADF	g/kg TM	336 ^b	315 ^a	320 ^a	330 ^b	318 ^a	322 ^a	324 ^{ab}	14,9	<0,001	<0,001	88,4
ADL	g/kg TM	43 ^b	40 ^{ab}	37 ^a	37 ^a	42 ^b	40 ^b	41 ^b	5,6	<0,001	<0,001	63,0
Hemzellulose (HEM)	g/kg TM	242 ^a	163 ^b	210 ^c	228 ^a	202 ^b	204 ^b	185 ^c	31,8	<0,001	<0,001	25,1
Zellulose (ZEL)	g/kg TM	295 ^a	263 ^b	279 ^b	309 ^a	277 ^b	278 ^b	251 ^c	33,1	<0,001	<0,001	21,3
Nichtfaser-KH (NFC)	g/kg TM	116 ^a	223 ^b	213 ^b	186	180	187	184	29,5	<0,001	0,502	71,7
Verdaulichkeit der Nährstoffe und Energiekonzentration												
Rohprotein (dXF)	%	72,8 ^a	61,4 ^b	62,2 ^b	65,5 ^b	67,6 ^c	65,8 ^{bc}	62,9 ^a	4,4	<0,001	<0,001	65,3
Rohfett (dXL)	%	23,5 ^a	50,8 ^c	27,9 ^b	39,3 ^b	36,7 ^b	34,8 ^b	25,5 ^a	10,7	<0,001	<0,001	37,8
Rohfaser (dXF)	%	73,0 ^a	67,2 ^b	64,6 ^b	68,9	67,8	67,9	68,3	5,8	<0,001	0,749	52,7
N-fr. Extraktst. (dXX)	%	71,7 ^a	67,1 ^b	68,2 ^b	71,3 ^a	68,5 ^b	68,9 ^b	67,2 ^b	3,9	<0,001	<0,001	75,0
Kohlenhydrate (dCHO)	%	72,3 ^a	67,1 ^b	66,9 ^b	70,5 ^b	68,2 ^a	68,6 ^{ab}	67,8 ^a	4,2	<0,001	0,010	70,3
dNDF	%	72,0 ^a	64,5 ^b	63,8 ^b	68,8 ^b	65,2 ^a	66,7 ^{ab}	66,3 ^{ab}	5,3	<0,001	0,002	62,3
dADF	%	68,5 ^a	62,6 ^b	60,8 ^b	67,0 ^a	62,0 ^b	63,6 ^b	63,2 ^b	5,7	<0,001	<0,001	58,8
dADL	%	-6,7 ^a	-14,9 ^{ab}	-17,6 ^b	-9,4	-14,7	-12,1	-16,2	16,2	<0,001	0,166	16,2
Hemzellulose (dHEM)	%	76,4 ^a	69,4 ^b	68,8 ^b	68,5 ^a	69,7 ^a	72,0 ^{ab}	76,0 ^b	7,7	<0,001	<0,001	23,0
Zellulose (dZEL)	%	78,9 ^a	75,7 ^{ab}	71,6 ^b	72,9 ^a	73,0 ^a	74,7 ^a	81,0 ^b	8,4	<0,001	<0,001	21,4
Nichtfaser-KH (dNFC)	%	69,9 ^a	71,0 ^{ab}	73,5 ^b	73,9 ^{bc}	74,4 ^c	69,6 ^{ab}	67,8 ^a	8,7	0,039	<0,001	31,5
Trockenmasse (dTM)	%	67,8 ^a	62,9 ^b	63,1 ^b	63,8 ^{ab}	62,0 ^a	65,0 ^{bc}	67,8 ^c	6,1	<0,001	<0,001	21,7
Organ. Masse (dOM)	%	71,2 ^a	65,7 ^b	65,4 ^b	68,9 ^b	67,3 ^{ab}	67,4 ^{ab}	66,0 ^a	3,8	<0,001	0,006	72,2
Energie (dE)	%	69,7 ^a	67,1 ^{ab}	65,0 ^b	65,1 ^a	66,2 ^a	67,1 ^a	70,7 ^b	6,5	<0,001	<0,001	14,5
ME in vivo (GFE 2001)	MJ /kg TM	9,51 ^a	8,94 ^b	8,88 ^b	9,42 ^a	8,95 ^b	9,15 ^b	8,93 ^b	0,53	<0,001	<0,001	69,9
Gasbildung HFT	ml/200 mg TM	41,0	40,1	41,1	43,8 ^c	38,9 ^a	41,1 ^b	39,1 ^{ab}	3,8	0,689	<0,001	42,9
ELOS	g/kg TM	583 ^a	626 ^b	571 ^a	599 ^{ab}	602 ^b	591 ^{ab}	580 ^a	33,1	<0,001	0,006	77,4

3.2 Zusammenhänge zwischen Rohfaser und den Gerüstsubstanzen

In *Abbildung 5* (links) ist die Verdaulichkeit der OM in Abhängigkeit vom Gehalt an ADF dargestellt, und zwar gliedert nach den Hauptfaktoren Konservierung, Aufwuchs und Versuch. Es zeigen sich deutliche Zusammenhänge zwischen ADF und dOM sowie auch Einflüsse der Versuchsfaktoren. Jedoch ist auch die relativ große Streuung aus der Darstellung der Punktelwolke ersichtlich. In *Abbildung 5* (rechts) sind die Zusammenhänge zwischen dem Gehalt an Rohfaser und dem Gehalt an Gerüstsubstanzen (NDF, ADF, ADL) dargestellt. Es zeigen sich sehr enge Beziehungen, besonders zwischen Rohfaser und ADF ($R^2 = 84,4\%$), was sich aus der Analysen-Methodik ergibt (VAN SOEST 1994). Die Beziehung zwischen Rohfaser und NDF ist etwas schwächer ($R^2 = 77,4\%$), was auf botanische Unterschiede zwischen den einzelnen Proben aus den Dauerwiesenbeständen hinweist. Bekanntlich unterscheiden sich NDF und Rohfaser vor allem durch den Gehalt an Hemizellulose, die bei der Analyse der Rohfaser in Lösung geht. Einzelne botanische Arten bzw. Gruppen wie Gräser, Leguminosen oder Kräuter unterscheiden sich im Gehalt an Hemizellulose (VAN SOEST 1994). Die Beziehung zwischen Rohfaser und ADL weist das geringste Bestimmtheitsmaß auf ($R^2 = 57,2\%$), was erstens für die Notwendigkeit der Analyse der Gerüstsubstanzen über die Rohfaser hinaus spricht und zweitens aufzeigt, dass die Lignifizierung der einzelnen Proben auch bei Berücksichtigung des Fasergehaltes recht unterschiedlich sein kann. Zwischen dem Gehalt an Faser (XF, NDF, ADF) und der Verdaulichkeit der OM bestehen stark negative Beziehungen (*Abbildung 6* links). Dies ist durch die eingangs beschriebene Lignifizierung der Gerüstsubstanzen bedingt. Lignin ist unverdaulich und durch seine chemische Komplexbildung mit Hemizellulose sowie durch die physikalische Inkrustierung der Faserkohlenhydrate verantwortlich für den Rückgang der Verdaulichkeit mit fortschreitender Vegetationsdauer (VAN SOEST 1967). Erstaunlicher Weise ist der negative Zusammenhang zwischen Rohfaser und dOM enger als zwischen NDF und dOM ($R^2 = 61,4$ vs. $42,5\%$). ADF und ADL (nicht dargestellt) weisen eine stärkere Beziehung zur Verdaulichkeit auf als NDF (jeweils $R^2 = 51,2\%$), jedoch etwas schwächer als Rohfaser. Auch VAN SOEST (1994) weist darauf hin, dass die Nutzung von ADF als Schätzer für die Verdaulichkeit nicht auf theoretischer Basis, sondern nur auf statistischer Beziehung beruht.

Um den Einfluss verschiedener Gerüstsubstanzen auf die Vorhersage-Genauigkeit der Verdaulichkeit der OM genauer zu prüfen, wurden auf Basis des vollständigen statistischen Modells (unter Berücksichtigung der fixen Effekte „Konservierung“ und „Aufwuchs“ sowie des zufälligen Effektes „Versuch“) die einzelnen Gerüstsubstanzen (und einige ihrer Kombinationen) statistisch bezüglich des Restfehlers (Root Mean Square Error, RMSE) und des Bestimmtheitsmaßes (R^2) untersucht. Gemessen an diesen Parametern zeigt sich, dass sich die Gerüstsubstanzen in ihrer Vorhersage-Genauigkeit der Verdaulichkeit der OM kaum unterscheiden, wie auch schon bei den einfachen linearen Beziehungen (*Abbildung 5*) zu erkennen war. Von den einzeln geprüften Variablen schneidet ADF (RMSE = 3,68 %, $R^2 = 73,9\%$) am günstigsten ab und ADL am ungünstigsten, allerdings – wie bereits ausgeführt – mit sehr geringen Unterschieden. Deutlich ungenauer sind die errechneten Variablen Zellulose (ZEL; ADF minus ADL) und besonders Hemizellulose (HEM; NDF minus ADF). Dagegen erhöht die Berücksichtigung von NDF bzw. ADF gemeinsam mit ADL die Vorhersage-Genauigkeit einigermaßen und R^2 steigt auf über 80 %. Dabei spielt es keine Rolle, ob ADL als einzelner Wert oder als Quotient von NDF, ADF, HEM oder ZEL eingesetzt wird.

Da mit fortschreitender Vegetationsdauer im Wiesenfutter der Gehalt an Faser zunimmt, deren Verdaulichkeit in Folge von Lignifizierung noch dazu stark abnimmt, ist die Verdaulichkeit der Gerüstsubstanzen von grundlegender Bedeutung für die Energielieferung aus diesem Futter. Dem tragen auch neuere Entwicklungen der Futterbewertung Rechnung, welche die Abbaubarkeit und Abbaurate im Pansen sowie die Verdaulichkeit der Gerüstsubstanzen im gesamten Verdauungstrakt berücksichtigen (z. B. HUHTANEN et al. 2008; GOESER und COMBS 2009; COMBS 2013). *Abbildung 6* (rechts) zeigt diese sehr engen Zusammenhänge zwischen Verdaulichkeit der OM und der Verdaulichkeit der Gerüstsubstanzen. Diese sind am deutlichsten bei NDF ($R^2 = 89,0\%$), gefolgt von XF ($R^2 = 86,4\%$) sowie ADF ($R^2 = 86,1\%$) und – nicht dargestellt – ADL ($R^2 = 0,4\%$). VAN SOEST (1994) weist darauf hin, dass nicht so sehr der Gehalt an den Fraktionen der Gerüstsubstanzen die Verfügbarkeit der Nährstoffe bestimmt, sondern deren Verbindungen untereinander. Wie auch schon hinsichtlich des Gehaltes sind auch die Zusammenhänge zwischen der Verdaulichkeit von XF und jener von NDF ($R^2 = 91,6\%$) und ADF ($R^2 = 87,5\%$) sehr eng (nicht dargestellt).

Tabelle 3: Einfluss verschiedener Gerüstsubstanzen auf die Vorhersagegenauigkeit der Verdaulichkeit der OM

	XF	NDF	ADF	ADL	HEM	ZEL	NDF ADL	ADF ADL	NDF ADF ADL	NDF ADL/NDF	NDF ADL/ADF	NDF ADL/HEM	NDF ADL/ZEL
RMSE	3,80	3,73	3,68	3,84	5,16	4,19	3,11	3,23	3,08	3,11	3,11	3,11	3,11
R^2	72,2	73,2	73,9	71,6	48,7	66,2	81,4	80,0	81,7	81,4	81,4	81,4	81,4

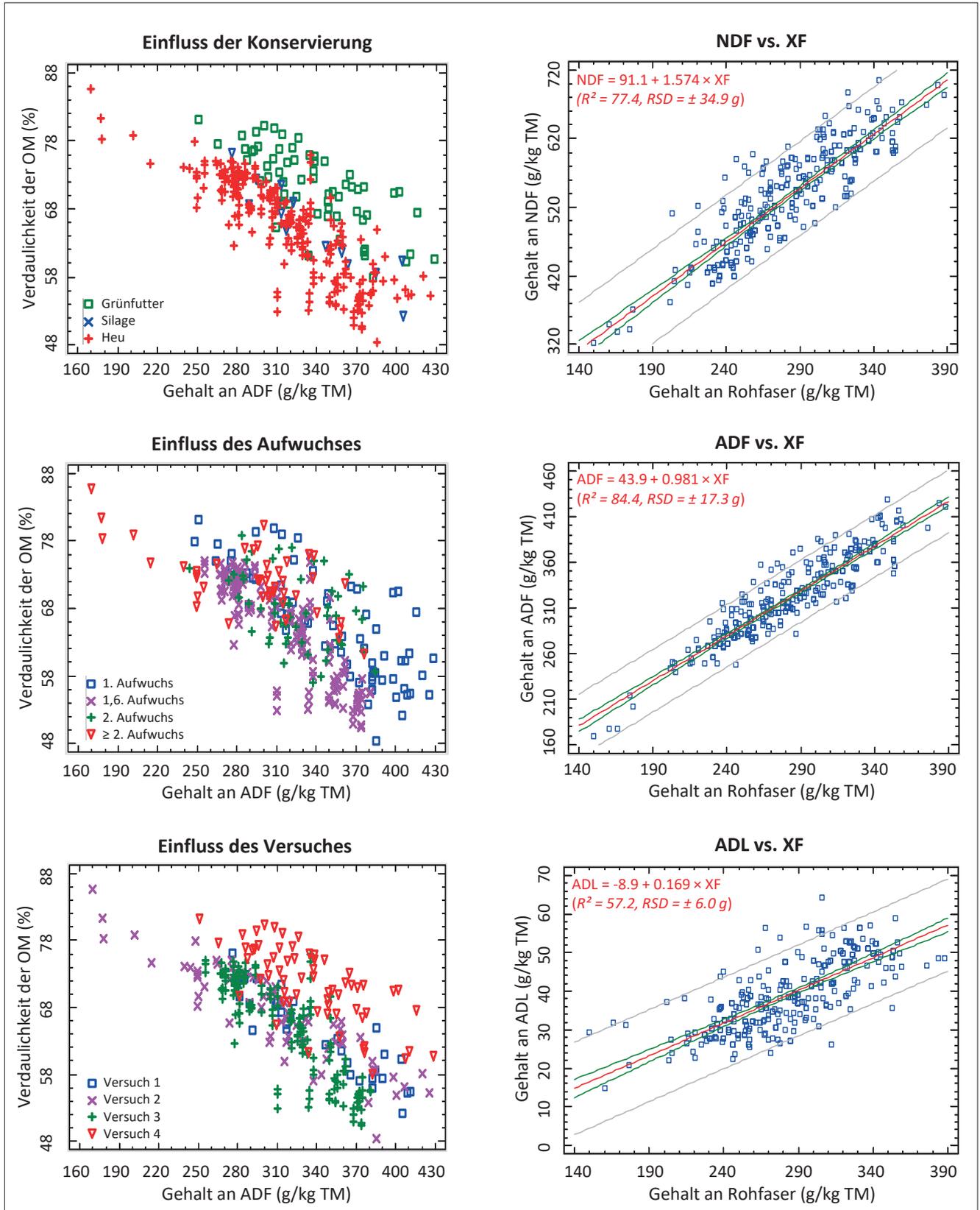


Abbildung 5: Einfluss der Effekte von Konservierung, Aufwuchs und Versuch auf die Verdaulichkeit der OM sowie Beziehungen der Rohfaser zu NDF, ADF und ADL

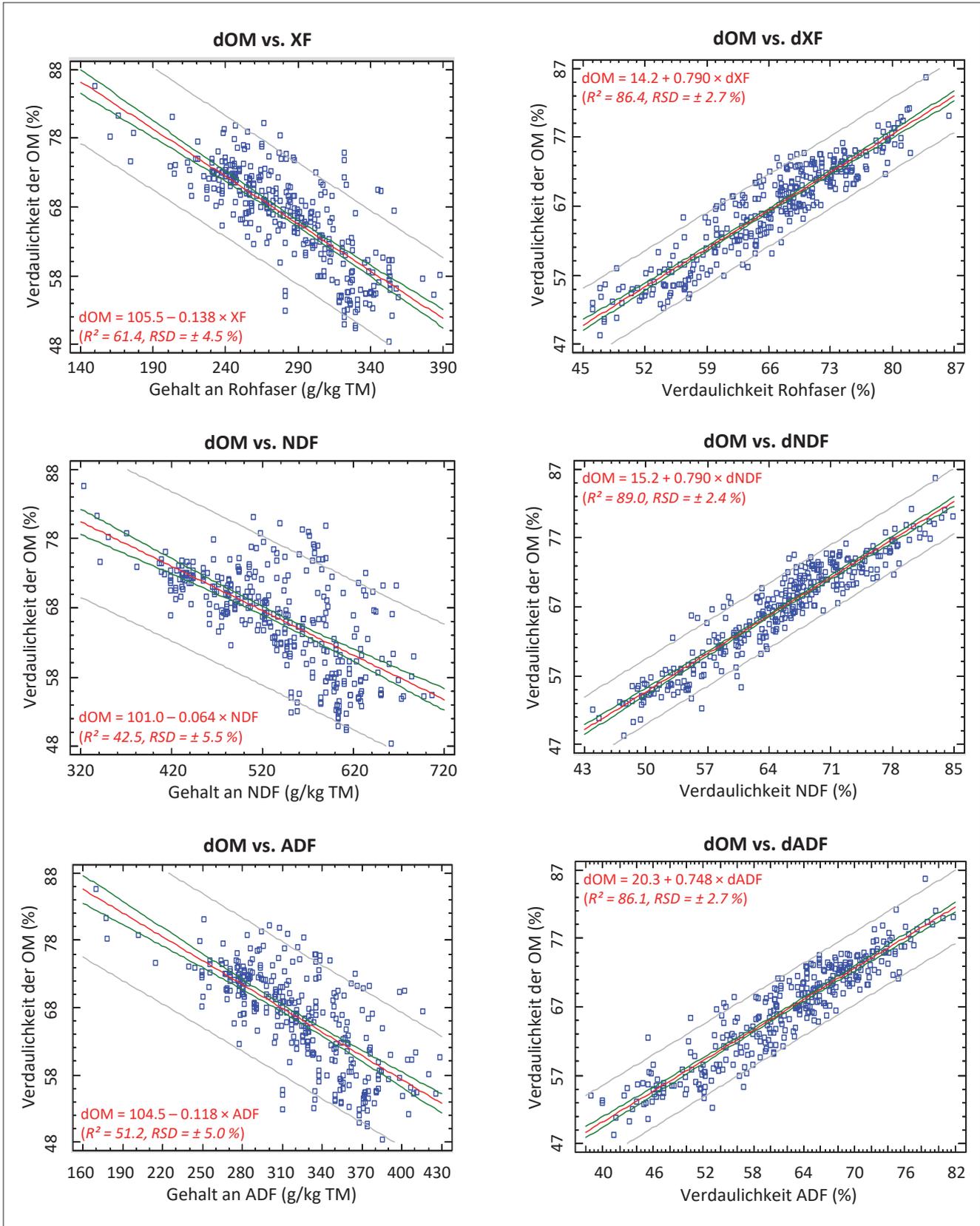


Abbildung 6: Beziehungen zwischen Verdaulichkeit der OM und dem Gehalt bzw. der Verdaulichkeit an Rohfaser, NDF und ADF

JUNG und DEETZ (1993) haben ein Modell der Lignifizierung und der Abbaubarkeit von Zellwänden entwickelt, welches der Zusammensetzung und den vielfältigen Bindungsarten zwischen den Molekülen Rechnung trägt. Die Grundzüge dieses Modells sind in *Abbildung 7* dargestellt. Lignin-Polymere sind in der Primärzellwand über Ether-Bindungen der Ferulasäure mit Arabinoxylan verankert. Die Ferulasäure ist dabei mit dem Arabinose-Substituent des Arabinoxylans verestert. Die Primärzellwand enthält mehr verzweigte Lignin-Polymere, die einen hohen Guajakyl-Anteil aufweisen (aus Coniferyl-Alkohol, d. h. 1 Methoxy-Gruppe), während in der Sekundärzellwand eher unverzweigtes, lineares Lignin vorherrscht, das reich an Syringyl ist (aus Sinapyl-Alkohol, d. h. 2 Methoxy-Gruppen). Durch seine zweite Methoxy-Gruppe ist Syringyl nicht in der Lage, im gleichen Ausmaß Bindungen und Verzweigungen einzugehen wie Guajakyl. Infolgedessen ist das Lignin der Sekundärzellwand (mit hohem Syringyl-Anteil) nicht so nachteilig für die Abbaubarkeit der Zellwandkohlenhydrate. Dagegen führt Guajakyl zu mehr Verzweigungen und höherer Kondensation des Lignins mit dem Effekt, dass sich der Anteil und die Verzweigung des Lignins der Primärzellwand und der Mittellamelle erhöhen und durch die räumliche Behinderung des Enzymzutritts eine reduzierte Verdaulichkeit eintritt. Dies stimmt auch gut mit der Beobachtung überein, dass Primärzellwand und Mittellamelle von Pansenmikroben nicht angegriffen werden, wohingegen die Sekundärzellwand zum Teil abgebaut wird, obwohl auch diese lignifiziert ist (ENGELS 1989; zit. nach JUNG und DEETZ 1993). Während der Vegetation ändert sich sowohl die Zusammensetzung der phenolischen Monomere (p-Cumarsäure/Ferulasäure) als auch der Anteil der Phenylpropane (Cumaryl-, Coniferyl- und Sinapyl-Alkohol) im Lignin. Die p-Cumarsäure wirkt sich nachteiliger auf die Abbaubarkeit der Zellwand aus als die Ferulasäure (JUNG 1989). Das Nichtkern-Lignin vermindert die Verdaulichkeit in zweifacher Weise:

Die vom Nichtkern-Lignin hergestellte Quervernetzung von Lignin und Polysacchariden über Ester- und Etherbindungen schafft eine enge Verbindung zwischen beiden. Dabei verhindert das Kernlignin einen räumlichen Zutritt der Enzyme an die Polysaccharide und senkt somit das Ausmaß der Verdauung.

Nichtkern-Lignin-Phenole, die nur mit Polysacchariden verestert, jedoch nicht mit Kern-Lignin quer vernetzt sind (d. h. Ferulasäure), können durch die räumliche Behinderung der Polysaccharidasen nur die Abbaurate der Gerüstkohlenhydrate mindern, jedoch nicht deren Ausmaß, da die Esterbindungen letztlich enzymatisch gespalten werden können.

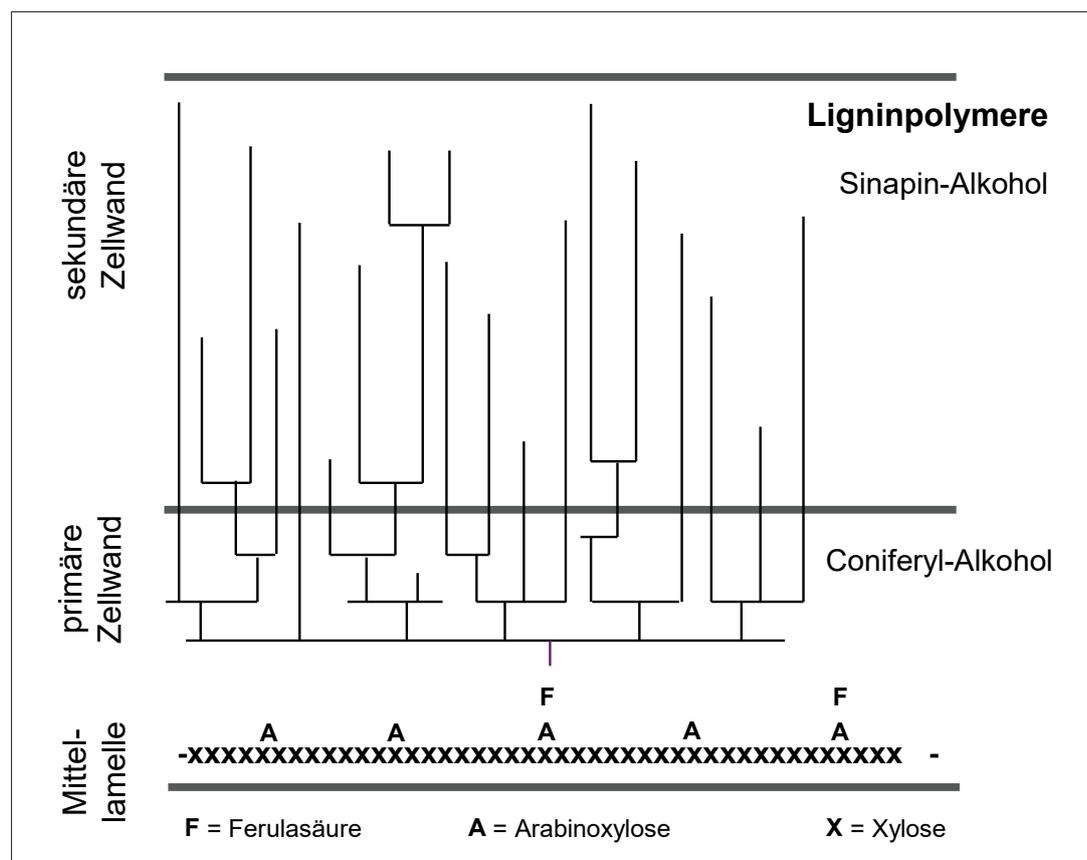


Abbildung 7: Modell der Zellwand-Lignifizierung (aus GRUBER 2009, nach JUNG und DEETZ 1993)

Es ist davon auszugehen, dass die Ferulasäure, die mit Arabinoxylan verestert ist, als Ausgangspunkt für die Lignin-Polymerisation agiert. Das phenolische Hydroxyl der Ferulasäure geht eine Etherbindung mit den Vorläufern der Phenylpropan-Alkohole ein. Der Arabinoxylan-Ferulasäure-Ester wird in der Primärzellwand in einem frühen Entwicklungszustand angelegt und Lignin an den Zellwand-Polysacchariden der Primärzellwand verankert. Auch mikroskopische Studien zeigen, dass die Lignifizierung von der Mittellamelle und der Primärzellwand ausgeht, wo auch die höchste Ligninkonzentration auftritt. Danach wächst das Lignin-Polymer in die Sekundärzellwand hinein, allerdings bei geringer Quervernetzung mit Arabinoxylan, womit die stärkere Verdauungsdepression in der Primärzellwand zu erklären ist, weil durch diese Quervernetzung die räumliche Behinderung der Enzyme gegeben ist. Dagegen bietet die lineare Anordnung des Lignins (ohne Verzweigungen) den hydrolytischen Enzymen eine größere Angriffsfläche für die Zellwand-Polysaccharide, die zwischen den Lignin-Ketten liegen. Das vorliegende Modell der Zellwandstruktur und Zellwandlignifizierung von JUNG und DEETZ (1993) zeigt, dass vor allem die strukturellen Verhältnisse in der Zellwand, wie die Art der Quervernetzungen, die Abbaubarkeit der Gerüstsubstanzen beeinflussen und nicht so sehr die Konzentration einzelner Komponenten.

VAN SOEST (1994) bezeichnet daher folgerichtig die gröbere, räumliche Anordnung der Zellwandkomponenten als den übergeordneten Faktor für die Eigenschaften der Zellwand, wogegen die kovalenten Bindungen zwischen den Zellwandkohlenhydraten diese nicht vollständig erklären können. Er definiert die Zellwand als ein Riesenmolekül mit kovalenten Bindungen, die von β -Glukanen über Xylan und Araban zum Zellwandprotein (Extensin) laufen. Dabei spielen Querverbindungen mit Extensin und den phenolischen Mono- und Dimeren von Ferula- und p-Cumarsäure sowie Lignin eine wichtige Rolle. Die physiko-chemischen Eigenschaften, welche die Nährstoffabbaubarkeit bestimmen, hängen daher vor allem von der Art der Bindung zwischen den chemischen Komponenten ab. Auch ÅMAN (1993) bezeichnet die komplexe dreidimensionale Struktur der Zellwand als entscheidender für deren Eigenschaften als die einzelnen Komponenten. Die mikrobiellen und molekular-biochemischen Mechanismen des Zellwandabbaues wurden von WEIMER (1993) beschrieben. Wesentliche Aspekte aus der Sicht der Mikrobiologie sind die Adhäsion der Mikroben an die Faserpartikel, die Wechselwirkungen und Wechselbeziehungen unter den Mikroben und die Enzymologie der Verdauungsvorgänge. Für den Abbau der Zellwand und den Zugang der Verdauungsenzyme ist die Verminderung der Partikelgröße wichtig sowie die Kinetik der Verdauung und Futterpassage durch den Verdauungstrakt. Einen wichtigen Einfluss übt auch das Fütterungsmanagement aus (GLENN und WALDO 1993).

In *Abbildung 8* sind die Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe (dXP, dXL, dXF, dXX) sowie der Gerüstsubstanzen (dNDF) und Nichtfaser-Kohlenhydrate (dNFC) in Abhängigkeit vom Gehalt an Rohfaser dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Verdaulichkeiten der Nährstoffe pro g Rohfaser (in der TM) um 0,10 bis 0,16 Prozent-Punkte zurückgehen. Allerdings weisen die Beziehungen deutliche Streuungen auf (6 bis 13 % relativ zum Mittelwert, Ausnahme dXL mit 44 %) und die Bestimmtheitsmaße (R^2) liegen im Bereich von 10 bis 69 %. Daher wurden in einem weiteren Schritt die Gehalte und Verdaulichkeiten in einem GLM-Modell unter Berücksichtigung des fixen Effektes von Konservierung und des zufälligen Effektes des Versuches sowie der Regressionsvariablen Aufwuchs und Rohfaser statistisch analysiert. Der Effekt des Aufwuchses wurde als Regressionsvariable (und nicht als fixer Effekt) modelliert, um Mischsilagen (sog. Sandwich-Silagen aus mehreren Aufwüchsen) entsprechend ihren TM-Verhältnissen treffsicher abschätzen zu können. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 4* angeführt. Durch die Anwendung dieses statistischen Modells wurden nicht so sehr die Werte der Regressionskoeffizienten verändert, was dafür spricht, dass sie unabhängig von der Konservierungsform gelten, sondern vor allem deren statistische Wahrscheinlichkeit erhöht bzw. deren Schätzfehler verringert. So betragen die R^2 für dOM, dXP, dXF bzw. dNDF im einfachen linearen Modell (*Abbildung 6* und *8*) 61,4 %, 40,5 %, 36,6 % bzw. 42,4 %, im umfangreicheren Modell (*Tabelle 4*) dagegen 72,1 %, 62,2 %, 52,9 % bzw. 61,3 %, verbunden mit einer deutlichen Verringerung des Restfehlers. Die Beziehungen zwischen Rohfaser und auch den Inhaltsstoffen wurden angeführt, weil sie als Grundlage für Modellrechnungen zum Einfluss des Vegetationsstadiums auf den Futterwert von Wiesenfutter dienen können.

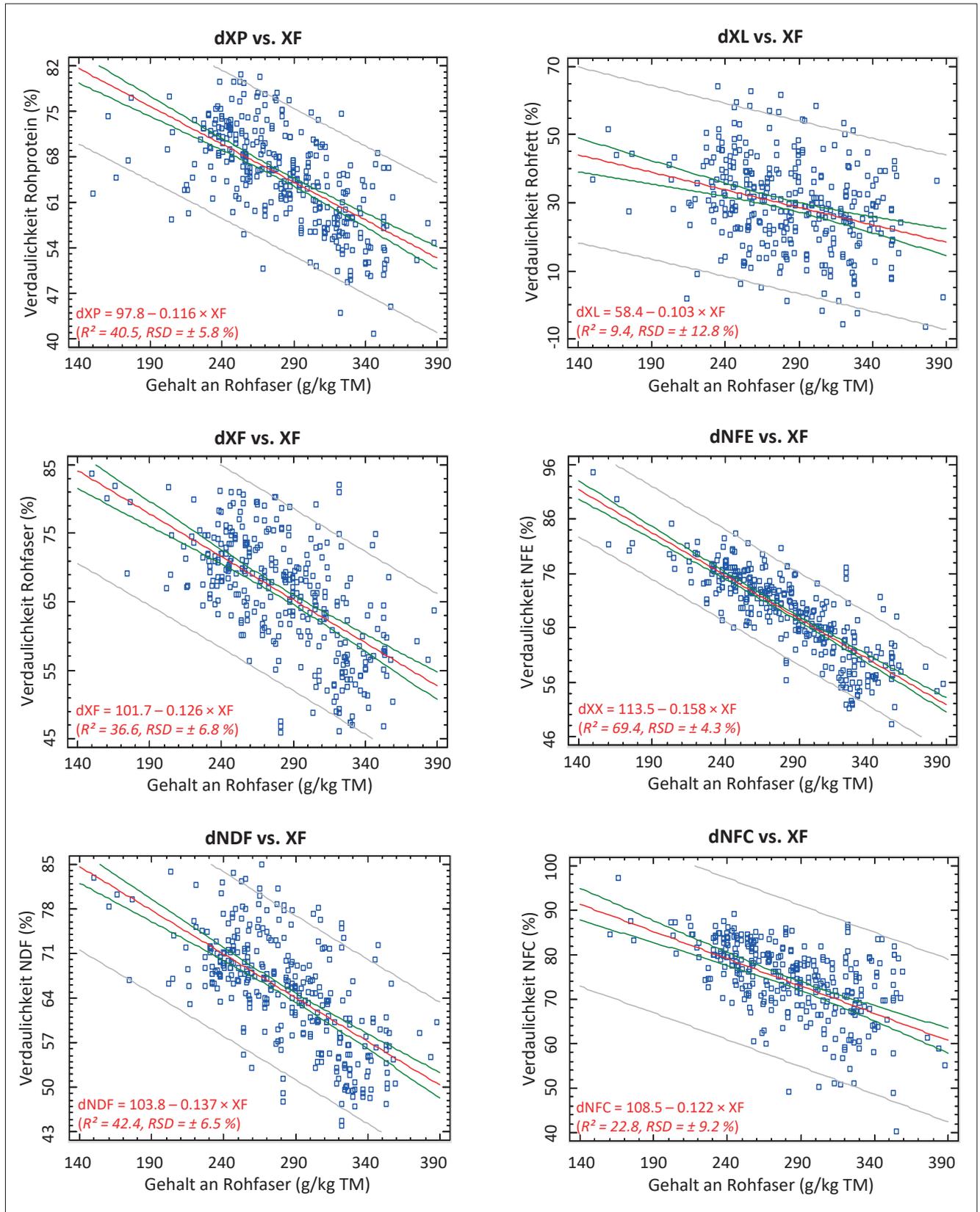


Abbildung 8: Beziehungen zwischen dem Gehalt an Rohfaser und der Verdaulichkeit der Rohnährstoffe (dXP, dXL, dXF, dXX) sowie der Verdaulichkeit von NDF und NFC

Tabelle 4: Regressionsgleichungen zur Bestimmung von Gehalt und Verdaulichkeit an Nährstoffen sowie der Energiekonzentration in Abhängigkeit von Konservierung, Aufwuchs und Gehalt an Rohfaser (n = 331) ¹⁾

Inhaltsstoff	LS-Mean	Fixer Effekt von			Regressionskoeffizienten		Statistische Parameter		
		Grünfutter	Silage	Heu	b _{Aufwuchs}	b _{XF}	RMSE	RMSE%	R ²
Gehalt an Nährstoffen (g/kg TM) und Bruttoenergie (MJ GE/kg TM)									
XP	147,9	21,3	-7,7	-13,6	7,59	-0,537	16,9	11,4	71,7
XL	25,3	-3,9	7,9	-4,0	0,038	-0,0478	3,0	11,8	51,1
XX	435,3	-18,7	-1,5	20,2	-14,98	-0,171	26,0	6,0	29,7
XA	108,4	1,3	1,3	-2,6	7,35	-0,244	16,5	15,2	30,9
CHO	718,3	-18,7	-1,5	20,2	-14,98	0,829	26,0	3,6	69,3
NDF	534,0	48,2	-41,9	-6,3	-15,19	1,543	26,4	4,9	87,0
ADF	324,6	14,0	-7,1	-6,9	-6,90	0,963	15,2	4,7	87,9
ADL	39,8	2,1	-0,6	-1,5	3,41	0,179	5,7	14,4	61,1
HEM	209,5	34,2	-34,8	0,6	-8,29	0,580	23,2	11,1	60,3
ZEL	284,7	11,9	-6,5	-5,4	-10,31	0,784	15,1	5,3	83,6
NFC	184,3	-66,9	40,4	26,5	0,212	-0,714	29,5	16,0	71,7
GE	17,850	0,026	0,104	-0,130	-0,0792	0,0024	0,307	1,7	15,7
Verdaulichkeit der Nährstoffe und Energie (%) sowie Energiekonzentration (MJ/kg TM)									
dXP	65,42	6,70	-4,63	-2,06	-0,903	-0,118	4,60	7,0	62,2
dXL	34,61	-11,36	16,33	-4,97	-8,267	-0,133	10,96	31,7	34,2
dXF	68,30	4,90	-0,96	-3,94	-0,767	-0,128	5,82	8,5	52,9
dXX	69,22	2,86	-1,64	-1,22	-0,903	-0,118	4,60	7,0	62,2
dOM	67,56	3,79	-1,60	-2,19	-2,083	-0,144	3,81	5,6	72,1
dCHO	68,95	3,64	-1,40	-2,24	-2,123	-0,155	4,25	6,2	70,2
dNDF	66,99	5,69	-1,78	-3,91	-2,144	-0,143	5,36	8,0	61,3
dADF	64,26	5,07	-0,71	-4,36	-3,474	-0,147	5,84	9,1	57,4
dADL	-12,65	6,73	-1,12	-5,61	-4,255	0,116	16,21	-128,2	15,9
dHEM	70,79	6,23	-3,12	-3,11	-0,250	-0,135	5,83	8,2	56,1
dZEL	74,57	5,16	-0,80	-4,36	-1,999	-0,164	5,87	7,9	61,7
dNFC	71,58	-2,34	-1,24	3,58	-5,048	-0,136	8,78	12,3	29,7
dE	66,57	3,63	-1,36	-2,27	-2,128	-0,139	3,74	5,6	71,4
ME	9,145	0,442	-0,106	-0,336	-0,3500	-0,0188	0,539	5,9	68,5
NEL	5,371	0,312	-0,085	-0,227	-0,2476	-0,0134	0,367	6,8	70,2

¹⁾ Allgemeine Form der Gleichung:

$$y = \text{LS-Mean} + \text{Effekt[Konservierung]} + \text{Regressionskoeffizient [Aufwuchs]} \times (\text{Aufwuchs} - 1,596) + \text{Regressionskoeffizient} \cdot [\text{Rohfaser}] \times (\text{Rohfaser} - 283,0)$$

Beispiel: dOM = Grünfutter, 2. Aufwuchs, 250 g Rohfaser

$$dOM = 67,56 + 3,79 + (-2,083) \times (2 - 1,596) + (-0,144) \times (250 - 283,0) = 75,26 \%$$

3.3 Nutzung von in vitro-Verdaulichkeitsmethoden

Da die Ermittlung der Verdaulichkeit *in vivo* in Folge des hohen Aufwandes auf wissenschaftliche Experimente beschränkt ist und für Untersuchungen von Praxisproben nicht in Frage kommt, wurden sog. *in vitro*-Verdaulichkeitsmethoden entwickelt, die über die chemische Analyse hinaus eine treffendere Bestimmung des Futterwertes erlauben (z. B. TILLEY und TERRY 1963, DE BOEVER et al. 1988, MENKE und STEINGASS 1988, WEISS 1994, JONES und THEODOROU 2000). Dies wird durch die Fermentation der Futterprobe mit Enzymen oder Pansensaft erreicht. An den in der vorliegenden Untersuchung *in vivo* geprüften Futtermitteln wurden auch die *in vitro*-Methoden „Hohenheimer Futterwert-Test“ (MENKE und STEINGASS 1988; HFT) und „Enzymlöslichkeit“ (DE BOEVER et al. 1988; ELOS) angewendet und ihre Schätzgenauigkeit an den *in vivo* ermittelten Werten validiert. Die wesentlichen Ergebnisse sind in *Abbildung 9* dargestellt.

Der bei der Enzymlöslichkeit ermittelte ELOS-Wert zeigte eine engere Beziehung zu ME als die im HFT ermittelte Gasbildung (R² = 72,7 vs. 46,2 %, *Abbildung 9* oben). Dies liegt einerseits an der variablen Aktivität des Pansensaftes

(abhängig von Entnahme, Fütterung etc.), andererseits jedoch auch daran, dass die Gasbildung vor allem vom Gehalt an Kohlenhydraten abhängig ist (STEINGASS und MENKE 1986). Werden dagegen die beiden *in vitro*-Verdaulichkeitsmethoden im Rahmen der von der GfE publizierten Schätzgleichungen an den vorliegenden Daten angewendet (GfE 1998, GfE 2008), zeigt sich, dass beide Methoden etwa gleichwertig sind, mit leichten Vorteilen für den HFT. Der Schätzfehler (Root mean square error prediction, RMSE_p) bei der Anwendung der Formeln von GfE (1998) beträgt für HFT 0,55 und für ELOS 0,58 MJ ME, die entsprechenden Werte für die Schätzgleichungen GfE (2008) betragen 0,50 bzw. 0,52 MJ ME. Die Schätzgleichungen GfE (2008) führten also zu einer etwas genaueren Energiebewertung als jene von GfE (1998). Der Schätzfehler bei der Ableitung der Formeln (Root mean square error calibration, RMSE_c) war in der Auswertung von GfE (1998) für ELOS etwas niedriger (im Mittel von Frischgras, Silage und Heu 0,36 MJ ME) als für HFT (0,39 MJ ME). Dagegen schnitt in der Auswertung von GfE (2008) HFT etwas günstiger ab als ELOS (0,45 vs. 0,50 MJ ME). Insgesamt sind diese Unterschiede in der Schätzgenauigkeit der beiden *in vitro*-Verdaulichkeitsmethoden sehr gering.

Abschließend zu diesem Abschnitt werden Schätzgleichungen für die Energiekonzentration (ME) und Verdaulichkeit (dOM) auf Basis von Rohnährstoffen (XP, XL, XF, XA), Gerüstsubstanzen (NDF, ADF, ADL) sowie *in vitro*-Verdaulichkeitsparametern (HFT, ELOS) angeführt (Tabelle 5). Diese Formeln berücksichtigen zusätzlich zu den analytischen Kenngrößen auch Effekte der Konservierungsform und des Aufwuchses. Es werden Formeln sowohl auf Basis des HFT als auch auf Basis von ELOS dargestellt. Weiters wurden die Gleichungen unter Verwendung verschiedener Faserkriterien entwickelt, d. h. für XF, NDF, ADF bzw. ADL jeweils eine eigene Formel abgeleitet. Als Schlussfolgerung aus den 16 angeführten Gleichungen ergibt sich, dass ME genauer geschätzt werden kann als dOM (RMSE% = 4,19 vs. 4,42 % des Mean). Weiters ist zu erkennen, dass die Gleichungen auf Basis von ELOS einen geringeren Schätzfehler aufweisen als jene auf Basis von HFT (RMSE% = 4,07 vs. 4,65 % des Mean). Und hinsichtlich der Faserkriterien zeigen sich nur geringfügige Unterschiede in deren Einfluss auf die Schätzgenauigkeit, die außerdem von der *in vitro*-Methode (HFT, ELOS) und der Zielgröße (ME, dOM) abhängt. Als Mittelwert über alle 16 Gleichungen ergeben sich für XF, NDF, ADF bzw. ADL relative Schätzfehler von 4,57, 4,53, 4,40 und 4,40 RMSE% (in % des Mean). Der mittlere Schätzfehler (Mittelwert von HFT- und ELOS-Formeln) von 0,38 MJ ME ist etwas niedriger als die von der GfE (1998) bzw. GfE (2008) mitgeteilten Werte von 0,57 bzw. 0,51 MJ ME. Hinsichtlich Verdaulichkeit beträgt der mittlere Schätzfehler über alle Gleichungen genau 3,0 % dOM. Es fällt auf, dass die einzelnen Faserkriterien (XF, NDF etc.) die Werte der anderen Regressionskoeffizienten (Aufwuchs, XP, *in vitro*-Parameter etc.) und auch die Werte des fixen Effektes Konservierungsform ändern. Dies zeigt, dass sich die Faserkriterien in chemischer Hinsicht unterscheiden, obwohl sie die Verdaulichkeit in ähnlichem Ausmaß bestimmen. In *Abbildung 10* (oben) sind zwei Grafiken angeführt, welche die tatsächlichen Messwerte („observed“) jenen mit dem jeweiligen Modell geschätzten Werten („predicted“) gegenüberstellt, und zwar links auf Basis des Modells mit dem geringsten RMSE und rechts mit dem höchsten RMSE.

Einige der in den Gleichungen in *Tabelle 5* herangezogenen Variablen korrelieren miteinander, was ein Problem darstellen kann, da die Variablen in Regressionsmodellen unabhängig voneinander sein sollen. Daher wurde auch eine Principal Component-Analyse unternommen, deren Ergebnisse in *Abbildung 10* (Mitte und unten) dargestellt sind. Bei diesem statistischen, sog. multivariaten Verfahren wird nicht mit den einzelnen Variablen der Untersuchung gearbeitet, sondern es werden aus mehreren, interessierenden Variablen sog. Hauptkomponenten (principal components) errechnet, die in einem orthogonalen Verfahren jene theoretische Achse darstellen, welche die jeweils größtmögliche Varianz aufnehmen, d. h. erklären können. Die Ermittlung erfolgt ähnlich dem Least squares-Verfahren, in dem Abweichungen der Einzelwerte von der Hauptachse (Scores) ein Minimum ergeben. Die Beiträge der Variablen zu den Hauptkomponenten werden Loadings genannt und zeigen die Relationen der Variablen in den einzelnen Hauptkomponenten zueinander. Aus *Abbildung 10* (Mitte) ist klar ersichtlich, dass sich auf Ebene der Hauptkomponente 1 ME und dOM – sowie auch Rohprotein und NFC bzw. XX – diametral zu den Gerüstsubstanzen verhalten, also stark negativ korrelieren. Die Hauptkomponente 2 zeigt, dass sich Rohprotein und NFC bzw. XX – wie zu erwarten – gegensätzlich gegenüberstehen und dass auch die Gerüstsubstanzen (XF, NDF, ADF, ADL) „aufgefächert“ werden, also inhaltlich nicht ganz gleichzusetzen sind, wie ihre unterschiedliche analytische Erarbeitung auch erwarten lässt. Auch die Konservierungsform („Futter“) entscheidet deutlich über den Energiegehalt, wie auch das GLM-Modell gezeigt hat (*Tabelle 5*). Durch Hauptkomponente 3 (*Abbildung 10* Mitte rechts) hebt sich hinsichtlich der Gerüstsubstanzen besonders ADL von den übrigen ab, auch dOM und ME trennen sich stärker und werden wesentlich von Rohasche, Aufwuchs sowie Futter (d. h. Konservierungsform) beeinflusst. Auch diese Phänomene wurden im GLM-Modell sichtbar und folglich auch berücksichtigt (siehe Gleichungen in *Tabelle 5*). Besonders erwähnenswert ist, dass Hauptkomponente 1 bereits 50,3 % der Varianz erklärt und mit Hinzunahme von Hauptkomponente 2 78,6 % sowie von Hauptkomponente 3 91,2 % der Varianz erklärt werden. Das höchste mit den GLM-Modellen (*Tabelle 5*) erreichte Bestimmtheitsmaß betrug 87,4 %. In *Abbildung 10* (unten links) sind als Beispiel die Abweichungen der Werte (Scores) von der Hauptkomponente 1 und 2 angeführt.

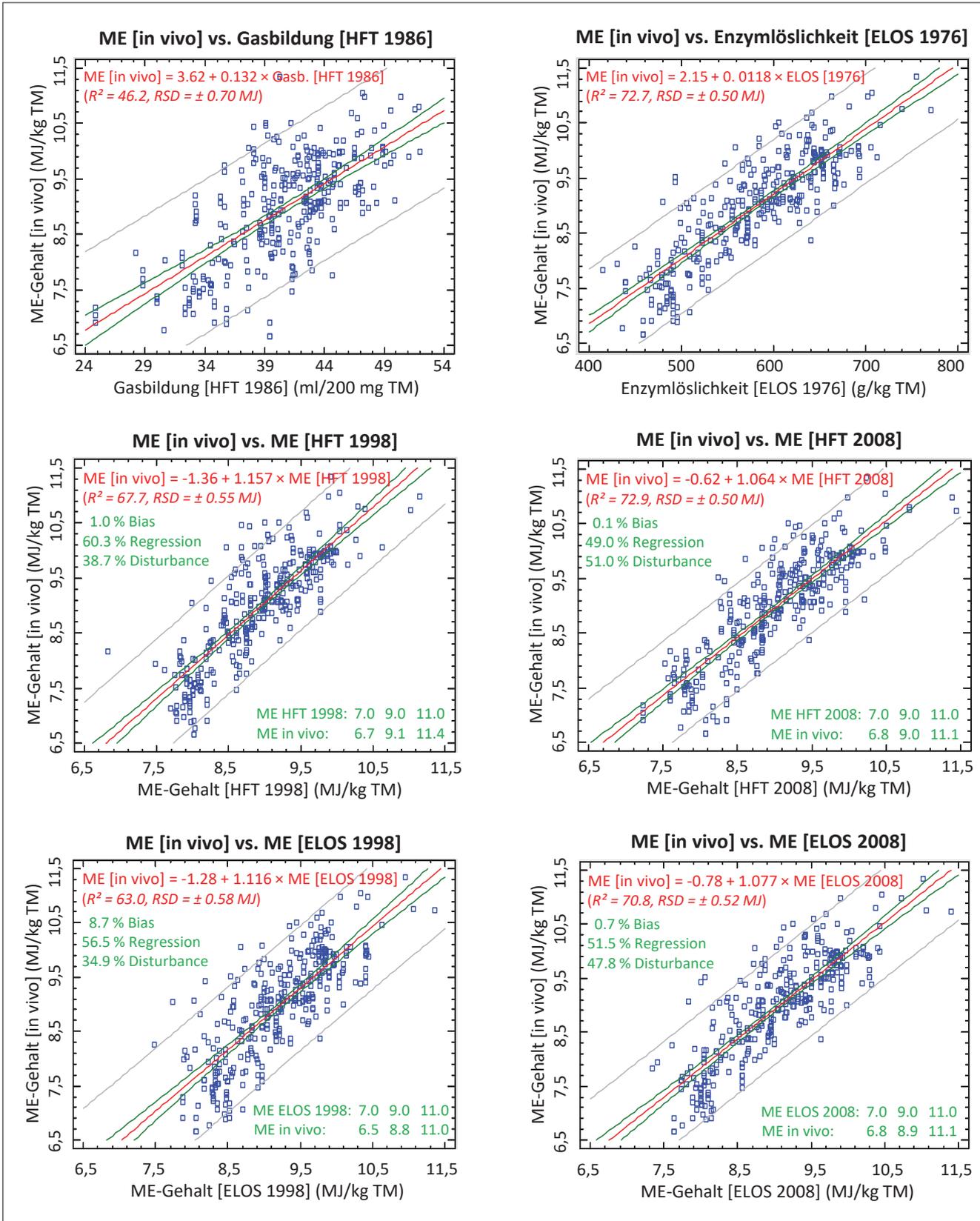


Abbildung 9: Ergebnisse der *in vitro*-Methoden (HFT, ELOS) und Validierung der Schätzgleichungen der GfE (1998, 2008) zur Ermittlung der Energiekonzentration von Grasprodukten (d. h. Grünlandfutter)

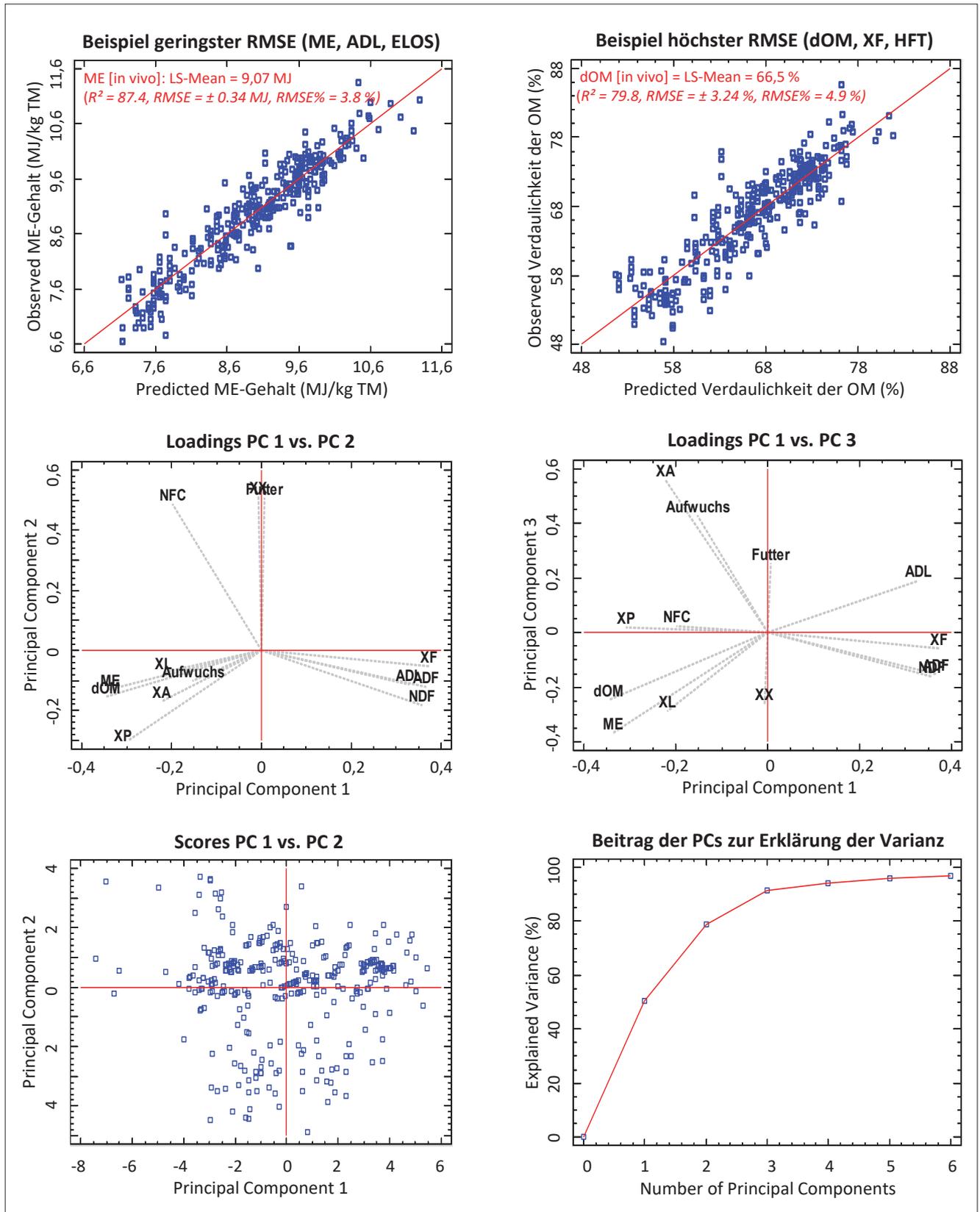


Abbildung 10: Geringste und höchste Schätzgenauigkeit der in *Tabelle 5* angeführten Regressionsgleichungen (oben). Principal Component Analyse des vorliegenden Datenmaterials (Mitte und unten) (331 *in vivo*-Verdauungsversuche der HBLFA Raumberg-Gumpenstein)

Tabelle 5: Regressionsgleichungen zur Berechnung der Energiekonzentration (MJ ME/kg TM) und der Verdaulichkeit der OM (%) auf Basis von Rohnährstoffen (g/kg TM), Gerüstsubstanzen (g/kg TM) und *in vitro*-Parametern (Gasbildung [HFT] (ml/200 mg TM), Enzymlöslichkeit (ELOS, g/kg TM)), n = 331

Art der Faser	Basis = HFT				Basis = ELOS			
	XF	NDF	ADF	ADL	XF	NDF	ADF	ADL
Berechnung der Energiekonzentration (MJ ME/kg TM)								
LS-Mean	8,970	8,962	9,028	9,022	9,023	9,016	9,048	9,070
Effekt der Konservierungsform								
Grünfütter	0,346	0,658	0,532	0,317	0,462	0,559	0,549	0,489
Silage	-0,321	-0,576	-0,410	-0,223	-0,365	-0,450	-0,405	-0,292
Heu	-0,026	-0,081	-0,122	-0,094	-0,097	-0,108	-0,144	-0,197
Aufwuchs	-0,2277	-0,2705	-0,2911	-0,0835	-0,2531	-0,2629	-0,2833	-0,1380
XP	0,0309	0,0292	0,0401	0,0332	0,0254	0,0254	0,0267	0,0171
XL	0,0377	0,0364	0,0385	0,0272	0,0016	0,0008	0,0035	-0,0071
XF	-0,0105	-	-	-	-0,0044	-	-	-
NDF	-	-0,0066	-	-	-	-0,0022	-	-
ADF	-	-	-0,0118	-	-	-	-0,0056	-
ADL	-	-	-	-0,0396	-	-	-	-0,0280
XA	-0,0099	-0,0117	-0,0126	-0,0060	-0,0104	-0,0109	-0,0117	-0,0084
Gasbildung (HFT)	0,1149	0,1122	0,1448	0,1057	-	-	-	-
ELOS	-	-	-	-	0,01373	0,01389	0,01361	0,01150
Gasbildung × XP	-0,000512	-0,000476	-0,000757	-0,000498	-	-	-	-
ELOS × XP	-	-	-	-	-0,0000334	-0,0000328	-0,0000362	-0,0000205
RMSE	0,412	0,406	0,394	0,419	0,365	0,368	0,360	0,341
RMSE%	4,6	4,5	4,4	4,6	4,0	4,1	4,0	3,8
R ²	81,6	82,1	83,2	81,0	85,6	85,3	86,0	87,4
Berechnung der Verdaulichkeit (%)								
LS-Mean	66,52	66,48	66,97	66,95	66,92	66,88	67,10	67,29
Effekt der Konservierungsform								
Grünfütter	2,84	5,14	4,25	2,71	3,72	4,32	4,34	3,99
Silage	-2,66	-4,52	-3,33	-1,95	-2,96	-3,48	-3,24	-2,46
Heu	-0,18	-0,62	-0,92	-0,76	-0,76	-0,84	-1,10	-1,53
Aufwuchs	-1,631	-1,966	-2,126	-0,607	-1,743	-1,818	-1,986	-0,972
XP	0,230	0,215	0,294	0,242	0,172	0,171	0,179	0,110
XL	0,191	0,180	0,196	0,111	-0,096	-0,098	-0,077	-0,149
XF	-0,0738	-	-	-	-0,0247	-	-	-
NDF	-	-0,0477	-	-	-	-0,0135	-	-
ADF	-	-	-0,0862	-	-	-	-0,0371	-
ADL	-	-	-	-0,2960	-	-	-	-0,2045
XA	-0,0016	-0,0158	-0,0228	0,0256	-0,0046	-0,0075	-0,0142	0,0082
Gasbildung (HFT)	0,890	0,863	1,098	0,805	-	-	-	-
ELOS	-	-	-	-	0,1048	0,1050	0,1022	0,0855
Gasbildung × XP	-0,00406	-0,00378	-0,00583	-0,00392	-	-	-	-
ELOS × XP	-	-	-	-	-0,000241	-0,000237	-0,000260	-0,000148
RMSE	3,24	3,18	3,09	3,24	2,85	2,86	2,81	2,67
RMSE%	4,9	4,8	4,6	4,8	4,3	4,3	4,2	4,0
R ²	79,8	80,6	81,7	79,8	84,3	84,2	84,8	86,3

Zum besseren Verständnis der Formeln wird ein Beispiel zur Berechnung der Energiekonzentration auf Basis der in *Tabelle 5* angegebenen Koeffizienten angeführt.

Allgemeine Form der Gleichung:

$$y = \text{LS-Mean} + \text{Effekt}[\text{Konserv.}] + \text{Regr.koeff.}[\text{Aufw.}] \times (\text{Aufw.} - 1,596) + \text{Regr.koeff.}[\text{XP}] \times (\text{XP} - 141,2) + \text{Regr.koeff.}[\text{XL}] \times (\text{XL} - 21,9) + \text{Regr.koeff.}[\text{ADF}] \times (\text{ADF} - 321,6) + \text{Regr.koeff.}[\text{XA}] \times (\text{XA} - 106,7) + \text{Regr.koeff.}[\text{ELOS}] \times (\text{ELOS} - 579,1) + \text{Regr.koeff.}[\text{XP} \times \text{ELOS}] \times ((\text{XP} \times \text{ELOS}) - (141,2 \times 579,1))$$

Beispiel: ME, ELOS, ADF, Silage, 2. Aufwuchs, 150 g XP, 25 g XL, 280 g ADF, 115 g XA, 650 g ELOS (in der TM)

$$\text{ME} = 9,048 + (-0,405) + (-0,2833) \times (2 - 1,596) + 0,0267 \times (150 - 141,2) + 0,0035 \times (25 - 21,9) + (-0,0056) \times (280 - 321,6) + (-0,0117) \times (115 - 106,7) + 0,01361 \times (650 - 579,1) + (-0,0000362) \times ((150 \times 650) - (141,2 \times 579,1)) = \mathbf{9,306 \text{ MJ}}$$

Die Formeln erfordern für die jeweiligen Regressionsvariablen das arithmetische Mittel des Datenmaterials aus der vorliegenden Untersuchung:

Variable	Aufwuchs	XP	XL	XF	NDF	ADF	ADL	XA	Gasb.[HFT]	ELOS
Mittelwert	1,596	141,2	21,9	283,0	536,5	321,6	39,0	106,7	40,60	579,1

3.4 Nutzung von Verdauungskoeffizienten aus Futterwerttabellen

Wie bereits ausgeführt, scheidet die Durchführung von *in vivo*-Verdauungsversuchen für Futterproben aus der landwirtschaftlichen Praxis aus Zeit-, Aufwands- und Kostengründen aus. Doch sind auch *in vitro*-Verdaulichkeitsuntersuchungen mit erheblichem Aufwand an Zeit und Kosten verbunden. Daher wird abschließend analysiert, wie sich die Verdauungskoeffizienten verschiedener Futtermittel-Tabellenwerke aus der Literatur für die Berechnung der Energiekonzentration des vorliegenden Datenmaterials eignen (331 *in vivo*-Verdauungsversuche der HBLFA Raumberg-Gumpenstein). Folgende Futtermittel-Tabellenwerke wurden zur Untersuchung herangezogen:

- DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer (1997)
- DDR-Futterbewertungssystem (1986) bzw. Rostocker Futterbewertungssystem (2004)
- INRA Ruminant Nutrition (1989)
- RAP Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer (1999)
- ÖAG Futterwerttabellen für das Grundfutter im Alpenraum (2017)
- Rosenau-Tabelle (2001)

In *Abbildung 11* sind für die einzelnen Futterwerttabellen und die in dieser Arbeit diskutierten Wiesenfutter-Kategorien [Konservierungsform (Grünfutter, Silage, Heu) × Aufwuchs (1. Aufwuchs, Folgeaufwüchse)] die Beziehungen zwischen dem Rohfasergehalt und der Energiekonzentration angeführt. Zur Einordnung der vorliegenden Meta-Analyse sind auch deren Ergebnisse aus den Verdauungsversuchen der HBLFA Raumberg-Gumpenstein mit dargestellt. Es zeigt sich, dass je nach Futterkategorie die Beziehungen ME vs. Rohfaser doch recht unterschiedlich ausfallen und somit die Anwendung der Beziehungen je nach Futterwerttabelle zu unterschiedlichen ME-Gehalten in Abhängigkeit vom Rohfaser-Gehalt führen würde. Auch der Anstieg des ME-Gehaltes in Abhängigkeit vom Rohfaser-Gehalt fällt in den einzelnen Futterwerttabellen unterschiedlich aus. Die Unterschiede zwischen den Tabellen sind besonders ausgeprägt bei Grünfutter (Folgeaufwüchse) und Silage (1. Aufwuchs), weniger dagegen bei Silage (Folgeaufwüchse) und bei Heu (beide Aufwüchse). Mit Ausnahme von Grünfutter und Silage (jeweils Folgeaufwüchse) liegen die Ergebnisse der Gumpensteiner Verdauungsversuche im mittleren Bereich, fügen sich also sehr gut in das Bild der Literaturdaten ein. Was die bisher im Futtermittellabor Rosenau verwendeten Verdauungskoeffizienten der DLG-Tabelle (1997) betrifft, so stimmen sie hinsichtlich Grünfutter in beiden Aufwuchs-Kategorien recht gut mit der Verdaulichkeit aus den Gumpensteiner Verdauungsversuchen überein, ebenso bei Heu (1. Aufwuchs), ergeben jedoch deutlich höhere Energiekonzentrationen bei Grassilage (1. Aufwuchs) und Heu (Folgeaufwüchse). Gute Übereinstimmungen der Gumpensteiner Verdauungsversuche zeigen sich auch gegenüber den Verdaulichkeitswerten der DDR-Futterwerttabelle (1986, 2004). Mit Ausnahme von Grünfutter (Folgeaufwüchse) fügen sich auch die Daten der ÖAG-Futterwerttabelle gut in das Bild anderer Futterwerttabellen. Das gilt weniger für die Angaben von INRA (1989) und RAP (1999), wofür sowohl andere Wachstumsbedingungen als auch gewisse methodische Unterschiede als Ursache angesehen werden können. Zur weiteren Einordnung der verschiedenen Futterwerttabellen sind im Anhang auch die Gehalte an Rohprotein in

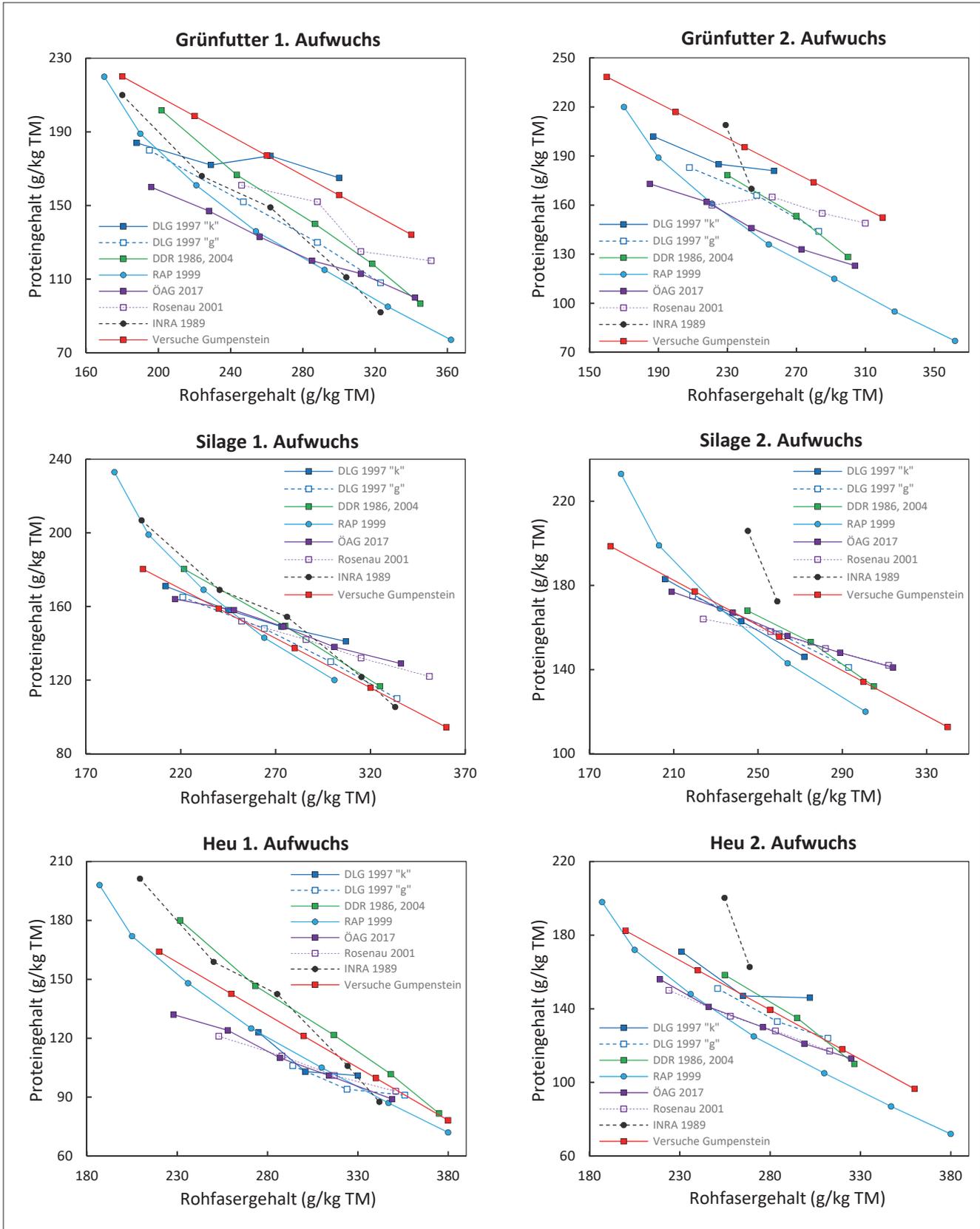


Abbildung 11: Beziehungen zwischen dem Gehalt an Rohfaser und der Energiekonzentration von Wiesenfutter in 6 verschiedenen Futtermittel-Tabellenwerken

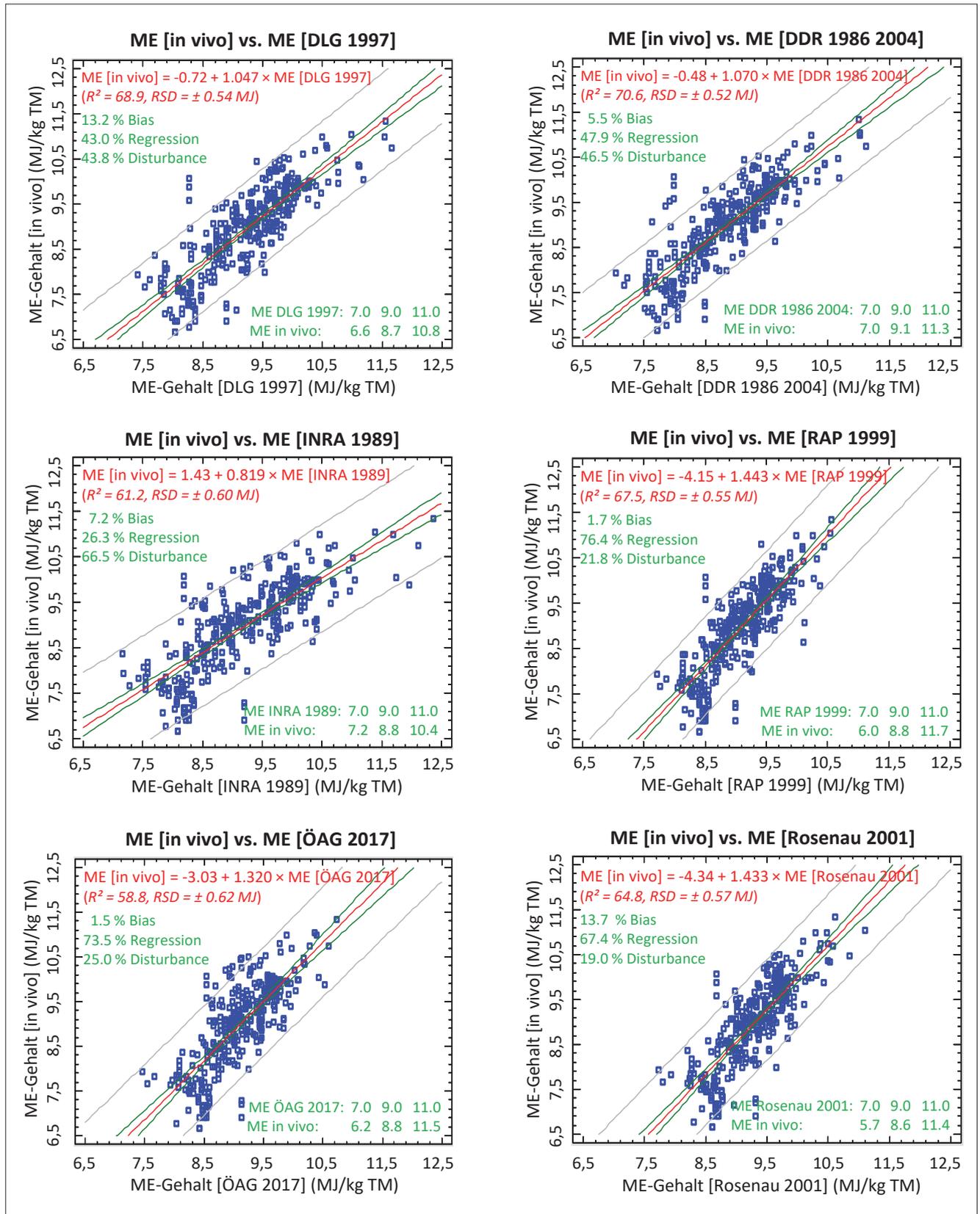


Abbildung 12: Tatsächliche, auf Basis von *in vivo*-Verdauungsversuchen berechnete Energiekonzentration („ME observed“, y-Achse) vs. auf Basis von Verdauungskoeffizienten aus Futtermitteltabellen geschätzte Energiekonzentration („ME predicted“, x-Achse)

Abhängigkeit vom Rohfasergehalt dargestellt (*Abbildung A1*). Ebenso wie hinsichtlich Energiekonzentration unterscheiden sich die Futterwerttabellen auch bezüglich des Proteingehaltes in Abhängigkeit vom Rohfasergehalt. Dies deutet nach PÖTSCH und RESCH (2005) auf unterschiedliche botanische Zusammensetzung (Anteil an Leguminosen) sowie Nährstoffversorgung des Grünlandes und Stickstoffangebot für die Pflanzen hin (Düngungsniveau).

Die Beziehungen Rohfaser vs. Verdaulichkeit (DLG 1997, DDR 1986 bzw. 2004) bzw. Rohfaser vs. Energiekonzentration (INRA 1989, RAP 1999, ÖAG 2017, Rosenau 2001) wurden in einem weiteren Schritt an den Daten der *in vivo*-Verdauungsversuche der HBLFA Raumberg-Gumpenstein angewendet ($n = 331$). Die aus den Daten der einzelnen Futterwerttabellen abgeleiteten Regressionsgleichungen (Verdaulichkeit vs. Rohfaser bzw. ME-Gehalt vs. Rohfaser) sind im Anhang in der *Tabelle A1* angeführt. Die statistischen Parameter (RMSE, R^2) zeigen, dass diese Schätzung mit hoher Genauigkeit möglich ist.

Die Ergebnisse dieser Evaluierung sind in *Abbildung 12* dargestellt. Wenn der Restfehler (RSD) und das Bestimmtheitsmaß (R^2) als Beurteilungskriterien herangezogen werden, ergibt sich folgende Rangfolge in der Genauigkeit der Vorhersage der Energiekonzentration: 1. DDR 1986, 2. DLG 1997, 3. RAP 1999, 4. Rosenau 2001, 5. INRA 1989, 6. ÖAG 2017. Allerdings müssen bei der Beurteilung auch die Koeffizienten der Regressionsgleichung (Intercept „a“, Regressionskoeffizient „b“) und die Komponenten der Varianz (Bias, Regression, Disturbance; ermittelt nach BIBBY und TOUTENBURG 1977) mitberücksichtigt werden. Im Idealfall, d. h. bei vollständiger Übereinstimmung, müsste sich ein Intercept von „0“ und ein Regressionskoeffizient von „1“ ergeben. Auch diese Kriterien sind in *Abbildung 12* angeführt, gemeinsam mit den jeweils vorausgesagten Werten gegenüber den tatsächlichen, auf Basis von *in vivo*-Verdauungskoeffizienten ermittelten Energiegehalten von 7, 9 bzw. 11 MJ ME/kg TM. Auswertungen solcher Art weisen besonders auf gegebenenfalls vorhandene Fehleinschätzungen im niedrigen und auch hohen Energiebereich hin. Sie sind somit ein wichtiges Beurteilungskriterium, in welchem Ausmaß eine bestimmte Futterwerttabelle als Basis zur Berechnung des Energiegehaltes im vorliegenden Datenmaterial geeignet ist. Unter dem Gesichtspunkt „Regressionskoeffizient“ (d. h. Abweichung von 1) ergibt sich folgende Rangordnung der Futterwerttabellen: 1. DLG 1997, 2. DDR 1986, 3. INRA 1989, 4. ÖAG 2017, 5. Rosenau 2001, 6. RAP 1999. Diese Rangordnung ist bei Rangierung hinsichtlich „Intercept“ (d. h. Abweichung von 0) nahezu identisch: 1. DDR 1986, 2. DLG 1997, 3. INRA 1989, 4. ÖAG 2017, 5. Rosenau 2001, 6. RAP 1999. Es fällt auf, dass (mit Ausnahme von INRA 1989) alle Futterwerttabellen ein negatives Intercept und einen Regressionskoeffizienten von >1 ergeben, also im Bereich niedriger Energiekonzentration zu Überbewertungen und im Bereich hoher Energiekonzentration zu Unterbewertungen führen. Dies zeigt sich auch darin, dass der auf „Regression“ (nach BIBBY und TOUTENBURG 1977) entfallende Anteil an Varianz zum Teil über 50 % beträgt, während der „Bias“ (d. h. die systematische, mittlere Abweichung) durchwegs sehr niedrig ist. Ein günstiger, d. h. niedriger Bias sagt also sehr wenig über die Güte einer Schätzformel aus, da sich Unter- und Überbewertung (erkennbar an einem von 1 abweichenden Regressionskoeffizienten) aufheben können. So beträgt der Bias (Mittelwert geschätzter ME-Gehalt minus tatsächlicher ME-Gehalt) für die Formeln DLG 1997, DDR 1986, INRA 1989, RAP 1999, ÖAG 2017, Rosenau 2001 Werte von 0,29, -0,13, 0,23, 0,12, 0,12, 0,32 MJ ME/kg TM.

Von der Schätzgenauigkeit her betrachtet ist die DDR-Tabelle (1986) also unter Beachtung aller oben angeführten Aspekte als die zutreffendste zu bezeichnen. Weiterhin unterscheidet sie sich von allen übrigen Futterwerttabellen dadurch, dass das Wiesenfutter auch differenziert wird hinsichtlich Qualität des Pflanzenbestandes, des Niveaus der Düngung und dem Erfolg der Konservierung.

Bleibt noch die Varianzursache „Disturbance“ zu interpretieren. Dies ist jener Anteil der Varianz, der nicht durch die systematisch bedingten Faktoren „Bias“ und „Regression“ zu erklären ist. Für diese Varianz-Komponente gibt es drei mögliche Ursachen: 1. Abweichungen, die ihre Ursachen im Bereich der Futterwerttabelle haben, 2. Abweichungen, die ihre Ursachen im Bereich der Verdauungsversuche haben, 3. Tatsächliche Abweichungen der individuellen Futtermittel von der Regressionsgerade.

Diese individuellen Abweichungen, die bei den Futterwerttabellen mit der besten Anpassung an die *in vivo*-Ergebnisse (DDR 1986, DLG 1997) einen Wert von 47 bzw. 44 % der Gesamtvarianz ausmachen, werden also nicht berücksichtigt, wenn die Energiebewertung auf Basis von Verdauungskoeffizienten aus diesen Futterwerttabellen erfolgt. Aus diesem Grund und auch hinsichtlich der systematischen Abweichungen in Folge von „Bias“ und „Regression“ wird daher vorgeschlagen, die Energiebewertung im Futtermittellabor Rosenau in Zukunft auf Basis von Regressionsgleichungen unter Einbeziehung der *in vitro*-Verdaulichkeit (z. B. ELOS) durchzuführen (siehe *Tabelle 5*). Bei der Anwendung dieser Gleichungen ist auch mit einem deutlich geringeren Schätzfehler zu rechnen, der je nach Faser-Komponente 0,34 bis 0,37 MJ ME gegenüber 0,52 MJ ME (DDR 1986) bzw. 0,54 MJ ME (DLG 1997) beträgt.

4. Literatur

- ÅMAN, P., 1993: Composition and structure of cell wall polysaccharides in forages. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (H.J. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield and J. Ralph, Eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 183-199.
- Autorenkollektiv (R. SCHIEMANN, K. NEHRING, L. HOFFMANN, W. JENTSCH und A. CHUDY), 1971: Energetische Futterbewertung und Energienormen. VEB Deutscher Landwirtschafts-Verlag, Berlin (Deutschland), 344 S.
- Autorenkollektiv (M. BEYER, A. CHUDY, L. HOFFMANN, W. JENTSCH, W. LAUBE, K. NEHRING und R. SCHIEMANN), 1977: DDR-Futterbewertungssystem. Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfes für Fütterung und Futterplanung. 4. Auflage, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 255 S.
- Autorenkollektiv (M. BEYER, A. CHUDY, L. HOFFMANN, W. JENTSCH, W. LAUBE, K. NEHRING und R. SCHIEMANN), 1986: DDR-Futterbewertungssystem. Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfes für Fütterung und Futterplanung. 5. Auflage, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 328 S.
- Autorenkollektiv (W. JENTSCH, A. CHUDY und M. BEYER), 2004: Rostocker Futterbewertungssystem. Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfes auf Basis von Nettoenergie. Copyright – Die Autoren, Printed by printmix24 Druckerei, Bad Doberan (D), 392 S.
- AFRC (Agricultural Food and Research Council), 1993: Energy and Protein Requirements of Ruminants. An advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to Nutrients. CAB International, Wallingford (UK), 159 S.
- BIBBY, J. und H. TOUTENBURG, 1977: Prediction and Improved Estimation in Linear Models. John Wiley & Sons, 188 S.
- COCHRAN, R.C. und M.L. GALYEAN, 1994: Measurement of *in vivo* forage digestion by ruminants. In: Forage Quality, Evaluation, and Utilization. Ed. in Chief G.C. Fahey. National Conference on Forage Quality, Evaluation, and Utilization (University of Nebraska, USA), 613-643.
- COMBS, D.K., 2013: TTNDFD: A new approach to evaluate forages. Proceedings Cornell Nutrition Conference 2013 Dept. Anim. Sci., Cornell University, Ithaca (NY, USA), 113-125.
- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), 1990: Feeding Standards for Australian Livestock – Ruminants. Standing Committee on Agriculture – Ruminants Subcommittee. CSIRO Publications, East Melbourne (Australia), 266 S.
- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), 2007: Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants (Eds. M. Freer, H. Dove, J.V. Nolan). CSIRO Publishing, Collingwood (Australia), 270 S.
- DE BOEVER, J.L., B.G. COTTYN, J.I. ANDRIES, F.X. BUYASSE und J.M. VANACKER, 1988: The use of a cellulase technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of forages. Anim. Feed Sci. Technol. 19, 247-260.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie – Ausschuss für Bedarfsnormen), 1991: Leitlinien für die Bestimmung der Verdaulichkeit von Roh Nährstoffen an Wiederkäuern. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 65, 229-234.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie – Ausschuss für Bedarfsnormen), 1995: Zur Energiebewertung beim Wiederkäuer. Mitteilungen des Ausschusses für Bedarfsnormen der GfE. Proc. Soc. Nutr. Physiol. 4, 121-123.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie – Ausschuss für Bedarfsnormen), 1998: Formeln zur Schätzung des Gehaltes an Umsetzbarer Energie in Futtermitteln aus Aufwüchsen des Dauergrünlandes und Mais-Ganzpflanzen. Proc. Soc. Nutr. Physiol. 7, 141-150.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie – Ausschuss für Bedarfsnormen), 2001: Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. No. 8. DLG-Verlag, Frankfurt/Main (Deutschland), 135 S.
- GfE (Gesellschaft für Ernährungsphysiologie – Ausschuss für Bedarfsnormen), 2008: New equations for predicting metabolisable energy of grass and maize products for ruminants. Proc. Soc. Nutr. Physiol. 17, 191-198.
- GLENN, B.P. und D.R. WALDO, 1993: Cell wall degradation in the ruminant – session synopsis. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (H.J. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield and J. Ralph, Eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 603-620.

- GOESER, J.P. und D.K. COMBS, 2009: An alternative method to assess 24-h ruminal *in vitro* neutral detergent fiber digestibility. *J. Dairy Sci.* 92, 3833-3841.
- GRUBER, L., A. STEINWIDDER, T. GUGGENBERGER und G. WIEDNER, 1991 und 1997: Interpolation der Verdauungskoeffizienten von Grundfuttermitteln der DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer. Internes Arbeitspapier der ÖAG-Fachgruppe Fütterung über die Grundlagen zur Berechnung der Verdaulichkeit auf der Basis der DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer (6. Auflage 1991 und 7. Auflage 1997).
- GRUBER, L., R. STEINWENDER und W. BAUMGARTNER, 1995: Einfluß von Grundfutterqualität und Kraftfutterniveau auf Leistung, Stoffwechsel und Wirtschaftlichkeit von Kühen der Rasse Fleckvieh und Holstein Friesian. Bericht 22. Tierzuchttagung, BAL Gumpenstein, 9.-10. Mai 1995, 1-49.
- GRUBER, L., T. GUGGENBERGER und A. SCHAUER, 1996: Aspekte, Einflussfaktoren und Bestimmung der Grundfutterqualität. Bericht 23. Tierzuchttagung, BAL Gumpenstein, 4.-5. Juni 1996, 71-105.
- GRUBER, L., A. STEINWIDDER, T. GUGGENBERGER, A. SCHAUER, J. HÄUSLER, R. STEINWENDER und B. STEINER, 2000: Einfluss der Grünlandbewirtschaftung auf Ertrag, Futterwert, Milcherzeugung und Nährstoffausscheidung. Bericht 27. Viehwirtschaftliche Fachtagung, BAL Gumpenstein, 6.-8. Juni 2000, 41-88.
- GRUBER, L., J. HÄUSLER, A. STEINWIDDER, A. SCHAUER und G. MAIERHOFER, 2006: Influence of cutting frequency in Alpine permanent grassland on nutritive value, DM yield and agronomic parameters of milk production. *Slovak J. Anim. Sci.* 39, 26-42.
- GRUBER, L., R. RESCH, A. SCHAUER, B. STEINER und C. FASCHING, 2015: Einfluss verschiedener Heutrocknungsverfahren auf den Futterwert von Wiesenfutter im Vergleich zur Silierung. 42. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 25.-26. März 2015, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 57-66.
- GRUBER, L., T. GUGGENBERGER, S. GAPPMAIER, G. TERLER und A. SCHAUER, 2021: Einfluss des Vegetationsstadiums von Dauerwiesen-Futter im Alpenraum auf die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe und Gerüstsubstanzen sowie Zusammenhänge zu *in vitro*-Verdaulichkeit und Energiegehalt. 132. VDLUFA-Kongress, Speyer, 14.-16. September 2021, Kurzfassungen, 49.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), 1989: Ruminant Nutrition. Recommended Allowances and Feed Tables (Ed. R. Jarrige). John Libbey Eurotext (London, Paris, Rome), 389 S.
- HUHTANEN, P., A. SEPPÄLÄ, M. OTS, S. AHVENJÄRVI und M. RINNE, 2008: *In vitro* gas production profiles to estimate extent and effective first-order rate of neutral detergent fibre digestion in rumen. *J. Anim. Sci.* 86, 651-659.
- JONES, D.I.H. und M.K. THEODOROU, 2000: Enzyme techniques for estimating digestibility. In: Forage Evaluation in Ruminant Nutrition. Eds. D.I. Givens, E. Owen, R.F.E. Axford und H.M. Omed. CABI Publishing, Oxon (UK) und New York (USA), 155-173.
- JUNG, H.G., 1989: Forage lignins and their effects on fiber digestibility. *Agron. J.* 81, 33-38.
- JUNG, H.G. und D.A. DEETZ, 1993: Cell wall lignification and degradability. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (H.J. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield and J. Ralph, Eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 315-346.
- KIENDLER, S., L. GRUBER, G. TERLER, M. VELIK, D. EINGANG, A. SCHAUER und M. ROYER, 2019: Einfluss des Konservierungsverfahrens von Wiesenfutter auf Futterwert, Futteraufnahme und Milchleistung. 46. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 97-109.
- McDONALD, P., A.R. HENDERSON und S.J.E. HERON, 1991: The Biochemistry of Silage. Chalchombe Publications, 2nd Edition, Aberystwyth (UK), 340 S.
- MENKE, K.-H. und H. STEINGASS, 1988: Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development* 28, 7-55.
- NorFor, 2011: Nordic Feed Evaluation System (Ed. H. Volden), EAAP Publication No. 130, Wageningen Academic Publishers, Wageningen (NL), 180 S.

NRC (National Research Council), 2001: Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Edition, National Academy Press, Washington D.C. (USA), 381 S.

ÖAG Futterwerttabellen für das Grundfutter im Alpenraum (R. RESCH, T. GUGGENBERGER, L. GRUBER, F. RINGDORFER, K. BUCHGRABER, G. WIEDNER, A. KASAL und K. WURM), 2017: ÖAG-INFO 10/2017, 20 S.

PÖTSCH, E.M. und R. RESCH, 2005: Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Nährstoffgehalt von Grünlandfutter. 32. Viehwirtschaftliche Fachtagung, 13.-14. April 2005, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein 2005, 1-14.

RAP, 1999: Fütterungsempfehlungen und Nährwerttabellen für Wiederkäuer. 4. Auflage, Zollikofen, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, 327 S.

RESCH, R., 2021: Qualitätspotenziale bei Gras- und Maissilagen in Österreich – Erkenntnisse aus dem LK-Silageprojekt 2020. 48. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 33-67.

RESCH, R. und G. STÖGMÜLLER, 2019: Heuqualität auf österreichischen Praxisbetrieben unter besonderer Berücksichtigung der Feld- und Lagerpilzflora. 46. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal, 111-132.

RYMER, C., 2000: The measurement of forage digestibility *in vivo*. In: Forage Evaluation in Ruminant Nutrition. Eds. D.I. Givens, E. Owen, R.F.E. Axford und H.M. Omed. CABI Publishing, Oxon (UK) und New York (USA), 155-173.

SAUVANT, D. und P. NOZIÈRE, 2016: Quantification of the main digestive processes in ruminants: the equations involved in the renewed energy and protein feed evaluation systems. *Animal* 10, 755-770.

STEINGASS, H. und K.-H. MENKE, 1986: Schätzung des energetischen Futterwertes aus der *in vitro* mit Pansensaft bestimmten Gasbildung und der chemischen Analyse. 1. Untersuchungen zur Methode. *Übers. Tierernährg.* 14, 251-270.

Statgraphics Centurion 19, 2020: Statistical Analysis and Data Visualization Software.

ST-PIERRE, N.R., 2001: Integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model technology. *J. Dairy Sci.* 84, 741-755.

TILLEY, J.M.A. und R.A. TERRY, 1963: A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *J. Br. Grassl. Soc.* 18, 104-111.

Universität Hohenheim – Dokumentationsstelle, 1991: DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer, 6. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a. M. (Deutschland), 112 S.

Universität Hohenheim – Dokumentationsstelle, 1997: DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer, 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt a. M. (Deutschland), 212 S.

VAN DER HONING, Y. und A. STEG, 1990: Comparison of energy evaluation systems of feeds for ruminants. In: *Feedstuff Evaluation* (Eds. J. Wiseman and D.J.A. Cole), University Press Cambridge (UK), Butterworth (London etc.), 1-19.

VAN SOEST, P.J., 1967: Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. *J. Anim. Sci.* 26, 119-128.

VAN SOEST, P.J., 1994: *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd Edition, Cornell University Press, Ithaca, New York (USA) and London (UK), 476 S.

VAN SOEST, P.J., D.R. MERTENS und B. DEINUM, 1978: Preharvest factors influencing quality of conserved forage. *J. Anim. Sci.* 47, 712-720.

VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, 2012: *Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch)* - Bd. III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

WEIMER, P.J., 1993: Microbial and molecular mechanisms of cell wall degradation – session synopsis. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (H.J. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield and J. Ralph, Eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, 485-498.

WEISS, W.P., 1994: Estimation of digestibility of forages by laboratory methods. In: Forage Quality, Evaluation, and Utilization. Ed. in Chief G.C. Fahey. National Conference on Forage Quality, Evaluation, and Utilization (University of Nebraska, USA), 644-681.

WIEDNER, G., T. GUGGENBERGER und H. FACHBERGER, 2001: Futterwerttabelle der Österreichischen Grundfuttermittel. Niederösterreichische Landeslandwirtschaftskammer. Eigenverlag, 125 S.

WOOLFORD, M.K., 1984: The Silage Fermentation. Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 350 S.

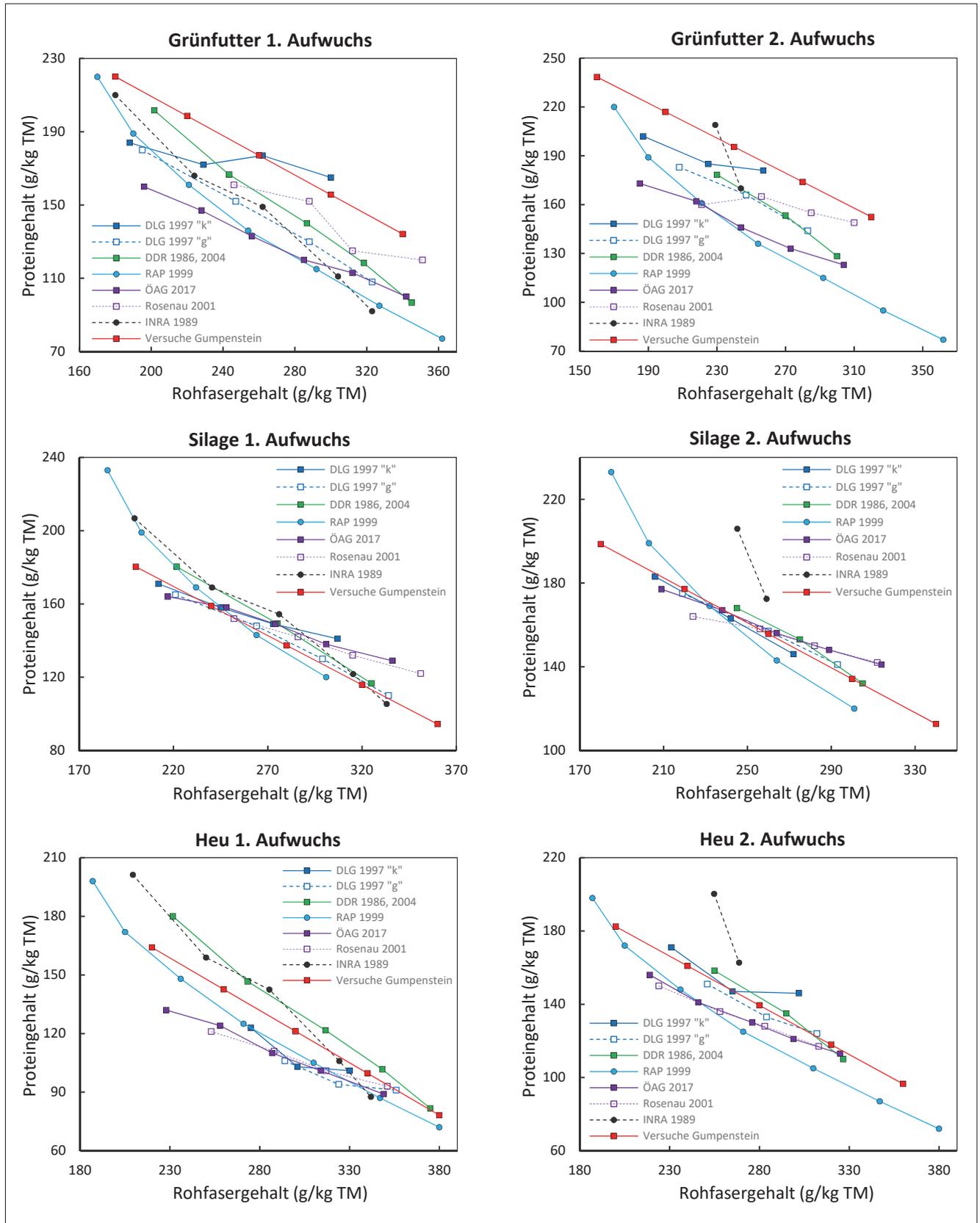


Abbildung A1: Beziehungen zwischen dem Gehalt an Rohfaser und dem Proteingehalt von Wiesenfutter in 6 verschiedenen Futtermittel-Tabellenwerken

Tabelle A1: Errechnung der Verdaulichkeit von Rohfett, Rohfaser und organischer Masse (dXL, dXF und dOM, %) sowie Energiekonzentration (ME, MJ/kg TM) in Abhängigkeit vom Gehalt an Rohfaser in verschiedenen Futterwert-Tabellenwerken ¹⁾

Variable	Grünfütter				Silage				Heu				Statistische Parameter			
	1. Aufwuchs		Folgeaufwüchse		1. Aufwuchs		Folgeaufwüchse		1. Aufwuchs		Folgeaufwüchse		MW	n	RMSE	R ²
	LSM _{Var}	b _{Var}														
DLG 1997																
dXL	54,36	-0,0679	53,53	0,0767	66,52	-0,0043	60,60	-0,0899	56,93	-0,1893	47,71	-0,1825	264,3	38	4,62	73,9
dXF	74,67	-0,0862	72,41	-0,0478	74,98	-0,0552	71,98	-0,0814	73,11	-0,1318	69,48	-0,1219	262,8	38	2,07	83,2
dOM	73,80	-0,1026	71,15	-0,0595	72,73	-0,0706	69,40	-0,0512	73,25	-0,1573	68,97	-0,1547	262,8	38	1,20	94,7
ME	10,329	-0,01755	9,925	-0,00802	10,106	-0,01244	9,563	-0,00760	10,281	-0,02474	9,548	-0,02192	263,9	39	0,179	95,5
DDR 1986																
dXL	59,94	-0,0463	56,96	-0,0518	55,98	-0,0283	54,21	-0,0838	55,72	-0,0840	51,12	-0,1448	284,5	72	1,70	88,9
dXF	66,40	-0,1809	67,85	-0,1266	66,97	-0,1296	66,40	-0,1629	66,21	-0,1391	66,38	-0,1498	284,5	72	1,06	97,7
dOM	67,12	-0,1588	66,21	-0,1315	65,09	-0,1474	63,33	-0,1691	65,64	-0,1460	63,40	-0,1386	284,5	72	1,02	97,9
ME	9,388	-0,02129	9,193	-0,01640	8,937	-0,01806	8,716	-0,02150	9,037	-0,01974	8,670	-0,01802	284,5	72	0,169	96,8
INRA 1989																
ME	10,070	-0,02129	9,617	-0,02667	10,034	-0,02215	9,675	-0,02714	9,685	-0,02041	9,410	-0,02571	265,1	21	0,442	82,0
RAP 1999																
ME	9,825	-0,01285	9,825	-0,01285	9,682	-0,01593	9,682	-0,01593	9,249	-0,01200	9,249	-0,01200	259,8	38	0,070	99,4
ÖAG 2017																
ME	9,634	-0,01117	9,085	-0,01195	9,789	-0,01406	9,422	-0,01096	9,393	-0,01616	9,209	-0,01282	268,8	31	0,033	99,7
Rosenau 2001																
ME	9,931	-0,01439	9,479	-0,00753	9,791	-0,01173	9,323	-0,00676	9,443	-0,01662	9,015	-0,01181	284,8	24	0,098	96,0

¹⁾ Allgemeine Form der Gleichung:

$$y = \text{LSM}_{\text{Var}} + b_{\text{Var}} \times (\text{XF} - \text{MW})$$

Beispiel: dOM = Silage, 2. Aufwuchs, 250 g Rohfaser (DLG 1997)

$$\text{dOM} = 69,40 + (-0,0512 \times (250 - 262,8)) = 70,06 \%$$