



Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen



Projektbericht

Projektförderung: GMES-Dienste für den öffentlichen Bedarf in Deutschland
Finanzierung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Förderkennzeichen: 50EE1318
Geschäftszeichen:
Projektlaufzeit: 01.04.2014 – 31.3.2016

Projektleiter: Dr. Stephan Hartmann

Projektbearbeiter: Dr. Kerstin Grant

Herausgegeben im: Oktober 2016

Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen

Kurztitel: SatGrünschnitt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	9
I. Kurze Darstellung	11
I.1 Aufgabenstellung	11
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	11
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	11
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	12
I.5 Zusammenarbeit	14
II. Eingehende Darstellung	16
II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	16
A Satellitenkomponente	16
A.1 Schnittdetektion.....	16
A.1.1 Datengrundlage	16
A.1.2 Methode.....	16
A.1.2.1 Aufbereitung der Radaraufnahmen	16
A.1.2.2 Ratiobildung	17
A.1.2.3 Analyse der Amplitudenratios.....	17
A.1.3 Detektionserfolg	17
A.2 Einzelpaarvergleich	20
A.2.1 Speckle-Reduktion	20
A.2.2 Polarisierung.....	22
A.2.2.1 Dual polarimetrische Daten.....	22
A.2.2.2 VV versus HH Polarisierung	26
A.2.3 Aufnahmegeometrie	27
A.2.4 Schwellwert	27
A.2.5 Minimale Feldstückgröße.....	28
A.3 Fehlerquellen	28
A.3.1 Feuchtigkeitseinfluss auf Aufnahmezeitpunkt	28
A.3.2 Zeitlicher Abstand zwischen Sentinel-1A Aufnahmen	28
A.3.3 Abstand Aufnahmezeitpunkt zum Schnitt.....	29
A.3.4 Einfluss Feldstückgröße auf Detektionserfolg:	29
A.4 Zeitreihenanalyse	29
A.4.1 Schnittfrequenzen für ganzjährig kartierte Felstücke.....	29

A.4.2	Schnittfrequenzen für Testgebiet	31
A.4.3	Ertragsabschätzung anhand Schnittfrequenz.....	32
A.5	Eingrenzung Schnittzeiträume durch RADOLAN Niederschlagsdaten	33
A.6	Klassifikation von Grünlandflächen.....	35
A.6.1	Datengrundlage	36
A.6.2	Methode.....	36
A.6.3	Ergebnis der Merkmalsklassifikation.....	36
A.7	Operationalisierung	38
B	Modellkomponente	40
B.1	Anpassung eines Grünlandertragsmodelles	40
B.1.1	Datengrundlage	41
B.1.2	Methodenbeschreibung	42
B.1.3	Ergebnisse	43
B.2	Ausblick	43
II.2	Zahlenmäßiger Nachweis der wichtigsten Positionen	45
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	45
II.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse	45
II.5	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	46
	Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Übersicht der Nährstoffabfuhr des Grünlandes in Abhängigkeit von Nutzungsintensität und Wiesentyp; Nettoerträge und Nettoabfuhr bei Silagenutzung mit max. 20% Heuanteil (Wendland, et al., 2012).....	13
Abb. 2: Unterschiede in der Radarrückstreuintensität (sichtbar als Wechsel von dunkelgrau zu hellgrau) aufgrund durch Schnittnutzung verursachter Oberflächenveränderung auf Grünlandflächen (weiß umrandet); Radaraufnahmen des COSMO-SkyMed System vom 3. und 15. Oktober 2014 wurden von e-GEOS zur Verfügung gestellt. Radaraufnahmen vom 5. und 17. Oktober 2014 sind frei verfügbare Sentinel-1A aufnahmen.	18
Abb. 3: Visueller Vergleich der VV und VH Amplituden zwischen 27.4. und 9.5. im AOI Bruckmühl.....	23
Abb. 4: Amplitudenbilder Feld 10 vom 27.4. und 9.5. skaliert zwischen -27 und -7 dB	24
Abb. 5: FID 10 - Histogramme der Sentinel-1A Amplituden 27. April und 9. Mai	25
Abb. 6: FID 10 - Histogramme der Sentinel-1A Amplituden 27. April und 9. Mai	25
Abb. 7: : Häufigkeit der Schnitte im Testgebiet im Jahr 2015 detektiert auf Basis von Sentinel-1A.....	31
Abb. 8: Häufigkeit der Schnitte im Testgebiet im Jahr 2015 detektiert auf Basis COSMO-SkyMed Daten	32
Abb. 9: Ermittelte Schnittzeiträume aus Kombination aller Radaraufnahmen im Beobachtungszeitraum 10.4.-17.5.2015 (A) sowie Schnittzeiträume korrigiert mit Hilfe von RADOLAN-Tagesniederschlagsdaten (B); Quelle des unterlegten Satellitenbildes: ESRI	34
Abb. 10: Ausschnitt multitemporale Cosmo-SkyMed Aufnahmen 02./10./14. Mai 2015 (A) und Klassifikationsergebnis (B) (multitemporal, 5 Klassen, weiß umrandete Flächen = Grünland).....	37
Abb. 11: Programmstrukturplan der einzelnen Prozessabläufe der Methode zur satellitengestützten Schnitttermindetektion.....	38
Abb. 12: Beschreibung der Methode zur Schnitttermindetektion in UML.....	39
Abb. 13: Skizze der Kombination der satellitengestützten Schnitttermindetektion (dunkelgrau) mit einem Ertragsmodell zur flächendeckenden Ertragsmodellierung (hellgrau)	40
Abb. 14: Grünlandanbauggebiete in Bayern – von 12 Anbaugbietstypen von Grünland in Deutschland liegen nach Angaben des Julius-Kühn-Institutes 8 innerhalb Bayerns.....	44

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Monatliche Niederschlagssummen (langjähriges Mittel (11 Jahre) und 2015 in mm) an der LfL Versuchsstation Karolinenfeld, Landkreis Rosenheim (Quelle: Agrarmeteorologie Bayern).....	20
Tab. 2: Reduktionsfaktoren für verschiedene Bildprodukte.....	21
Tab. 3: Unterschiede zwischen 27.4. und 9.5 in den S-1 Amplituden von geschnittenen und ungeschnittenen Feldern.....	26
Tab. 4: Ergebnisse der Detektion von Grünlandschnitten auf Grundlage von COSMO-SkyMed Aufnahme (multitemporal gefiltert) aus ascending und descending Orbits im Mai 2015	27
Tab. 5: Vergleich der mittels COSMO-SkyMed (CSK) oder Sentinel-1A (S1) Radardaten detektierten und wahren, vor Ort ganzjährig kartierte Schnitte von 28 Feldstücken; grüne hinterlegte Felder verdeutlichen richtige Detektion	30
Tab. 6: Häufigkeitsverteilung der detektierte Schnittfrequenzen aus multitemporal gefilterten Radardaten zwischen 10.4. – 14.9.2015 aller Wiesenflächen im Testgebiet	31
Tab. 7: Gegenüberstellung Grünlanderträge an den Untersuchungsstandorten im Jahr 2015	32
Tab. 8: Tagesniederschlagssummen (in mm) vom 1. bis 15. Mai 2015 in allen verwendeten RADOLAN-Grids des Testgebietes	33
Tab. 9: Auswahlkriterien für mögliche Schnitttermine bei Betrachtung von täglichen und stündlichen RADOLAN-Niederschlagsdaten.....	35
Tab. 10: Projektkosten aufgeteilt in Positionen.....	45
Tab. 11: Veröffentlichungen der Ergebnisse auf Tagungen und/oder in Tagungsbänden und Zeitschriften	47

Zusammenfassung

An der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wurde in der Zeit vom 1.4.2014 bis 31.3.2016 das vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Rahmen des Programms „GMES-Dienste für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“ geförderte Projekt „Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen“ durchgeführt.

Ziel des Projektes war es, eine Verbesserung der Ertragsabschätzung über die satellitengestützte Bestimmung der Schnittzeitpunkte einzelner bekannter Flurflächen durchzuführen, da es bisher keine kostengünstige und praktikable Möglichkeit gab, flächendeckend genaue Ertragszahlen für Grünland zu erheben. Daher erfolgt bisher eine Schätzung der Erträge, die auf einer, im Verhältnis zur Fläche und Diversität, kleinen Zahl an Stichproben und Expertenwissen beruht. Schnitttermin und Schnitthäufigkeit sind neben Klima, Boden, Pflanzenzusammensetzung und Düngung wichtige ertragsbestimmende Faktoren und werden für Ertragsmodellierungen benötigt. Weiterhin werden in Abwesenheit von Ertragszahlen Düngemengen anhand Schnitthäufigkeit abgeleitet. Eine flächenhafte Erfassung der Schnitttermine und -häufigkeit kann dazu beitragen, Ertragsschätzungen zu präzisieren, sowie bei Plausibilitätskontrollen für Düngemiteleinsetz zu unterstützen. Daher ist es notwendig, eine kosten- und zeiteffiziente Methode zur Erfassung der Schnitttermine im Grünland zu finden. Mit Methoden der Fernerkundung können gut flächenhafte Veränderungen auf der Erdoberfläche erfasst werden. In dieser Studie wurde daher ein robustes technisches Verfahren entwickelt, aus frei und flächendeckend verfügbaren Radardaten des Europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus über die Veränderung der Radarwellenrückstreuung in zeitlich nah aufeinanderfolgenden Radaraufnahmen Schnittereignisse im Grünland auf Einzelschlagebene zu detektieren. Daraus konnten Schnitttermine abgeleitet werden. Diese Schnitttermine können als Eingangsdaten für eine Ertragsmodellierung dienen. Im Projekt wurde zusätzlich ein Ertrags- und Qualitätsmodell auf die Grünlandtypen im Testgebiet süd-östlich von München angepasst. Es konnte im Projekt gezeigt werden, dass dieses Verfahren der Kombination der satellitengestützten Schnittterminerfassung mit dem Ertragsmodell grundsätzlich Grünlanderträge flächendeckend und kostengünstig geschätzt werden können.

Das im Projekt entwickelte Verfahren kann künftig auf die breite Fläche angepasst werden, um eine landesweite Erfassung der Schnittzeitpunkte und verbesserte Schätzung von Grünlanderträgen zu gewährleisten.

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel der Studie ist es, eine Verbesserung der Ertragsabschätzung über die satellitengestützte Bestimmung der Schnittzeitpunkte einzelner bekannter Flurflächen durchzuführen. Es ist ein robustes technisches Verfahren zu entwickeln, das im späteren Verlauf auf die breite Fläche zu adaptieren ist, um eine landesweite Erfassung der Schnittzeitpunkte zu gewährleisten. Weiteres Ziel nach erfolgreicher Methodenentwicklung ist die Einbindung bzw. der vollständige Umstieg auf geeignete Aufnahmesysteme und Aufnahmemodi, z.B. wie sie durch Sentinel-1 bereitgestellt werden.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Erntemenge von Grünland in Bayern (wie auch in anderen Bundesländern) kann aufgrund der geringen Datendichte und einer Vielzahl von Einflussgrößen nur grob anhand weniger Versuchsergebnisse, in Fortschreibung einer mittlerweile 10 Jahre alten Erhebung und Expertenwissens abgeschätzt werden. Grund für mangelnde Datenbasis ist die traditionell unterschiedliche Erfassung am Betrieb selbst. Während Ackerfrüchte in aller Regel gehandelt werden und damit spätestens an der Erfassungsstelle des Handels gewogen und in ihrer Qualität erfasst werden, findet dies bei Grobfutter, das den Hof nur zu geringen Anteilen, wenn überhaupt, verlässt, nicht statt. Mit Methoden der Fernerkundung können flächenhafte Veränderungen auf der Erdoberfläche gut erfasst werden. Jedoch ist bisher keine kostengünstige und flächendeckende Satellitendatenbasis gegeben. Erst durch das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus ist eine solche Datenbasis in Aussicht gestellt. In dieser Studie sollen daher Sentinel-1A Radardaten auf ihre Eignung für ein Verfahren zur Bestimmung von Schnitten im Grünland geprüft werden. Über die Veränderung der Radarrückstreuung in zeitlich nah aufeinanderfolgenden Radaraufnahmen könnten Schnitte im Grünland auf Einzelschlagebene detektiert werden. Die gewonnenen Kenntnis der Schnitthäufigkeit als ertragsbestimmender Faktor kann folglich zu einer besseren Abschätzung der Grünlanderträge führen. Darüber hinaus kann eine Kombination dieser satellitengestützten Schnittterminerfassung mit einem Ertragsmodell in Zukunft Grünlanderträge flächendeckend berechnen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Machbarkeitsstudie zur Schnittterminbestimmung

- Abgrenzung Testgebiet und Erhebungszeiträume (Kosteneinsparung für Satellitenbilder)
- Schaffung einer Satellitendatenbasis (CSK, TSX, Sentinel 1A ab 2015, Prüfung Archiv (CSK; TSX))
- Erhebung der Referenzdaten (Schnitte, Erträge, Qualität)
- Entwicklung der Detektionsmethode auf Basis Radarbilder

Adaption des Verfahrens, Anpassung an Gebietscharakteristika und lokale Phänomene und Ermittlung der relevanten Randbedingungen für den operationellen Betrieb

- Zusatzdaten: RADOLAN-Niederschlagsdaten
- Ertragsmodellanpassung (Aufwuchsbeprobung, Standortfaktoren)
- Verifizierung und Optimierung der Methode und des Modells u.a. durch Referenzdaten
- Ermittlung der relevanten Randbedingungen (Fehlerquellen, Optimierungsmöglichkeiten) für den operationellen Betrieb des Verfahrens

Endauswertung und Berichtserstellung und Operationalisierung des Verfahrens

- Erstellung Schnitffrequenzkarte
- Abschätzung Grünlanderträge aus Schnitffrequenz
- Erstellung eines Automatisierungsschema Detektion
- Sensitivitätsanalyse Ertragsmodell
- Vorbereitung der Verknüpfung Detektion und Modell
- Abklärung/Prüfung möglicher Geschäftsmodelle für den Übergang in den operationellen Service
- Schulung des LfL Personals
- Publikation der Ergebnisse und Berichtserstellung für den Projektträger

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Erntemenge von Grünland kann bisher nur grob abgeschätzt werden (Diepolder, et al., 2013; Hartmann, et al., 2011). Hinweise zur Ertragshöhe könnte die Zahl der Schnitte der Grünlandaufwüchse in Verbindung mit Witterungsdaten und der Kenntnis der Bestandeszusammensetzung liefern. Jedoch liegen ebenfalls keine genauen und flächendeckenden Zahlen zur Nutzungshäufigkeit im Grünland vor. Aktuell werden diese Daten sehr personal- und zeitaufwändig an Einzelbetrieben durch Befragung vor Ort erhoben, ergänzt durch Abschätzungen vom Personal der Ämter für Landwirtschaft und Ernährung.

Erfassung des Grünlandertrages über die Nutzungshäufigkeit

Mit Methoden der Fernerkundung können flächenhafte Veränderungen auf der Erdoberfläche gut erfasst werden. Durch das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus, und dessen Sentinel-Satelliten, ergibt sich eine gute flächendeckende und kostengünstige Datenbasis für Satellitenbilder (DLR, 2014). Der erste für Copernicus entwickelte Satellit Sentinel-1A wird im Optimalfall alle 12 Tage von jeder Stelle in Europa eine Radaraufnahme machen, durch den baugleichen Satelliten Sentinel-1B (April 2016) sollte künftig eine Abdeckung alle 6 Tagen erreicht werden (ESA, 2014). Daher sollen in dieser Studie Sentinel-1 Radardaten auf ihre Eignung für die Bestimmung von Schnittterminen im Grünland getestet werden. Aus der Intensität der Rückstreuung der ausgesandten Radarwellen werden Informationen über die Erdoberfläche abgeleitet. Unterschiede in der Form, Rauigkeit oder im Wassergehalt von Oberflächen verändern die Intensität des rückgestrahlten Radarsignals (Albertz, 2001). Da sich Höhe und Form des Grünlandbestandes durch Schnitte verändern, ergeben sich Unterschiede in der Intensität der Radarrückstreuung. Durch den Vergleich von Radarsignalen zwischen zwei terminlich aufeinanderfolgenden Radaraufnahmen könnten so Schnitte festgestellt und zeitlich eingeordnet werden. Ein Vorteil bei der Nutzung von Radardaten ist die weitgehende Unabhängigkeit von Lichtquellen und Wolkenbedeckung, die bei vorherigen Ansätzen über Multispektraldaten zur Bestimmung von Nutzungstyp über Schnittereignisse sich als hinderlich erwiesen haben (Franke, et al., 2012).

Auf Grundlage der bestimmten Schnitttermine könnten Schnitffrequenzkarten für Regionen erstellt werden. Aus dieser Schnittinformation könnte dann mit Hilfe der Tabellenangaben zu Ertragswerten in Abhängigkeit von Nutzungsintensität und Wiesentyp (Abb. 1) aus der Düngeempfehlung der Landesanstalt für Landwirtschaft (Wendland, et al., 2012) der Grünlandertrag für diese Region flächendeckend abgeschätzt werden.

Anzahl der Nutzungen	Wiesentyp	TM-Ertrag (dt/ha)	Nährstoffabfuhr (kg/ha)			
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Bestände mit max. 3 möglichen Nutzungen	1 Streuwiesen	40	25	10	30	5
	1 sehr ertragsarme Standorte*	30	40	20	50	10
	1 ohne Angabe des Wiesentyps	40	50	25	60	10
	2 sehr ertragsarme Standorte*	50	70	30	110	10
	2 ohne Angabe des Wiesentyps	55	100	40	140	20
	3 obergrasreiche Wiesen allgemein	75	160	55	190	30
	3 typische Glatthaferwiesen	75	150	55	190	30
	3 Glatthaferwiesen in wechsellückiger Auenlage	70	135	45	160	25
	3 Berg-Goldhaferwiesen	70	165	55	170	30
	intensivierungsfähige Pflanzenbestände	3 Wiesenfuchsschwanzwiesen	80	170	65	220
3 Voralpine kräuterreiche Wiesen und Mähweiden		70	170	80	210	60
3 Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe **		85	180	85	260	40
3 ohne Angabe des Wiesentyps		75	165	70	220	40
4 Wiesenfuchsschwanzwiesen		85	215	75	240	35
4 Voralpine kräuterreiche Wiesen und Mähweiden		80	235	90	270	65
4 Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe		100	265	100	310	45
4 ohne Angabe des Wiesentyps		90	245	90	270	45
5 Wiesenfuchsschwanzwiesen		100	285	90	300	45
5 Voralpine kräuterreiche Wiesen und Mähweiden		90	300	105	310	70
5 Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe		110	320	110	375	50
5-6 Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe***		120	350	120	400	60
5 ohne Angabe des Wiesentyps		110	310	110	330	55

* Trockenwiesen, flachgründige Standorte, bei fehlender oder nur geringer Düngung - z. B. trockene Glatthaferwiesen

** bei dreimaliger Nutzung Umwandlung in kräuterreiche Bestände, Weidelgraswiesen/-weiden werden in der Regel 4-6 mal genutzt

*** oft reich an Bastard Weidelgras

Abb. 1: Übersicht der Nährstoffabfuhr des Grünlandes in Abhängigkeit von Nutzungsintensität und Wiesentyp; Nettoerträge und Nettoabfuhr bei Silagenutzung mit max. 20% Heuanteil (Wendland, et al., 2012)

Grünlandertragsmodellierung:

Eine mögliche Methode zur Abschätzung von teilflächenspezifischen Erträgen in der Landwirtschaft ist die Verwendung von agrometeorologischen oder pflanzenphysiologischen Modellen. Darin fließen i.d.R. standortspezifische Daten zu Klima, Nutzung, Boden und Pflanzenbestand ein. Diese Daten können zum Einen für Einzelflächen in situ erhoben oder zum Anderen über fernerkundlich abgeleitete biophysikalische Parameter (z.B. Biomasse, Blattflächenindex, fotosynthetische Aktivität) bestimmt werden. Sie dienen als Eingabe- bzw. Kalibrierdaten für die Modellierung des Ernteertrages spezifischer Fruchtarten mit hohen Genauigkeiten (Herrmann, et al., 2005; Nouvellon, et al., 2001; Aase & Siddoway, 1981; Hatfield, 1983; Oppelt, 2010). Hierbei ist die Verwendung von in situ gemessenen Ernteerträgen meist nur während der Kalibrierphase notwendig, was den Einsatz dieser Modelle nach erfolgter Kalibrierung deutlich erweitert. Jedoch muss ein pflanzenphysiologisches Modell für jede Fruchtart gesondert entwickelt bzw. kalibriert und validiert werden. Dieses erfordert eine breite Datenbasis. Für Grünland- Einzelflächen gibt es verschiedene Ansätze der Ertragsmodellierung (Herrmann, et al., 2005; Trnka, et al., 2006; Schapendonk, et al., 1998; Han, et al., 2003; Hunt, et al., 1991). Für die Modellierung von flächendeckenden Erträgen wird allerdings eine große Menge an Daten, insbesondere zur Nutzungsintensität und Ortskenngrößen für die Berechnung sowie Ertragszahlen zur Validierung, gebraucht. Daher ist die Bereitstellung eines solchen Modells als operationellen Dienst insbesondere auf lokaler und regionaler Ebene bisher noch nicht erfolgt. Die Entwicklung von neuen Ansätzen in der Modellentwicklung erscheint daher notwendig.

An der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurde bereits ein an norddeutsche Verhältnisse angepasstes Ertragsmodell erarbeitet. Das FOPROQ (FOrage PROduction Quality) ist ein Grünlandmodell, das neben der Ertragsbildung auch eine umfassende Simulation von Futterqualitätsparametern unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren, Bestandes-Charakteristika und pflanzenbaulichem Management ermöglicht (Herrmann, et al., 2005; Torssell & Kornher,

1983; Kornher, et al., 1991). FOPROQ simuliert die täglichen Änderungen von Trockenmasse-Ertrag basierend auf dem Ansatz von Angus et al. (1980), welcher fortlaufend weiter entwickelt und um ein Futterqualitätsmodell erweitert (Kornher, et al., 1991; Petersen-Fredrich, 1987) wurde.

Da sich FOPROQ unter verschiedenen klimatischen Bedingungen als zuverlässig erwiesen hat (Fagerberg & Nyman, 1994; Kornher & Torssell, 1983), können die Modellalgorithmen als allgemeingültig angenommen werden. So wird das Modell bereits unter anderem in der Offizialberatung der Landwirtschaftskammern Schleswig-Holstein und Niedersachsen zur Prognose des Erntetermins von Grünlandbeständen erfolgreich eingesetzt. Jedoch verhindert die fehlende Datenbasis eine Modellparametrisierung für eine bundesweite Prognose der Jahresleistung hinsichtlich Ertrag und Futterqualität von intensiv schnittgenutzten Grünlandbeständen.

Ertragsmodellierung bei Grünlandbeständen ist nicht Forschungsthema an der LfL. Daher ist es sinnvoll ein vorhandenes Modell kostengünstig auf die Modellregion des Projektes anzupassen. Bei Eignung des angepassten Modells für andere Regionen in Deutschland (hier Testgebiet in Bayern), und Etablierung der Methode zur Bestimmung der Schnitttermine und -frequenzen aus Sentinel-1 Radardaten, können Vorbereitungen getroffen werden die satellitengestützte Schnittdetektion mit dem Ertragsmodell zu verknüpfen um dadurch künftig möglichst personaleffizient eine exakte und regionalisierte Ertragsschätzung von Grünland und Feldfutterbaubeständen zu erhalten.

I.5 Zusammenarbeit

Die Arbeiten in diesem Projekt erfolgen in enger Zusammenarbeit (Unteraufträge) mit der GAF AG in München und der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU):

GAF AG
Arnulfstr. 197
80634 München

Hauptakteure: Dr. Robert Siegmund, Torben Vorwalter und Melanie Wagner

Die **GAF AG** bringt den stabilen Zugang für die notwendigen Satellitendaten ein, der der LfL aktuell fehlt, sowie die Expertise für deren nutzertaugliche Aufbereitung und die Erarbeitung von Lösungen, die diese auch nach Projektende der LfL verfügbar machen. Insbesondere die Beschaffung von Satellitendaten vor öffentlichem Verfügbarkeit und Zugang zu Sentinel-1A Daten ist ein wichtiger Punkt. Die GAF AG verfügt über dessen Mutterfirma éGEOS Zugang zu Daten des COSMO-SkyMed Systems, die für die Entwicklung und Validierung der Schnittdetektionsmethode gebraucht werden.

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau
Hermann-Rodewald Str. 9
24118 Kiel

Hauptakteure: Prof. Dr. Antje Herrmann, Christof Kluß, Prof. Dr. Friedhelm Taube

Ertragsmodellierung bei Grünlandbeständen ist nicht Forschungsthema an der LfL. Daher ist es sinnvoll ein vorhandenes Modell kostengünstig auf die Modellregion des Projektes anzupassen. An der CAU wurde bereits ein an norddeutsche Verhältnisse angepasstes Ertragsmodell (FOPROQ) erarbeitet. Die CAU besitzt die Expertise der Ertragsmodellierung sowie die Nutzerrechte an diesem Modell. Im Rahmen einer ersten Anpassung an bayerisches Grünland wird die CAU auch den zu erwartenden Arbeitsbedarf für eine hinreichend differenzierte Anpassung dieses Modells an die unterschiedlichen Regionen Bayerns ermitteln, um die Kosten weiterer regionaler Anpassungen abschätzen zu können.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse der Satellitenkomponente (A), d.h. die Entwicklung der Detektion von Schnittereignissen aus Radarbildern, dargestellt. Danach folgen die Ergebnisse der Modellkomponente (B).

A Satellitenkomponente

A.1 Schnittdetektion

Mit Methoden der Fernerkundung können gut flächenhafte Veränderungen auf der Erdoberfläche erfasst werden. In dieser Studie wurden Radardaten genutzt, um über die Veränderung der Radarwellenrückstreuung in zeitlich nah aufeinanderfolgenden Radaraufnahmen die Schnitttermine auf Einzelschlagebene zu detektieren. Für die Methodenentwicklung wurden zunächst hochaufgelöste COSMO-SkyMed Daten verwendet und anschließend die Eignung von Sentinel-1A Daten des europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus für die entwickelte Methode überprüft.

A.1.1 Datengrundlage

Für diese Studie standen zunächst nur COSMO-SkyMed Daten zur Verfügung, da der Sentinel-1A Satellit im April 2014 startet und nach einer Kalibrierungsphase erst ab Mitte September verlässliche Radardaten lieferte.

Die COSMO-SkyMed Daten sind hauptsächlich VV (nur einige HH) polarisierte X-Band SAR Bilddaten und liegen im Produktlevel 1A, also in Form von Single Look Complex (SLC) Daten, vor. Aufgenommen wurden die Radarszenen im HImage Modus. Die Daten sind komplexwertige Datenmatrizen, deren Werte die Intensität und Phase der Radarückstreuung enthalten. Die Pixelauflösung beträgt 3 m x 3 m. Die Sentinel-1A Daten sind hochaufgelöste, VV/VH polarisierte C-Band SAR Bilddaten und liegen als GRHD Format, Produktlevel 1 vor. Sie wurden im Interferometric Wide Swath Modus aufgenommen und haben eine Pixelauflösung von 10m x 10 m. Eine zusätzliche Anfrage an das DLR für zusätzliche TerraSAR-X Daten wurde im Sommer 2014 gestellt und bewilligt. Jedoch kam es zu Interessenskonflikten im Münchner Raum, in den unser Testgebiet noch fällt. Dadurch konnten insgesamt nur 4 TerraSAR-X Aufnahmen verwendet werden.

Referenzdaten für die Schnittereignisse im Grünland wurden ebenfalls erfasst. Dies geschah durch in situ Beobachtungen, bei denen die Schnitte auf Karten notiert bzw. per GPS Punkt registriert wurden. Notiert wurde, ob gerade geschnitten wird, ob geschnittenes Gras auf der Fläche liegt (evtl. schon als Schwad aufgereiht) oder ob die Fläche bereits frei geräumt vorlag. Anschließend wurden diese Daten in ArcGIS digitalisiert.

A.1.2 Methode

A.1.2.1 Aufbereitung der Radaraufnahmen

Für die Georeferenzierung der Radarbilder wurde zunächst eine Orthokorrektur mit einem digitalen Geländemodell (Range Doppler Terrain Correction, SRTM) und eine Reprojektion in das Koordinatensystem 3-Grad Gauss-Krüger Zone 4 vorgenommen. Für die Datenanalyse sowie für die Vergleichbarkeit der Radaraufnahmen erfolgte eine absolute, radiometrische

Kalibrierung. Die Werte wurden schließlich in logarithmischer Skalierung in Dezibel angegeben.

A.1.2.2 Ratiobildung

Die Detektion von Veränderungen wird durch den Betrag von Amplitudenratios zweier Aufnahmen zum Zeitpunkt T_1 durch Aufnahme zum Zeitpunkt T_0 erreicht. Der Vorteil der Methode liegt in der Minimierung von topographiebedingten Einflüssen, sobald die Aufnahmegeometrie konstant ist und sich somit diese Einflüsse heraus kürzen. Da Sentinel-1 einen kontinuierlichen Aufnahmeplan verfolgt, der auf interferometrische Anwendungen ausgelegt ist (also konstante Aufnahmegeometrie erfordern) ist diese Bedingung für die Ratioauswertung erfüllt. Für COSMO-SkyMed Aufnahmen wurde in der Aufnahmeplanung auf die Verwendung konstanter Aufnahmegeometrien besonderer Wert gelegt. In den Verhältnissen werden somit variable Einflüsse auf die Rückstreuintensität abgebildet, so z.B. Änderungen der Dichte und Rauigkeit, Feuchte sowie systematische Einflüsse. Der Beitrag der Bodenfeuchte und Systemeffekte kann jedoch weiträumig und zusammenhängend angenommen und somit auf Referenzfeldern (Ratiowerte auf ungeschnittenen Feldern) bestimmt werden.

Für die Detektionsrate bzw. für Störeinflüsse ist letztendlich das Signal-Rausch Verhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR) ausschlaggebend. Das SNR ergibt sich aus der mittleren Signalamplitude A_{Signal} und der Standardabweichung des Rauschens $\sigma_{Rauschen}$ zu:

$$SNR = \frac{A_{Signal}}{\sigma_{Rauschen}}$$

Aus jeweils zwei aufeinanderfolgenden Radaraufnahmen wurde der Ratio berechnet. Alle Bearbeitungsschritte wurden mit dem Softwarepaket Sarscape (unter ENVI) und ERDAS Imagine durchgeführt.

A.1.2.3 Analyse der Amplitudenratios

Zum Zweck der Visualisierung wurden die Daten als GeoTIFF (float 32bit) exportiert und zusammen mit einem Shapefile der im Gelände kartierten Grünlandflächen mit bekannten Schnittterminen in ArcGIS analysiert. Die Feldstückgrenzen der Grünlandflächen stammen aus InVeKoS-Daten (mit Nutzungsangabe Dauergrünland; Quelle: Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten). Eine Klassifizierung der Grünlandnutzung und Identifizierung der Flächen wurde nur exemplarisch getestet (siehe Abschnitt A.6). Die Nutzung von anonymisierten Feldstückinformationen aus InVeKoS bietet den Vorteil der sehr genauen Schlaggrenzen und erspart den zusätzlichen Rechenaufwand.

Für jede Grünlandfläche wurden die Grauwerte aus den Rasterdaten-Ratio extrahiert. Anhand dieser Werte wurden Mittelwerte der Grauwerte berechnet. Schnitte ergeben sich dadurch als Änderung in der mittleren Rückstreuintensität, also als Verschiebung der Grauwertverteilung zu helleren Tönen.

A.1.3 Detektionserfolg

Im Vergleich der Radaraufnahmen der jeweils zwei, 12 Tage auseinanderliegenden, Zeitpunkte im **Oktober 2014** sind Oberflächenveränderungen in den Grünlandflächen sowohl in den hochaufgelösten CSK-Daten als auch in den weniger gut aufgelösten Sentinel-1A Daten ersichtlich. Diese Veränderungen wurden durch Schnittnutzungen im Grünland verursacht, welche durch in situ Beobachtungen verifiziert werden konnten. Visuell erkennt man eine Veränderung in der Intensität, die auf den Schnitt des Grünlandes hinweisen (Abb. 2). Die Abschät-

zung der Trennbarkeit der geschnittenen von den ungeschnittenen Flächen grob erfolgte durch die Betrachtung des Amplitudenratios. Änderungen der Rückstreuintensität in den einzelnen Flächen pro Radaraufnahme im Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen wurden dadurch objektiv erkennbar. Von 154 betrachteten Grünlandflächen (insgesamt 436 ha) wurden 116 Schnitte durch den CSK-Datenvergleich und 111 Schnitte im Sentinel-1A Vergleich detektiert. Auf 25 Flächen konnten die Schnitte weder mit CSK noch mit Sentinel-1A erfasst werden. Mit den CSK Daten konnten 18 Schnitte detektiert werden, die nicht mit Sentinel-1A erfasst wurden. Im Gegensatz dazu wurden 13 Schnitte mit Sentinel-1A aber nicht mit CSK erkannt.

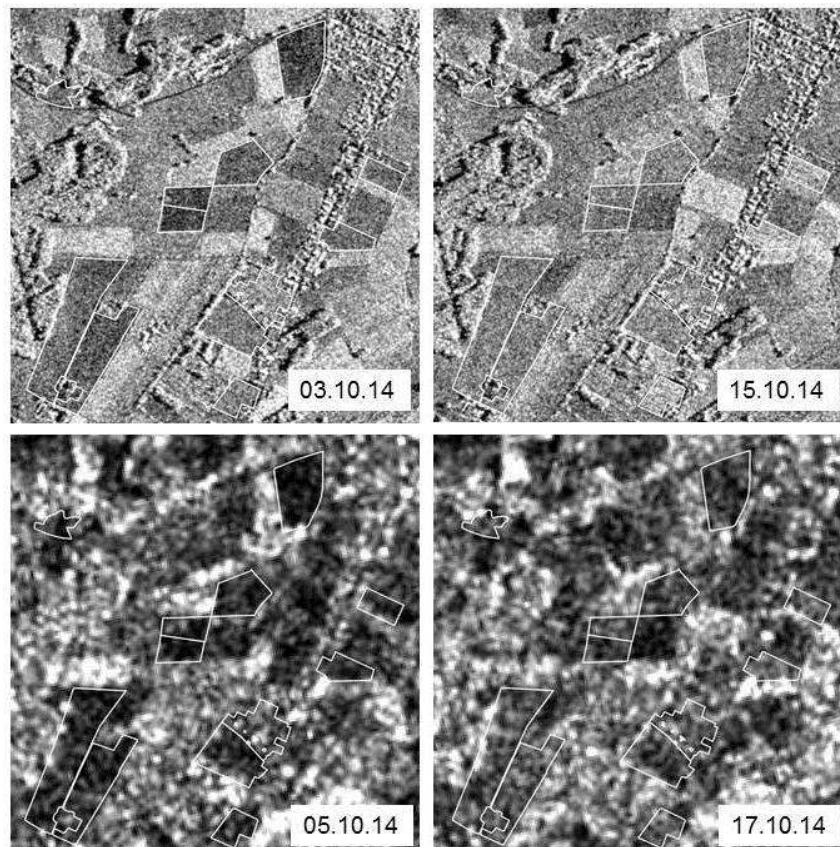


Abb. 2: Unterschiede in der Radarrückstreuintensität (sichtbar als Wechsel von dunkelgrau zu hellgrau) aufgrund durch Schnittnutzung verursachter Oberflächenveränderung auf Grünlandflächen (weiß umrandet); Radaraufnahmen des COSMO-SkyMed System vom 3. und 15. Oktober 2014 wurden von e-GEOS zur Verfügung gestellt. Radaraufnahmen vom 5. und 17. Oktober 2014 sind frei verfügbare Sentinel-1A aufnahmen.

Dieser Vergleich zeigt, dass Schnitte im Grünland durch den Vergleich von zeitlich nah aufeinander folgenden Radarbildern detektiert werden können. In dieser Studie konnten 74% aller bekannten Schnitte mit beiden SAR Systemen trotz ihrer unterschiedlichen Aufnahmegeometrien (z.B. Polarisation, Wellenlänge, Pixelauflösung, Aufnahmeuhrzeit) und trotz des langen Zeitabstandes (12 Tage) erfasst werden. Möglicherweise könnten spezifische Feldbedingungen wie Wind, Bodentyp, Feuchtigkeit und Bäume oder auch Management dazu geführt haben, dass 25 Schnitte nicht detektiert wurden (Bouman & van Kasteren, 1990; Boumann & van Kasteren, 1990). Die gröbere Auflösung und unterschiedliche Radarwellenlänge (C-Band) der Sentinel Daten könnten zur fehlenden Detektion der Schnitte auf 18 Grünlandflächen geführt haben. Zoughi et al. (1987) berichtet zum Beispiel, dass im Vergleich zu X-Band Aufnahmen, eher Bodeneigenschaften der dominante Faktor in der Radarsignalarückstreuung von Grünland bei C-Band Aufnahmen waren. Hingegen scheint die VV Polari-

sation der Sentinel-1 Daten von Vorteil zu sein und zur Detektion der 13 Schnitte, die nicht mit CSK detektiert werden konnten, geführt zu haben. Dies liegt daran, dass horizontale Polarisation (HH) scheinbar sensitiver auf horizontale Objekte wie z.B. Bodenoberflächen reagiert, und die vertikale Polarisation (VV) eine stärkere Rückstreuung von dem Grasbestand bewirkt (Zoughi, et al., 1987). Durch ihre gröbere Auflösung, und damit geringere Pixelzahl pro Fläche, die die Grauwertmittel bilden, sind die Ergebnisse auf Grundlage der Sentinel Daten weniger zuverlässig als die aus CSK Daten gewonnenen. Für eine Generalisierung und Validierung der Ergebnisse folgten im Jahr 2015 daher weitere Analysen, die mehr Grünlandflächen über ein ganzes Jahr betrachten und mehr Radaraufnahmen beinhalten. Eine Detektionsrate von 74% im Oktober 2014 ist für verlässliche Schnitthäufigkeitsschätzungen noch nicht als zufriedenstellend zu betrachten. Daher wurde ebenfalls überprüft werden, ob durch Bildprozessierungsschritte (wie z.B. Specklefilterung) oder durch andere Methoden das Ergebnis verbessert werden kann. Grünland ist ein sehr dynamisches System und kann innerhalb weniger Tage eine Wuchsveränderung von ca. 10 cm bei optimalen Bedingungen zeigen, so dass durch eine höhere zeitliche Auflösung der Radarbilder die Veränderung durch Wuchs besser erfasst werden könnte.

Für das **Jahr 2015** waren Sentinel-1A Daten in regelmäßigen Abständen von 12 bzw. 24 Tagen (Ausnahmen Ende September/Oktober 48 Tage) während der gesamten Vegetationsperiode (April-Oktober) verfügbar. Zusätzlich konnten zu den Hauptschnittzeiträumen im Testgebiet COSMO-SkyMed Daten (Abstände 1-9 Tage) erworben werden. Leider konnten wegen Interessenkonflikte bei der Bestellung von Aufnahmen im Münchner Raum nur vier zusätzlichen TerraSAR-X Aufnahmen für das Testgebiet hinzugezogen werden (22.6./3.7. und 19.6./30.6.). Alle Detektionsergebnisse sind in Tabelle A1 im Anhang aufgelistet:

Der erste Schnitt Anfang Mai konnte sehr gut mittels Sentinel-1A sowie COSMO-SkyMed Aufnahmen detektiert werden. In diesem Zeitraum wurde das Testgebiet mit Sentinel-Aufnahmen von zwei descending Orbits (168, 95) abgedeckt, so dass die Aufnahmepaare 27.4.-9.5. und 9.5.-2.6. bzw. 4.5.-16.5. und 16.5.-9.6. ausgewertet werden konnten. Die Detektionsrate der im Testgebiet kartierten Schnitte lag hier bei 82,9% und 77,3% bzw. bei 91,7% und 69,6%. Im vergleichbaren Zeitraum gab es 6 COSMO-SkyMed Aufnahmen, wovon drei vom descending (1., 9. und 17.5.) und drei vom ascending Orbit (2., 10. und 14.5.) aufgenommen wurden. Aus dem Vergleich der descending Aufnahmen konnten 83,5% bzw. 87,9% der kartierten Schnitte richtig erfasst werden.

Allgemein kamen fehlerhafte Detektionen in der Regel durch falsch erkannte Schnitte zustande: d.h. es fanden keine tatsächlichen Schnitte vor Ort statt, aber laut Radarbild wurden Oberflächenänderungen registriert, die auf Schnitte hindeuteten. Tatsächliche Schnitte, die nicht vom Radarbild erfasst wurden, waren eher seltener. Es sieht danach aus, als würden mehr Schnitte nicht erkannt, wenn die Abstände zwischen den Radaraufnahmen größer werden (S1: 24 Tage, CSK: >8). (siehe auch Abschnitt A.3.2)

Im Verlauf des Jahres ist erkennbar (Tabelle A1 Anhang), dass niedrige Detektionsraten vor allem bei dem Vergleich von Sentinel-Bildpaaren auftraten, die 24 Tage auseinander lagen, insbesondere im Zeitraum Juni bis August. Hierbei könnte die ungewöhnlich niedrigen Niederschläge im Testgebiet eine Rolle für evtl. langsamere und geringere Aufwuchs des Grasses, und damit für kaum Veränderungen in der Oberflächenstruktur gespielt haben. Tab. 1 zeigt die deutlich geringeren Niederschlagssummen im Juni, Juli und August. Dieses Phänomen kann durch geringe Detektionsraten auf Basis der COSMO-SkyMed Aufnahmen im gleichen Zeitraum bestätigt werden. Außerdem zeigen sowohl Sentinel als auch COSMO-SkyMed Da-

ten, dass im September 2015 schlechte Detektionsergebnisse erzielt wurden. Die Ursache hierfür ist nicht eindeutig.

Tab. 1: *Monatliche Niederschlagssummen (langjähriges Mittel (11 Jahre) und 2015 in mm) an der LfL Versuchsstation Karolinenfeld, Landkreis Rosenheim (Quelle: Agrarmeteorologie Bayern)*

Monat	Mittelwert 2004-2014	2015	Differenz
1	63	77	14
2	46	20	-26
3	66	58	-8
4	61	53	-9
5	132	185	54
6	161	96	-64
7	155	47	-108
8	157	51	-106
9	92	83	-9
10	66	68	2
11	51	44	-7
12	53	22	-30
Summe	1102	804	

A.2 Einzelpaarvergleich

A.2.1 Speckle-Reduktion

Zur Minimierung des Speckle wird gerade für die hochauflösenden (3m) Aufnahmen des COSMO-SkyMed eine adaptive Filterung angewandt, um die Feldstrukturen zu erhalten sowie Mittelungseffekte über Feldgrenzen hinweg (also Werte benachbarter Felder nicht in die Grünlandfelder zu übertragen) auszuschließen und somit nur die lokale Streuung innerhalb eines homogenen Areals zu verringern. Im Gegensatz dazu müssen Sentinel-1 Daten nicht gefiltert werden. Dies liegt darin begründet, dass

- i) durch das resampling der ursprünglichen 5m x 20 m Auflösung auf 20m x 20m bereits ein Multilooking und somit eine Specklereduktion bedeutet und
- ii) die erzeugte 20 m Auflösung erhalten bleiben sollte, da im AOI auch geringere Feldgrößen zu finden sind und somit eine zuverlässige Filterung unter diesen Voraussetzungen nicht mehr gewährleistet ist.

Zur Speckle-Reduktion wurden gängige adaptive Filtertechniken untersucht und die geeignetsten verwendet, wie z.B. Frost, Lee, Gamma-Map und multitemporale Filter. Im Allgemeinen reduzieren diese Verfahren die Standardabweichung in den SAR-Bildern und dadurch das Specklerauschen. Zur statistischen Beschreibung des Speckle wird ein multiplikatives Rauschmodell zu Grunde gelegt, wobei sich das Rauschen generell mit der Erhöhung der Anzahl von Looks verringert, sei es durch Multilook Prozessierung oder Filterung. Für derartig erzeugte Bilder reduziert sich die Standardabweichung σ um die Wurzel der Anzahl von Looks N .

$$\sigma = \frac{\bar{I}}{\sqrt{N}} \quad \text{bzw.} \quad N = \frac{\bar{I}^2}{\sigma^2}$$

\bar{I} : mittlere Intensität

N : Anzahl Looks

Für die gegebenen Aufnahmegeometrien und Prozessoreinstellungen ergeben sich folgende Werte und insbesondere Reduktionsfaktoren für die Standardabweichung der verwendeten (Ortho-) Bildprodukte (Tab. 2):

Tab. 2: Reduktionsfaktoren für verschiedene Bildprodukte

System	Looks	Faktor
COSMO-SkyMed HImage	~3	0,57735027
Sentinel-1A Interferometric Wide Swath	~20	0,4472136 (0,2236068)

Im vorliegenden Fall der gefilterten COSMO-SkyMed Daten lässt sich die Minimierung des Rauschens durch Messung der entsprechenden Werte beschreiben. So entspricht die adaptive Filterung einem Multilooking von ca. 3 Looks. Dies entspricht einer mäßigen Filterleistung bei der anzumerken ist, dass die effektive Filterleistung mit zunehmender Anzahl von Looks abnimmt.

Ähnliches gilt für Sentinel-1. In diesem Fall wurde auf eine adaptive Filterung einerseits infolge der geringeren räumlichen Auflösung verzichtet. Andererseits ergibt sich aus der Mittelung bei der Orthobild-Erstellung ein „Multilooking“, da die ursprünglich 5 m x 20 m auf quadratische Pixel resampelt werden. Aus den Messungen erhält man eine Anzahl von ca. 21 Looks in VV und 24 in VH, was einer starken Rauschunterdrückung entspricht.

Einfluss Speckle-Reduktion auf Detektionsrate

In Bezug auf die Detektionsrate erbrachte die Speckle-Reduktion mittels adaptiven Frost Filters oder multitemporaler Filterung folgendes (siehe auch Tabelle A1 im Anhang):

COSMO-SkyMed:

Die Detektionsrate auf Grundlage der ungefilterten COSMO-SkyMed Aufnahmen lag zwischen 27,9 und 87,9%. Die mittlere Detektionsrate war 58,6%. Durch adaptive Frost Filterung wurde im Mittel eine schlechtere Detektionsraten erzielt (57,1%), jedoch gab es einzelne Bildpaare, bei denen die Detektionsrate um ca. 2-5% höher lag als bei ungefilterten Paaren. Multitemporale Filterung verbesserte im Mittel die Detektionsrate (59,3%). Die Detektionsrate lag zwischen 22,6 und 88,5%.

Sentinel-1A:

Die Detektionsrate auf Grundlage der ungefilterten Sentinel-1A Aufnahmen lag zwischen 28,4 und 95,0%. Die mittlere Detektionsrate war 63,6%.

Die Verwendung des adaptiven Frost Filters verbesserte nur in einigen Sentinel-1A Aufnahmepaaren die Detektionsrate der Schnitte. Es wurden unterschiedliche window sizes und damping-factors getestet. Die besten Ergebnisse lieferte der adaptive Frost Filter mit window size 7*7 und damping factor = 1. Im Jahresmittel lag die Detektionsrate der Schnitte nach Frost-Filterung unter der der ungefilterten Aufnahmen bei 62,5% (29,9-94,7%). Durch Multitemporale Filterung konnte die Detektionsrate allerdings leicht verbessert werden. Im Mittel lag sie bei 64,1% (29,4-95,6%).

Laut diesen Ergebnissen empfiehlt sich eine Speckle-Reduktion aus den Radaraufnahmen mittels Multitemporaler Filterung. Jedoch liegt die Verbesserung der Detektionsrate zwischen ca. 2-5% und sollte gegen den zusätzlichen höheren Rechenaufwand abgewogen werden.

A.2.2 Polarisation

A.2.2.1 Dual polarimetrische Daten

Vor dem Hintergrund der Kapazität von Sentinel-1 dual polarimetrische Daten im Standard IW Aufnahmemodus zu liefern galt es den möglichen Mehrwert der Verwendung dieser Information zu untersuchen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass dual pol Daten zwar in großem Maße vorliegen, die Auswertemethodik dafür jedoch einen erhöhten Aufwand durch vergrößerte Datenvolumina und Entwicklungsarbeit bewirkt. Da COSMO-SkyMed nur bedingt repräsentativ für derartige Untersuchungen ist, infolge des verwendeten Ping-Pong Modus einerseits und andererseits der dadurch bedingten verringerten Streifenbreite, wurde aus operationellen Gesichtspunkten dieses System nicht polarimetrisch ausgewertet.

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurde somit der mögliche Informationsgewinn für die Schnittpunkt detektion durch die Verwendung von VV und VH (dual-pol) Daten des Sentinel-1 Systems evaluiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Als Aufnahmezeitpunkte wurden der 27.4. und 9.5 im AOI Bruckmühl gewählt, da in diesem Zeitraum

- i) repräsentative und verifizierte Schnitte erfolgten an den Tagen zwischen 4.5. und 7.5, sowie
- ii) bereits gute Ergebnisse für die Detektion mittels COSMO-SkyMed vorliegen.

Im visuellen Vergleich zeigt sich für die Amplitudenbilder in VV, dass erwartungsgemäß die Rückstreuung der am 4. bis 7.5. geschnittenen Felder zunimmt, während die Tendenz in den ungeschnittenen Feldern eher rückläufig ist (Abb. 3). Vergleicht man dazu die Amplituden der Kreuzpolarisation VH, so sind ähnliche Änderungen erkennbar, jedoch wird die schnittbedingte Variation durch das ungünstigere Signal-Rausch Verhältnis überlagert.

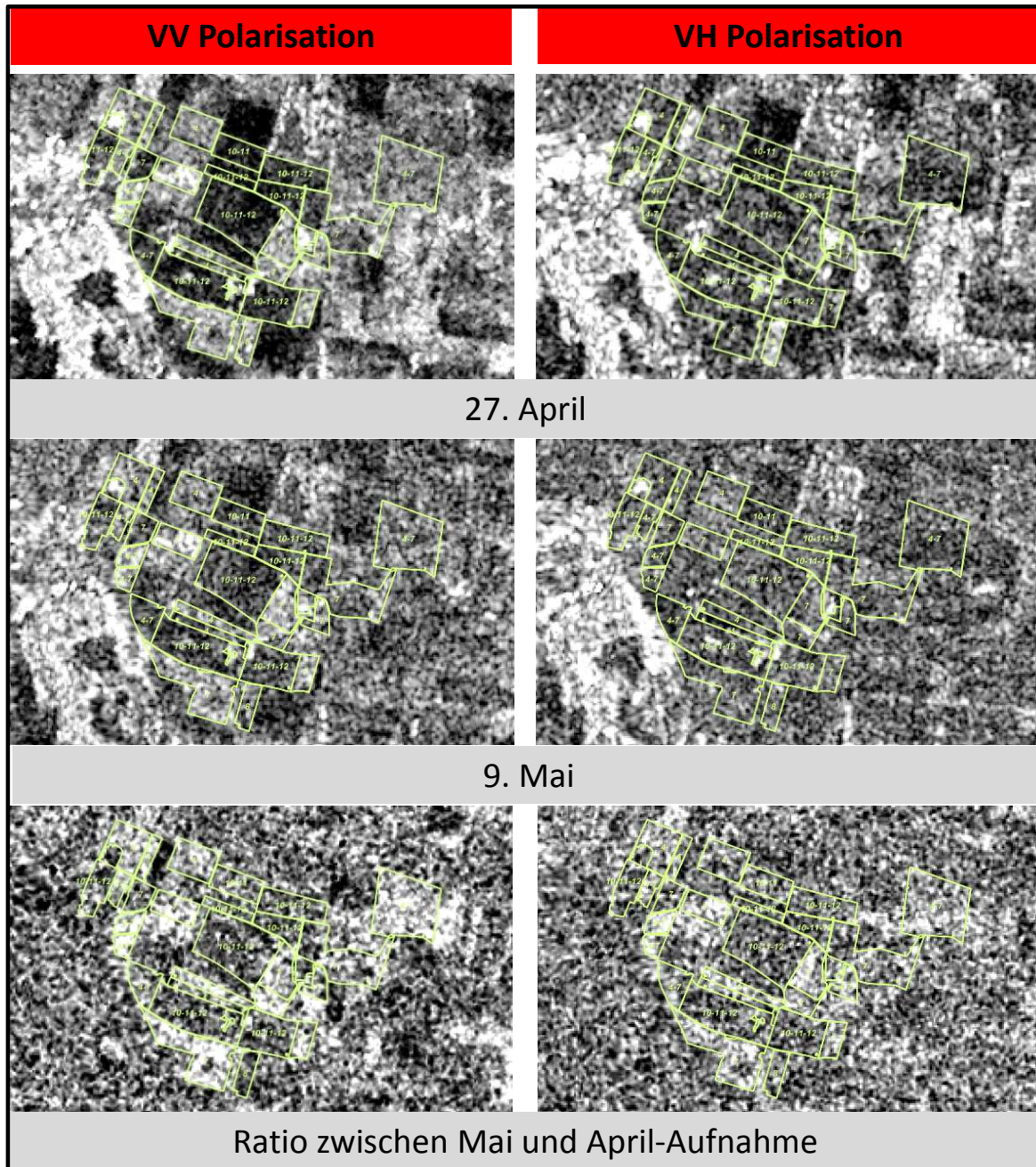


Abb. 3: Visueller Vergleich der VV und VH Amplituden zwischen 27.4. und 9.5. im AOI Bruckmühl

Beispiel Feld 10 (FieldID 10) – Auf Feldbasis im Vergleich der Sentinel-1 Co (VV) und Kreuz (VH) Polarisation vom April und Mai lässt sich das Änderungsverhalten verdeutlichen. Das Feld 19 (Field ID) wurde am 7.5. geschnitten und gleichzeitig wurde dieser Zeitpunkt verifiziert. Zudem wurde die schnittbedingte Änderung detektiert im Vergleich der COSMO-SkyMed Aufnahmen vom 10. Und 2. Mai. Die folgenden Bilder illustrieren die S1 Amplituden im entsprechenden Zeitraum für ein ausgewähltes Feld (FID 19), vgl. Abb. 4. Dabei wird deutlich, dass eine signifikante Veränderung durch den Schnitt in der Co Polarisation deutlich wird. Die Rückstreuung erhöht sich dabei stark von -14.4 dB auf -10.7 dB. Ähnlich verhalten sich die Rückstreuung in VH deren Amplitudenwerte in leicht geringerem Maße variieren von -19.1 dB auf -16.1 dB. Es gilt festzustellen, dass sich eine analoge Charakteristik des Rückstreuerverhaltens in allen Wiesen des AOI feststellen lässt.

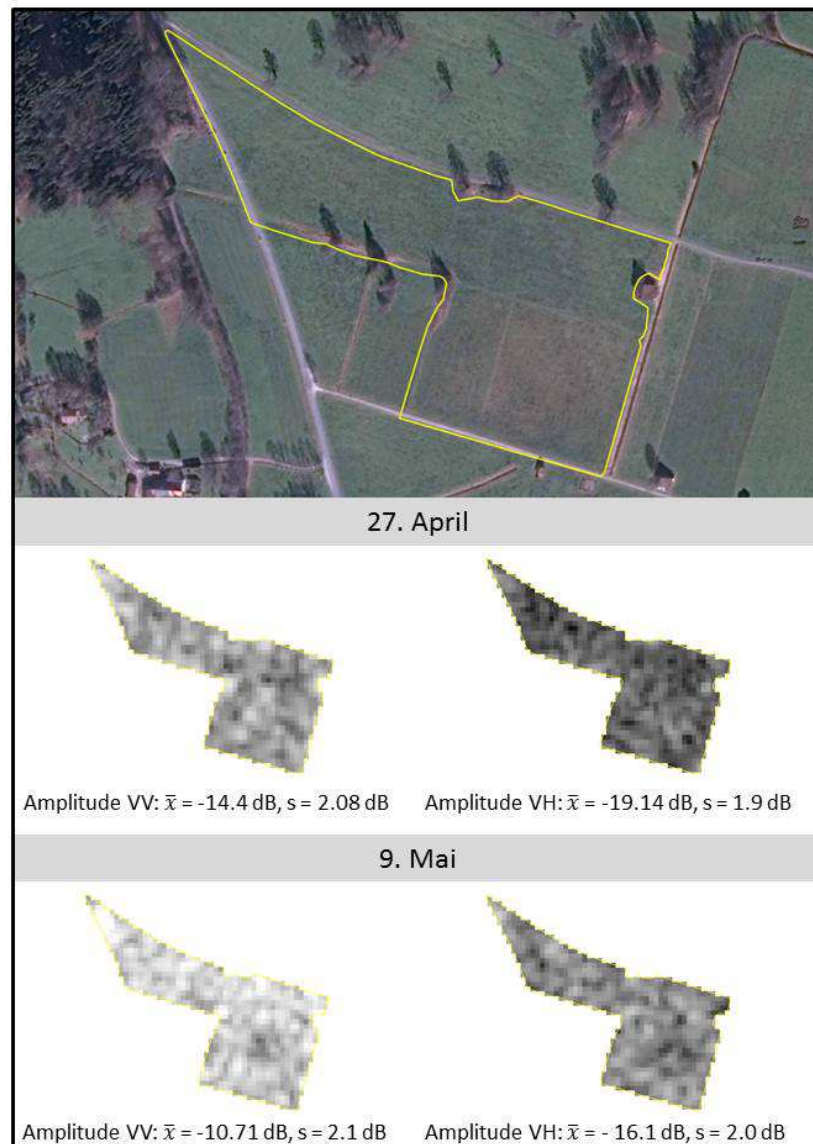


Abb. 4: Amplitudenbilder Feld 10 vom 27.4. und 9.5. skaliert zwischen -27 und -7 dB

Betrachtet man die zugehörigen Histogramme der Amplituden, so wird die, im Vergleich zur VV Polarisation, leicht geringere Änderung in der VH Polarisation deutlich. Beispielhaft seien hier die Verteilungen des oben dargestellten Feldes dargestellt, siehe Abb. 5 und Abb. 6. Deutlich zu erkennen ist der offset der Verteilung vom 9. Mai im Vergleich zum 27. April um wenige dB. Die Mittelwerte liegen bei -14.4 dB (April) und -10.71 dB (Mai). Entsprechend dem obigen visuellen Vergleich liegen die Verteilungen der Amplituden in VH Polarisation ähnlich aber auf tieferem Niveau mit im Mittel -19.1 dB und -16.1 dB.

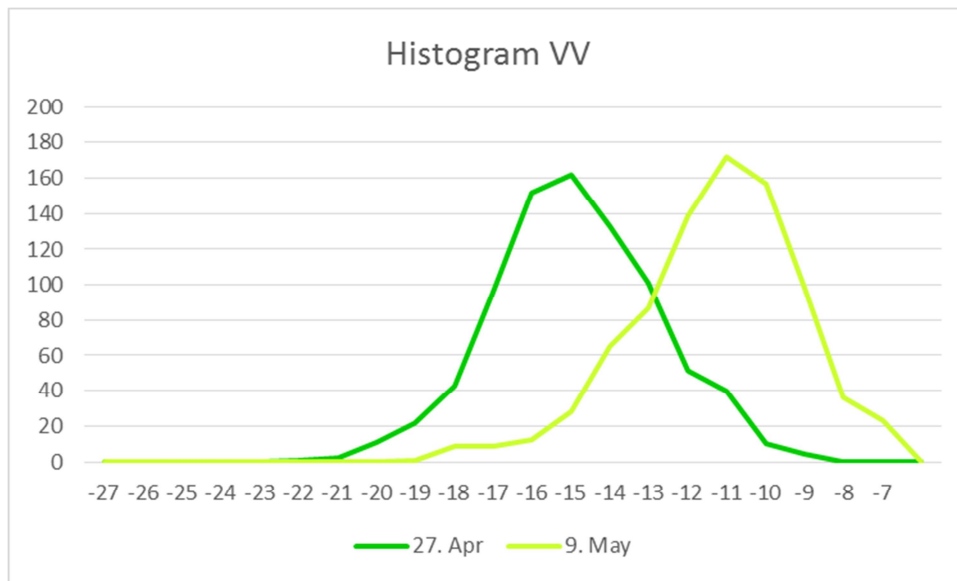


Abb. 5: FID 10 - Histogramme der Sentinel-1A Amplituden 27. April und 9. Mai

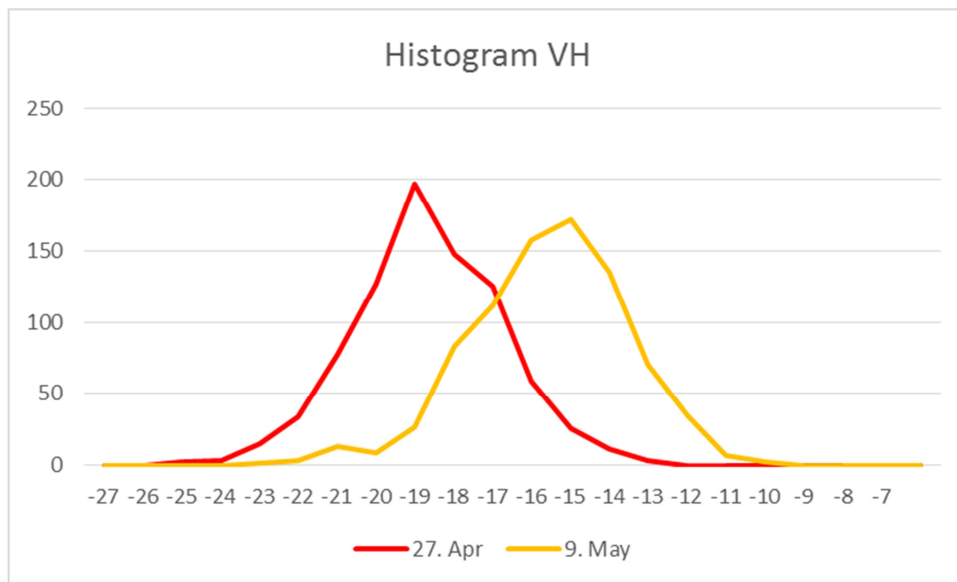


Abb. 6: FID 10 - Histogramme der Sentinel-1A Amplituden 27. April und 9. Mai

Die Mittelwerte aller im AOI lokalisierten Felder bestätigen diese Charakteristik. Tab. 3 fasst die Änderungen für die Sentinel-1A Aufnahmen vom 27.4. und 9.5. zusammen. Es ergeben sich ähnliche Werte der mittleren Ratio für VV und VH im Falle der geschnittenen Felder, wobei der Unterschied zwischen ungeschnittenen und geschnittenen sich stärker in VV ausdrückt. Er beträgt hier 3.2 dB im Vergleich zu 2.1 dB für VH Aufnahmen.

Tab. 3: Unterschiede zwischen 27.4. und 9.5 in den S-1 Amplituden von geschnittenen und ungeschnittenen Feldern

Veränderungen in den Sentinel-1A Aufnahmen vom 27.4. und 9.5.2015				
	\bar{x}_{VV}	σ_{VV}	\bar{x}_{VH}	σ_{VH}
Mittlere Ratio geschnittener Felder	2,78 dB	2,75 dB	2,47 dB	2,73 dB
Mittlere Ratio ungeschnittener Felder	-0,38 dB	2,59 dB	0,37 dB	2,55 dB
Änderungsbetrag	3,16 dB	2,7	2,1 dB	2,7

Für die Zuverlässigkeit der Detektion ist letztendlich der Einfluss des Rauschens maßgebend. Geringere Änderungsbeträge können dadurch überlagert werden und zu Fehldetektionen führen. Für geschätztes $\sigma_{Rauschen}$ in den Sentinel-1 Amplituden erhält man im Falle der VV Polarisation ein vergleichsweise hohes SNR von >1 entsprechend 0,46 dB. Verringert ist dies im Falle der VH Polarisation mit einem SNR von < 1 entsprechend -0,6 dB. Hier gilt es im Rahmen zukünftiger Untersuchungen den Einfluss des Rauschens zu minimieren, was jedoch praktisch durch die minimal zulässige Auflösung der Sentinel-1 Daten bzw. durch die minimalen betrachteten Feldgrößen im Projektgebiet limitiert ist.

Als Fazit der Fallstudie zur Verwertung polarimetrischer Information lässt sich feststellen, dass die Schnittdetektion im Wesentlichen durch die Verwendung von VV erfolgen kann. VH Information kann zu einer Verbesserung der Detektionsrate beitragen, jedoch gilt es in dem Fall das Signal-Rausch Verhältnis zu berücksichtigen. Im gesamten Testgebiet werden die höchsten Änderungsbeträge und damit der Hauptanteil erfolgreich detektierter Schnitte in den Ratios der VV Aufnahmen gemessen, während Änderungsbeträge in den VH Ratios infolge des geringen SNR vorsichtig zu verwenden sind. Der Informationsgewinn durch die Auswertung von Sentinel-1 VH Daten für den vorgestellten Ansatz sollte in Folgestudien untersucht werden.

A.2.2.2 VV versus HH Polarisation

Im Vergleich von VV (Vertical transmit-Vertical receive) zu HH (Horizontal transmit – Horizontal receive) polarisierten Radardaten zeigte sich, dass die VV Polarisation der Sentinel-1 Daten von Vorteil zu sein scheint und im Untersuchungsraum Oktober 2014 vermutlich zur Detektion von 13 Schnitten geführt hat, die nicht mit den HH polarisierten CSK Daten detektiert werden konnten (Grant, et al., 2015). Zwar kann kein direkter Vergleich eines gleichen Zeitraums für Sentinel-1A Daten erfolgen, jedoch führte das HH- polarisierte Sentinelbildpaar (14.6.-8.7.) zu einem geringeren Detektionserfolg (47%) als das etwas zeitlich versetzte und VV polarisierte Bildpaar (3.7.-15.7., 81%). Dies könnte daran, dass horizontale Polarisation (HH) scheinbar sensitiver auf horizontale Objekte wie z.B. Bodenoberflächen reagiert, und die vertikale Polarisation (VV) eine stärkere Rückstreuung von der dominanten vertikalen Struktur des Grasbestandes bewirkt (Zoughi, et al., 1987; Barrett, et al., 2012; Ribbes & Le Toan, 1999; Le Toan, et al., 1997). Barrett et al. (2012) vermutete ebenfalls, dass HH Polarisation sensitiver auf die Bodenfeuchte im Grasbestand reagiert.

A.2.3 Aufnahmegeometrie

Im Mai 2015 konnten Radaraufnahmen des COSMO-SkyMed Systems zeitnah aus ascending und aus descending Orbits gemacht und ausgewertet werden. Es zeigte sich, dass anhand Aufnahmen aus den ascending Orbits sehr viel weniger Schnitte (-40%) erkannt wurden als anhand Aufnahmen aus descending Orbits im fast gleichen Zeitraum (Tab. 4).

Tab. 4: *Ergebnisse der Detektion von Grünlandschnitten auf Grundlage von COSMO-SkyMed Aufnahme (multitemporal gefiltert) aus ascending und descending Orbits im Mai 2015*

Orbit	HI-14 ASC	HI-14 ASC	HI-09 DSC	HI-09 DSC
Datum	2.5.-10.5.	10.5.-14.5.	1.5.-9.5.	9.5.-17.5
Schnitt richtig erkannt	134	87	157	158
"kein Schnitt" richtig erkannt	43	47	143	140
Schnitt falsch erkannt	131	128	31	29
Schnitt nicht erkannt	31	77	8	12
Summe Referenzflächen	339	339	339	339
Detektionsrate (%)	52,2	39,5	88,5	87,9

Die Aufnahmegeometrie variierten für die Aufnahmen in beiden Orbitrichtungen dergestalt, dass ascending Daten im beam H4-14 unter einem Einfallswinkel von $45^\circ - 47.2^\circ$ (look /off nadir angle zwischen $40^\circ - 42^\circ$) flacher aufgenommen wurden als descending Daten im beam H4-09 unter einem Einfallswinkel von $38.6^\circ - 41.5^\circ$ (look/off nadir angle zwischen $34.6^\circ - 37.2^\circ$). Zusammen mit den topographischen Gegebenheiten, also den daraus resultierenden lokalen Einfallswinkelbedingungen und Rückstreuungseigenschaften von Grünland, kann ein Teil der unterschiedlichen Detektionsraten (im Vergleich von ascending und descending Aufnahmen) erklärt werden.

Ausblick Sentinel-1:

Perspektivisch gesehen ist das Sentinel-1 System optimal geeignet für die Änderungsdetektion, da Daten in kontinuierlichen Aufnahmeplan, bei sehr hoher zeitlicher Wiederholung und unter konstanten Aufnahmegeometrien erhoben werden. Die Verwendung des Interferometric Wide Swath Modus als default Aufnahmemodus, somit die Auslegung auf interferometrische Anwendungen garantiert derartige Bedingungen. Es gilt jedoch die geometrischen Eigenschaften innerhalb der Szenenerstreckung bei der Analyse von Daten zu berücksichtigen, da der Einfallswinkelbereich über den breiten Streifen stark variiert.

A.2.4 Schwellwert

Wie in den vorhergehenden Abschnitten ausgeführt ist die Detektionsrate in erster Linie durch das Signal-Rausch Verhältnis bestimmt. In der durchgeführten Studie wurde zur Detektion ein Schwellwert, der als Mittelwert mehrerer empirisch bestimmter Rauschwerte innerhalb der

Felder abgeleitet wurde, eingeführt und auf das gesamte Ratio-Bild angewendet. Er liegt im Bereich von weniger als einer Standardabweichung.

Dieser Ansatz wurde infolge der weitgehend geringen Gebietsabdeckung gewählt. Für weiträumige Detektionen mit folglich stärkerer naturräumlicher Variation muss das Schwellwertverfahren,

- i) in verschiedenen Teilgebieten auf die Gültigkeit hin überprüft werden bzw.
- ii) einzelne Schwellwerte auf Referenzflächen, die über das Untersuchungsgebiet verteilt liegen,
- iii) abgeleitet werden. Als Referenzflächen gelten dabei Wiesen, die nachgewiesen nicht geschnitten wurden.

A.2.5 Minimale Feldstückgröße

Die Bestimmung der Schnittereignisse beruht auf der Veränderung der gemittelten Radarintensität pro Feldstück. Es ist anzunehmen, dass kleine Feldstücke, bei denen sich der Mittelwert aus nur wenigen Pixeln zusammensetzt, einen größeren, durch Speckle verursachten, Fehler aufweisen. Außerdem fallen Randeinflüsse auf sehr kleine Feldstücke stärker ins Gewicht. Sehr große Feldstücke hingegen werden vermutlich durch ihre zunehmende Inhomogenität (Boden, Topographie) einen gewissen Fehler aufweisen. Die minimale Pixelzahl, die sinnvoll für Mittelwertberechnung erscheint, wird hier auf 3x3 Pixel gesetzt. Dies bedeutet für Sentinel-1 Daten mit einer Pixelauflösung von 10 m x 10 m eine minimale Feldstückgröße von 0,1 ha (20 m => 0,4 ha). Für die hochaufgelösten COSMO-SkyMed Daten (Pixelauflösung 3 m) liegt die minimale Feldstückgröße damit bei 0,01 ha.

A.3 Fehlerquellen

A.3.1 Feuchtigkeitseinfluss auf Aufnahmezeitpunkt

Die Betrachtung der RADOLAN-Niederschlagsdaten des DWDs zum Einfluss der Feuchtigkeit zum Aufnahmezeitpunkt zeigt an den Bildpaaren mit schlechter Detektionsrate (8.8.-20.8.) und (23.9.-30.9.), dass zu allen Aufnahmezeiten + 2 Stunden vorher kein Regen gefallen ist. Auch im August überschätzt RADOLAN den Niederschlag am 19.8/20.8., so dass man nicht wirklich von einer nassen Aufnahme am 20.8. sprechen kann. Der Fehler der vielen Falschdetektionen (vgl. Tabelle A1 Anhang) könnte eher durch (fehlende) Wuchsunterschiede und Welkeerscheinungen durch Trockenheit und nicht durch die unmittelbare Feuchtigkeit/Trockenheit zum Aufnahmezeitpunkt verursacht worden sein. Auch die Fehldetektionen im Mai scheinen nicht durch Feuchtigkeit bzw. Regen zum Aufnahmezeitpunkt verursacht worden sein.

A.3.2 Zeitlicher Abstand zwischen Sentinel-1A Aufnahmen

Bei der Arbeit mit Sentinel-1A Aufnahmen erhöht ein zeitlicher Abstand von mehr als 12 Tagen die Fehldetektion. Bei 24 Tagen Abstand zwischen den Radaraufnahmen ist der Detektionserfolg vermutlich auch abhängig, ob der vorherige Schnitt zeitlich nah an der früheren Aufnahme lag (schwächere Rückstreuung durch hohen Bestand vs. stärker Rückstreuung niedrigen Bestand). Insbesondere bei Abständen von 30 oder 48 Tagen können 2 Schnitte in den Zeitraum fallen und damit die Detektion verfälschen. Der Ausfall einzelner Sentinel-Aufnahmen während der Vegetationsperiode kann das Detektionsergebnis stark beeinflussen. Dies ist unbedingt für einen Routinebetrieb des Verfahrens zu beachten!

A.3.3 Abstand Aufnahmezeitpunkt zum Schnitt

Durch den sehr hohen und dichten Wuchs im Frühjahr bei der früheren Aufnahme (vBild) im Vergleich mit der späteren Aufnahme (nBild) zeigte sich, dass das nBild bis maximal 12 Tage nach dem tatsächlichen Schnitt erfolgen sollte, um noch deutliche Unterschiede in der Radar-rückstreuung zu erzeugen. Da durch die klimatischen Bedingungen der Wuchs sehr stark und schnell geht, sind spätere Aufnahmen vermutlich eher von Nachteil. In der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode (mit verlangsamten Wuchs durch Trockenheit und hohen Temperaturen) zeigte sich allerdings (im Vergleich 8.-20.8.), dass 71 von 114 Fehldetektionen einen Schnitt 4-6 Tage vor dem vBild hatten.

Die Auswertung der Sentinel-1A ungefilterten Daten der zeigte, dass schlechte Detektionsergebnisse erzielt wurden, wenn das vBild 3-4 Wochen vor dem tatsächlichen Schnitt (also sehr kurz nach dem vorherigen Schnitt) oder das nBild 10-21 Tage nach dem tatsächlichen Schnitt erfolgte.

A.3.4 Einfluss Feldstückgröße auf Detektionserfolg:

Zur Analyse des Einflusses der Feldstückgröße auf den Detektionserfolg (richtig/falsch) wurde eine logistische Regression angewandt. Es konnte kein statistischer Zusammenhang zwischen Feldstückgröße und Detektionserfolg gefunden werden ($p = 0,988$). Getestet wurde einerseits über alle Feldstücke für alle Bildpaare (insgesamt ein Stichprobenumfang von 2844 Beobachtungen). Äquivalent zum r^2 wurde der McFadden r^2 -Wert berechnet. In der Praxis spricht man schon ab $r^2=0,2$ von akzeptablen, ab 0,4 von einer guten Modellanpassung. Der McFadden r^2 -Wert war $6,2 \cdot 10^{-8}$ und deutet auf einen sehr schlechten Zusammenhang zwischen Detektionserfolg und Feldstückgröße. Weiterhin wurden die Feldstücke des Bildpaarvergleiches (1.9./13.9.) alleine getestet, da hier die generelle Detektionsrate bei 29,4% lag. Obwohl hierbei der Detektionserfolg etwas besser durch die Feldstückgröße erklärt wird (McFadden $r^2= 2,4 \cdot 10^{-3}$), ist der Zusammenhang sehr schwach und nicht signifikant ($p=0,449$).

Es müssen daher andere Faktoren als die Feldstückgröße den Erfolg der Detektion bestimmen.

Auch für die COSMO-SkyMed Beobachtungen im Testzeitraum (2363 Beobachtungen) kann kein signifikanter Einfluss der Feldstückgröße auf den Detektionserfolg nachgewiesen werden ($p= 0,557$). Der McFadden r^2 -Wert liegt hierbei bei $1,1 \cdot 10^{-4}$.

A.4 Zeitreihenanalyse

Für das Jahr 2015 wurden alle verfügbaren Radarbilder in der Vegetationsperiode (Mitte April-Ende Oktober) ausgewertet (Sentinel-1A: alle Aufnahmen von Orbit 95, nicht 22.4.; CSK: 1.5.,9.5.,17.5.,6.6, 10.6., 18.6., 20.7., 21.7., 24.7., 29.8., 6.9., 14.9.2015). Zusätzlich wurden für das Testgebiet alle InVeKoS Flächen mit der Nutzungsnummer 451 „Wiese“ ermittelt. Diese 10395 Feldstücke wurden mit den Radardaten (Ratio aller Bildpaare) verschnitten und alle detektierten Schnittereignisse für jede Grünlandfläche berechnet und aufsummiert. Korrigiert wurde diese Zahl nach dem Kriterium, dass innerhalb von 28 Tagen nur ein Schnitt erfolgen kann. Somit reduzierte sich die Gesamtschnittzahl für einige Flächen.

A.4.1 Schnittfrequenzen für ganzjährig kartierte Felstücke

Für 28 Grünlandflächen lagen die wahren, ganzjährigen Schnittzahlen bis zum 30.9.2015 vor (Tab. 5). Im Vergleich mit den Schnittzahlen aus Radardaten zeigte sich, dass je nach betrach-

tetem Zeitraum (Bildgrundlage) zwischen 17,9 und 39,3% der Schnittfrequenzen richtig erkannt wurden. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass eine Stichprobenzahl von 28 bei über 10000 Grünlandflächen im Testgebiet nicht ausreicht, um den Detektionsfehler richtig zu beziffern. Erkennbar ist, dass mit Sentinel-1A Daten die Schnitzzahl häufig um einen Schnitt unter- und mit COSMO-SkyMed Daten überschätzt wird.

Tab. 5: Vergleich der mittels COSMO-SkyMed (CSK) oder Sentinel-1A (S1) Radardaten detektierten und wahren, vor Ort ganzjährig kartierte Schnitte von 28 Feldstücken; grüne hinterlegte Felder verdeutlichen richtige Detektion

FID_Nr	Fläche (ha)	CSK bis 14.9.	S1 bis 13.9.	wahre Schnitte bis 13.9.	CSK bis 30.9.	wahre Schnitte bis 30.9.	S1 bis 31.10.	wahre Schnitte bis 31.10.
397	2,78	5	3	4	5	4	4	5
1163	4,03	4	3	4	4	5	3	5?
1171	5,46	5	4	4	5	5	5	5?
1190	2,45	5	4	5	6	5	5	6
1283	7,78	4	3	4	4	5	4	6?
1926	1,44	4	3	4	4	5	3	6?
3364	0,75	6	4	4	6	5	4	6?
3367	1,2	5	5	4	5	5	6	6?
3368	1,26	6	3	4	6	5	4	6?
3369	2,38	5	5	4	5	5	5	6?
3371	7,27	4	4	4	4	5	4	6?
3374	0,48	4	4	4	4	5	5	6?
3375	2,17	5	4	4	5	5	4	6?
3378	3,8	4	5	4	4	5	5	6?
3379	2,4	4	4	4	4	5	4	6?
3380	1,32	3	6	4	3	5	6	6?
3381	0,82	4	4	4	4	5	5	6?
3382	1,23	4	4	4	4	5	4	6?
3383	10,97	6	4	4	6	5	5	6?
3384	2,84	5	3	4	5	5	3	6?
3385	1,15	5	3	4	5	5	3	6?
3387	1,86	5	3	4	5	5	3	6?
9442	13,35	6	3	3	6	3	3	4
9443	12,27	5	5	3	5	3	5	4
9444	0,69	5	3	3	5	3	4	4
9445	0,97	5	4	3	5	3	4	4
9446	0,48	5	4	3	6	3	5	4
X	5,51	4	3	4	4	5	3	6
%		39,3	39,3		25,0		17,9	

A.4.2 Schnitffrequenzen für Testgebiet

Die Schnitffrequenzen für alle Wiesenfeldstücke im Testgebiet sind den Karten 1 & 2 im Anhang zu entnehmen. Betrachtet man die detektierten Schnitzzahlen für das gesamte Testgebiet im Zeitraum zwischen 10.4./1.5. und 13./14.9.2015, erkennt man folgende Verteilung der Schnitffrequenzen (siehe auch Tab. 6)

Tab. 6: Häufigkeitsverteilung der detektierten Schnitffrequenzen aus multitemporal gefilterten Radardaten zwischen 10.4. – 14.9.2015 aller Wiesenflächen im Testgebiet

Schnitte	Häufigkeit Sentinel 1A	Häufigkeit COSMO SkyMed
1	5	-
2	464	35
3	2745	821
4	4623	5066
5	2340	3874
6	2566	591
7	1	8

Der Großteil (>70%) der Wiesenflächen im Testgebiet unterliegen einer intensiven Nutzung mit 4-5 Schnitten (Abb. 7 und Abb. 8). 1- 2 schnittige Wiesen sind eher selten vertreten. Diese Daten sind leider nicht verifizierbar, jedoch passt die Verteilung in das Testgebiet, was einer sehr intensiven Grünlandnutzung unterliegt. Eine siebenfache Nutzung ist für das Testgebiet eher selten, die wenigen Flächen mit 7 detektierten Flächen sind wahrscheinlich fehlerhaft, jedoch fallen sie mit unter 0,01 bzw. 0,08% nicht ins Gewicht.

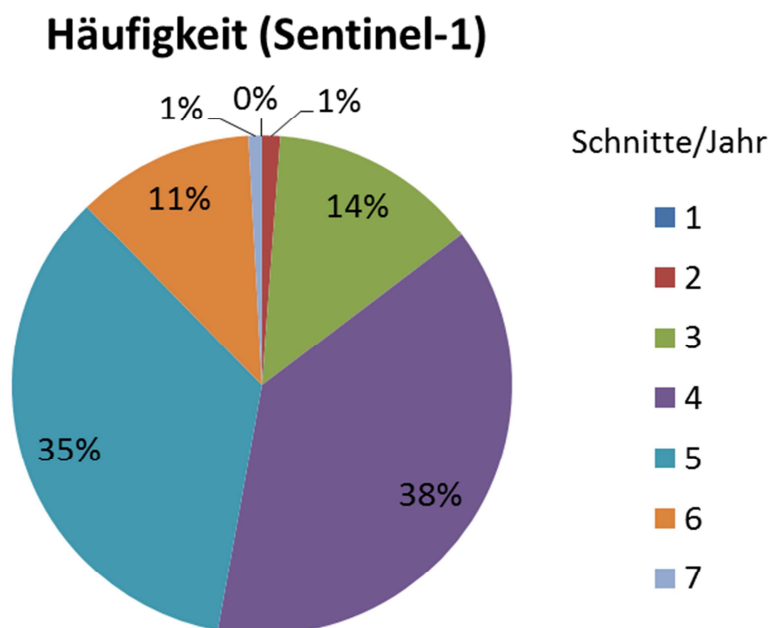


Abb. 7: Häufigkeit der Schnitte im Testgebiet im Jahr 2015 detektiert auf Basis von Sentinel-1A

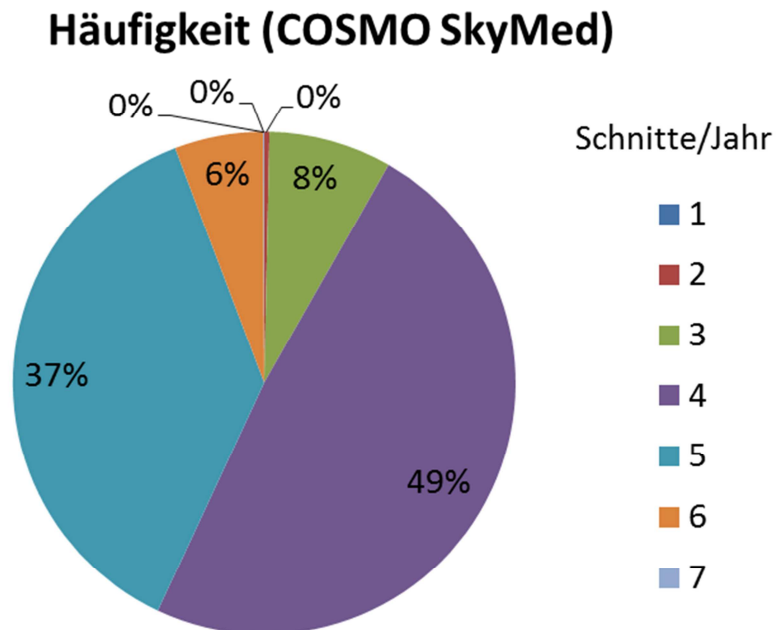


Abb. 8: Häufigkeit der Schnitte im Testgebiet im Jahr 2015 detektiert auf Basis COSMO-SkyMed Daten

A.4.3 Ertragsabschätzung anhand Schnittfrequenz

Basierend auf den per Radar ermittelten Schnittfrequenzen für die Dauergrünlandflächen (In-VeKoS „451 - Wiese“) im Testgebiet (Abschnitt 4.2, Karten 1 & 2), die eine Gesamtfläche von ca. 16.510 ha umfassen, sowie der Schätztabelle für Nährstoffabfuhr (Wendland et al. (2012), Abb. 1) kann der Grünlandertrag für das Testgebiet im Jahr 2015 berechnet werden. Aus den Schnittfrequenzen, die per COSMO-SkyMed Aufnahmen bestimmt wurden, ergibt sich ein Ertrag von 103 dt/ha. Der Ertrag, der auf Basis der mit Sentinel-1A ermittelten Schnittfrequenzen errechnet wurde, ist 102 dt/ha.

Für diese Berechnung wurden folgende Wiesentypen gewählt:

- 1 & 2 Schnitte „ohne Angabe des Wiesentyps“
- 3-6 Schnitte „Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe“
- 7 Schnitte: entspricht dem Wert für 6 Schnitte „Bestände mit hohem Anteil Weidelgras, Wiesenrispe“

Die tatsächlichen, simulierten und aus Schnittfrequenzen geschätzten Erträge können für die vier Untersuchungsstandorte im Jahr 2015 gegenüber gestellt werden (Tab. 7).

Tab. 7: Gegenüberstellung Grünlanderträge an den Untersuchungsstandorten im Jahr 2015

Standort	Schnitthäufigkeit			TM				
	real	detektiert (CSK)**	detektiert (Sentinel-1A)	gemessen	simuliert	SF real	SF detektiert (CSK)	SF detektiert (Sentinel-1A)
Grub	4	6	3	88	105*	100	120	85
Willing	5	5	4	99	92	110	110	100
Karolinenfeld	6	4	3	125	107	120	100	85
Bruckmühl	6	6	5	97	115	120	120	110
Mittelwert				102	105	113	113	95

* 10 dt/ha höher als angegebenes Simulationsergebnis wegen 4. Schnitt (Modellierung nur bis 3.)

**Datengrundlage nur bis 30.9.

A.5 Eingrenzung Schnittzeiträume durch RADOLAN Niederschlagsdaten

Allein auf Grundlage der frei verfügbaren Sentinel-1A Radardaten konnten mittels dieser Methode die Schnitte im Mai 2015 auf einen Zeitraum von 6-12 Tagen eingegrenzt werden. Da Grünland in der Regel an Regentagen oder vor längeren, meist angekündigten Niederschlagsereignissen nicht geschnitten wird, könnte die Nutzung von flächendeckenden Wetterdaten einer weiteren Einschränkung der Schnittzeiträume dienen. Der Deutsche Wetterdienst hat mit den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer (LAWA) das Routineverfahren RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) entwickelt, das räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten aus einem Netz von 17 Radar- und ca. 1200 Bodenniederschlagsstationen liefert (DWD, 2015). Im Folgenden wird gezeigt, wie RADOLAN- Daten für eine weitere Einschränkung der in der Studie bestimmten Schnittzeiträume genutzt werden konnten. Zum Test wurden die Niederschlagsdaten im Zeitraum 27.4.-17.5.2015 über einem Ausschnitt des Testgebietes betrachtet (Abb. 9).

Hierzu wurden RADOLAN-Daten vom Server des Deutschen Wetterdienstes in täglicher Auflösung bezogen. Die binär komprimierten Daten wurden zu ASCII Rasterdaten konvertiert (Python Skript aus Open Source Bibliothek für Radarwetterdatenverarbeitung wradlib, Output: asc Raster) und als projizierte Rasterdatei nach ArcGIS (ESRI Deutschland GmbH) exportiert. Die Berechnung der zonalen Statistik erfolgte pro RADOLAN Gitter (ArcPy Skript, Output: dbf Tabelle), bei der mehrerer dbf Tabellen zusammengeführt wurde. Danach wurden alle relevanten RADOLAN-Gitter (1 km x 1 km, Tab. 8) mit der Shapedatei der einzelnen Grünlandfeldstücke verschnitten. Somit wurden jedem Feldstück tägliche Niederschlagswerte zugewiesen. Als Kriterium für die Auswertung der täglichen Niederschlagswerte galt, dass ein Schnitt an einem Tag sehr wahrscheinlich durchgeführt werden kann, wenn der Niederschlag an diesem Tag sowie der Tagesniederschlag des Folgetages gleich 0 mm sind.

Tab. 8: Tagesniederschlagssummen (in mm) vom 1. bis 15. Mai 2015 in allen verwendeten RADOLAN-Grids des Testgebietes

RADOLAN Grid-Nr.	1.5.	2.5.	3.5.	4.5.	5.5.	6.5.	7.5.	8.5.	9.5.	10.5.	11.5.	12.5.	13.5.	14.5.	15.5.
75377	27,3	4,1	18,9	0	0	18,4	0	0	6,2	0	0	0	0	25,3	6,9
74477	29,5	4,9	16,9	0	0	18,2	0	0	4,8	0	0	0	0	25,9	7,7
74478	28	5,2	16,4	0	0	13,7	0	0	4,5	0	0	0	0	24,9	8,2
74479	26	4,7	16,8	0	0	15,7	0	0	4,2	0	0	0	0	23,5	7,6
73577	27,7	6,8	16,2	0	0	15,9	0	0	4	0	0	0	0	31,8	8
73578	28	5,8	17	0	0	14,4	0	0	4,3	0	0	0	0	26,1	8,5
73579	28,3	5,3	17,4	0	0	13,5	0	0	0	0	0	0	0	25,5	8

Auf Grundlage der Sentinel-1A Radardaten konnten die Grünlandschnitte im Mai 2015 auf einen Zeitraum von 6-12 Tagen eingegrenzt werden. Durch die Kombination der Sentinel-1A Daten mit zusätzlich erworbenen Radardaten des COSMO-SkyMed Systems konnten hier die Schnittzeiträume weiter auf 4-8 Tage eingeschränkt werden. Die Auswertung aller Radaraufnahmen ergab somit im Beobachtungszeitraum vom 10.4. bis 17.5.2015 für das Testgebiet sechs mögliche Schnittzeiträume: „1.-9.5.“, „2.-9.5.“, „4.-9.5.“, „9.-10.5.“, „10.-14.5.“ und „10.-15.5.“ (Abb. 9A). Für die genauere Bestimmung der Schnitttermine allein auf Basis frei verfügbarer Radardaten sollen künftig auch die Daten des Satelliten Sentinel-1B verwendet werden. Mit den zusätzlichen Sentinel-1B Daten wird sich sehr wahrscheinlich eine Verbesse-

rung der Detektion von möglichen Schnitten im Grünland auf einen Zeitraum von ca. 3-6 Tage ergeben.

Darüber hinaus zeigte diese Studie, dass die RADOLAN-Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Schnitttermineingrenzung ebenfalls hilfreich sind. Laut diesen Niederschlagsdaten und dem angewandten Auswahlkriterium waren nur die Tage 4., 7., 10., 11. und 12.5. geeignet, um Grünland zu schneiden und grenzen damit die per Radaraufnahmen detektierten Schnittzeiträume weiter ein (Abb. 9B). Am 5., 8. und 13.5. gab es zwar keinen Niederschlag, als Schnitttermine sind diese Tage aber als eher unwahrscheinlich anzusehen, da Niederschlag am jeweiligen Folgetag fiel und somit das geschnittene Gras nicht trocknen könnte. Hier wird davon ausgegangen, dass die jeweiligen Regenereignisse den Landwirten bereits am Vortag angekündigt waren und nicht als spontane Regenereignisse eintraten. Auch wird hier angenommen, dass kein Grasschnitt sofort nach dem Schnitt entfernt wurde, wie bei der Frischfütterung.

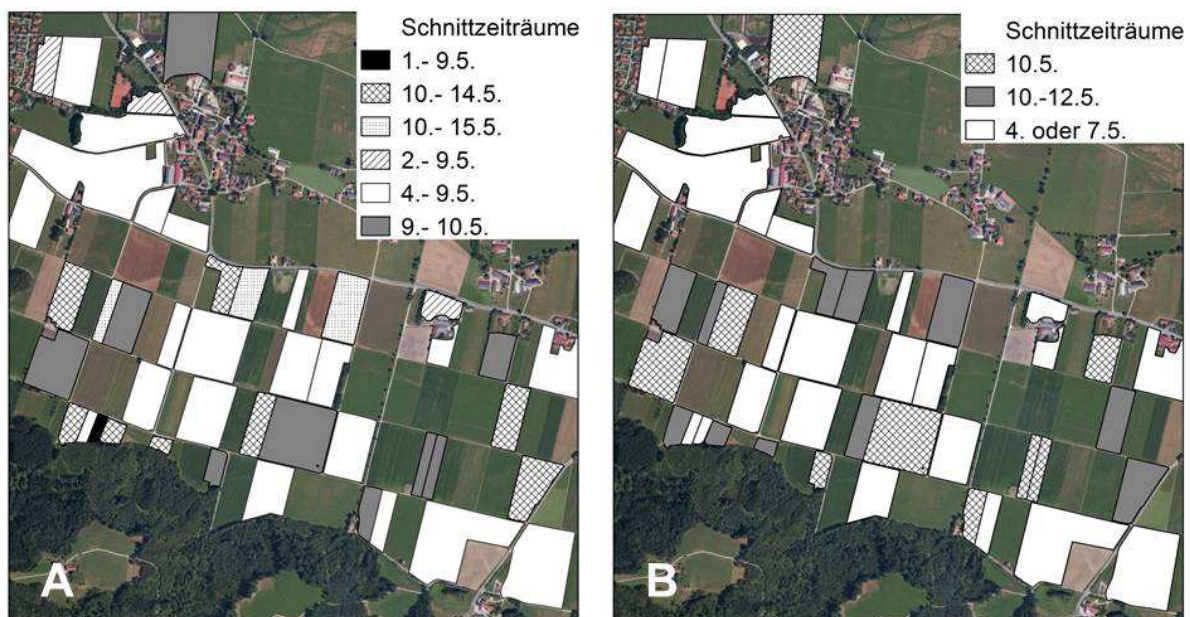


Abb. 9: Ermittelte Schnittzeiträume aus Kombination aller Radaraufnahmen im Beobachtungszeitraum 10.4.-17.5.2015 (A) sowie Schnittzeiträume korrigiert mit Hilfe von RADOLAN-Tagesniederschlagsdaten (B); Quelle des unterlegten Satellitenbildes: ESRI

Es zeigte sich, dass RADOLAN zum Teil den gefallenen Niederschlag im direkten Vergleich mit Niederschlagsdaten von Versuchsstationen (hier: Karolinenfeld) auf Grund der zugrundeliegenden Methodik der Interpolation von Radar- und Obrometerdaten überschätzt. Beispielsweise zeigten die RADOLAN-Daten am 4.5. gegen 15 Uhr im südlichen Bereich des gesamten Testgebietes viel Niederschlag, der so nicht gefallen ist (es wurde kein Niederschlag an der Versuchsstation in Karolinenfeld gemessen). Wenn nur die RADOLAN-Daten betrachtet worden wären, wäre ein Schnitt am 4.5. nachmittags eher als unwahrscheinlich eingeordnet worden. Jedoch wurden durch die Vor-Ort-Kartierung Schnitte auf einigen Flächen in diesem Bereich des Testgebietes registriert. Somit können auch vereinzelt Schnitttermine auf Feldstücken in Frage kommen, die mit dem hier angewandten Auswahlkriterium für RADOLAN-Daten aber ausgeschlossen würden.

Tab. 9: Auswahlkriterien für mögliche Schnitttermine bei Betrachtung von täglichen und stündlichen RADOLAN-Niederschlagsdaten

Szenarien für Niederschlagsereignisse	Tagesniederschlag	Niederschlag des Folgetages	Uhrzeit des Niederschlages	Schnittwahrscheinlichkeit
Kein Niederschlag/ trocken	0	0	x	sehr hoch
Abendgewitter/ am Abend	0	>0	nach 12:00 Uhr	möglich
in der Nacht/ am Vormittag	>0	0	vor 12:00 Uhr	möglich

Durch eine zusätzliche Betrachtung von stündlich aufgelösten RADOLAN-Daten kämen zwei weitere Szenarien für die Auswahl von möglichen Schnittterminen in Frage: „Abendgewitter/ Abendniederschlag“ und „Nacht-/ Vormittagsniederschlag vor guter Wetterlage“ (Tab. 9). Durch diese Betrachtung könnten die Schnitttermine in Einzelfällen realistischer wiedergegeben werden, jedoch muss hier abgewogen werden, ob sich der zusätzliche Rechen- und Datenaufwand für den Informationsgewinn lohnt.

Des Weiteren wurde getestet, ob der Einfluss von sehr viel Niederschlag unmittelbar vor trockenen Tagen (ermittelt über RADOLAN-Daten) ebenfalls als Auswahlkriterium verwendet werden kann. Die Annahme ist, dass eine höhere Menge an Niederschlag über mehrere Tage den Boden der Grünlandflächen zu stark aufweichen könnte, so dass dieser mit den schweren Landfahrzeugen nicht mehr zu befahren ist, ohne die Grasnarbe zu beschädigen. Als Beispiel wurde hier der Zeitraum 28.4. -8.5. betrachtet, in dem sehr viel Niederschlag bis einschließlich 3.5. im Testgebiet gefallen ist (im Mittel 67 mm). Diese Menge an Niederschlag hat aber einige Landwirte nicht davon abgehalten ihre Grünlandflächen kurz nach diesen Regenereignissen ihre Grünlandflächen zu schneiden. Von allen Testflächen sind etwa ein Drittel zwischen 4. und 7.5. geschnitten worden, der größte Teil hat bis zum 10., 11. oder 12.5. gewartet. Diese Ergebnisse zeigen, dass die jeweiligen Bodengegebenheiten auch entscheidend für den Schnitt sein können. Ein Beispiel ist der Standort Karolinenfeld mit sehr weichem, organischem Boden (ehem. Moor), der nach größeren Regenereignissen nicht befahrbar ist. Hier wurde erst am 11.5. geschnitten, jedoch wurde am Standort Bruckmühl mit sandig bis tonigem Lehmboden bereits am 4.5. gemäht.

Ein weiterer möglicher Fall wäre die Ermittlung einer längeren, regenfreien Periode (>12 Tagen) aus RADOLAN-Daten, die genau den Zeitraum eines Radaraufnahmepaares trifft. Der Schnittzeitraum könnte somit durch die Niederschlagsdaten nicht weiter eingeschränkt werden. Jedoch wäre dies für die Berechnung des Ertrages im Modell nicht so wichtig, da der Aufwuchs der Pflanzen in so einem Zeitraum (in Abhängigkeit der Bodenwasserverfügbarkeit je nach Standort) ebenfalls sehr gering wäre. Dadurch wäre die Abweichung zum tatsächlichen Schnitttermin keine größere Fehlerquelle bei der Ertragsberechnung.

A.6 Klassifikation von Grünlandflächen

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse der Fallstudie zur Merkmalsklassifikation sollten die Möglichkeiten zur Identifizierung und Klassifizierung von Objekten (z.B. Acker vs. Grünland; unterschiedliche Feldfrüchte) aufzeigen. Hierbei wurde Wert auf die automatisierte Er-

kennung und Unterscheidung von Acker- und Grünland gelegt unter der notwendigen Bedingung, dass für operationelle Ziele die Anwendung der Schnittterminerfassung in größerer Flächenabdeckung erfolgen kann für die die Verfügbarkeit von InVeKoS Daten nicht immer gewährleistet ist.

A.6.1 Datengrundlage

Für die Fallstudie im Teil-AOI Bruckmühl wurden verwendet:

- i) Radardaten: Cosmo-SkyMed vom Mai 2015 ascending (02./10./14.05.2015) und descending (01./09./17.05.2015)
- ii) Vektor-Referenzdaten: Invekos (Grünland Flächen)

Dabei wurden Standardradarprodukte klassifiziert, die zuvor orthorektifiziert, adaptiv gefiltert (Frost 7*7) und co-registriert wurden

A.6.2 Methode

Die Methodik lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Unüberwachte Klassifikation (IsoData)
- Automatisierte Klassenbildung durch Statistik der Pixelwerte
- Parameter: 5 bis 10 Klassen, Konvergenz 98%, 20 Iterationen
- Verwendung 1 (monotemporal) vs. 3 Amplituden (multitemporal)

A.6.3 Ergebnis der Merkmalsklassifikation

Als Fazit der Fallstudie lassen sich mehrere Aussagen zur Verwendbarkeit des Verfahrens im operationellen Betrieb postulieren. So gilt, dass die Klassenzuweisungen umso ungenauer werden, je mehr Klassen vorab definiert sind. Das beste Ergebnis wurde erzielt auf Basis eines multitemporalen Datensatzes mit 5 Klassen in 10 Iterationen in denen sich 98 % Konvergenz einstellte. Das Klassifikationsergebnis ist in Abb. 10 dargestellt.

Grünland Flächen sind durch ihre schnittbedingten Veränderungen in einer multitemporalen Klassifikation schwer zusammenzufassen. Im Gegensatz dazu werden statische Klassen, also Klassen wie Siedlungen und Wald mit relativ geringer zeitlicher Dynamik deutlich besser erkannt. Dieser Unterschied in der Dynamik könnte anhand von Zeitreihenanalyse verwendet werden zur besseren Detektion von Grünland. Dies würde jedoch den Rahmen dieses Projektes sprengen und sollte gegebenenfalls in einem Folgeprojekt untersucht werden. Durch Unterschiede in den Aufnahmegeometrien, ascending und descending, variieren die Klassifikationsergebnisse teilweise stark. Insbesondere die Ausdehnung von Waldklassen wird unterschiedlich detektiert bedingt durch die unterschiedliche (teilweise gegensätzliche) Lage der Radarschatten. Durch Zusammenfassen und Verschneidung der Klassen beider Aufnahmerichtungen kann dieses Problem gelöst werden. Zudem lässt sich feststellen, dass spezielle Klassen, z.B. Gras und Siedlung deutlich überbestimmt sind. Zur Minimierung dieses Effektes sind weitere Zusatzdaten (in-situ) nötig. Grundsätzlich würde sich jedoch die Verwendung von Methoden überwachter Klassifikationen anbieten, bei denen Trainingsklassen basierend auf Referenzdaten durch den Anwender bestimmt werden.

Insgesamt kann man jedoch zusammenfassen, dass eine quantitative Auswertung der Merkmalsklassifikation in diesem Rahmen nicht sinnvoll erscheint, da ein zuverlässiger Referenzdatensatz fehlt, insbesondere für alle Klassen außer Gras/Grünland.

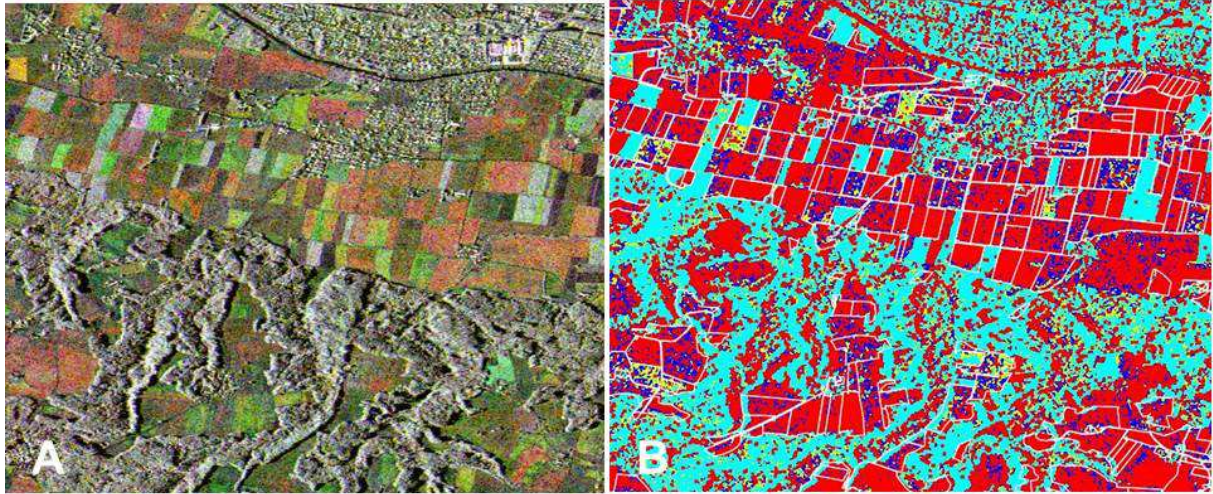


Abb. 10: Ausschnitt multitemporale Cosmo-SkyMed Aufnahmen 02./10./14. Mai 2015 (A) und Klassifikationsergebnis (B) (multitemporal, 5 Klassen, weiß umrandete Flächen = Grünland)

A.7 Operationalisierung

Zur Vorbereitung einer Automatisierung der Methode wurde der Prozessablauf ausführlich in einem Programmstrukturplan zusammengefasst (Abb. 11).

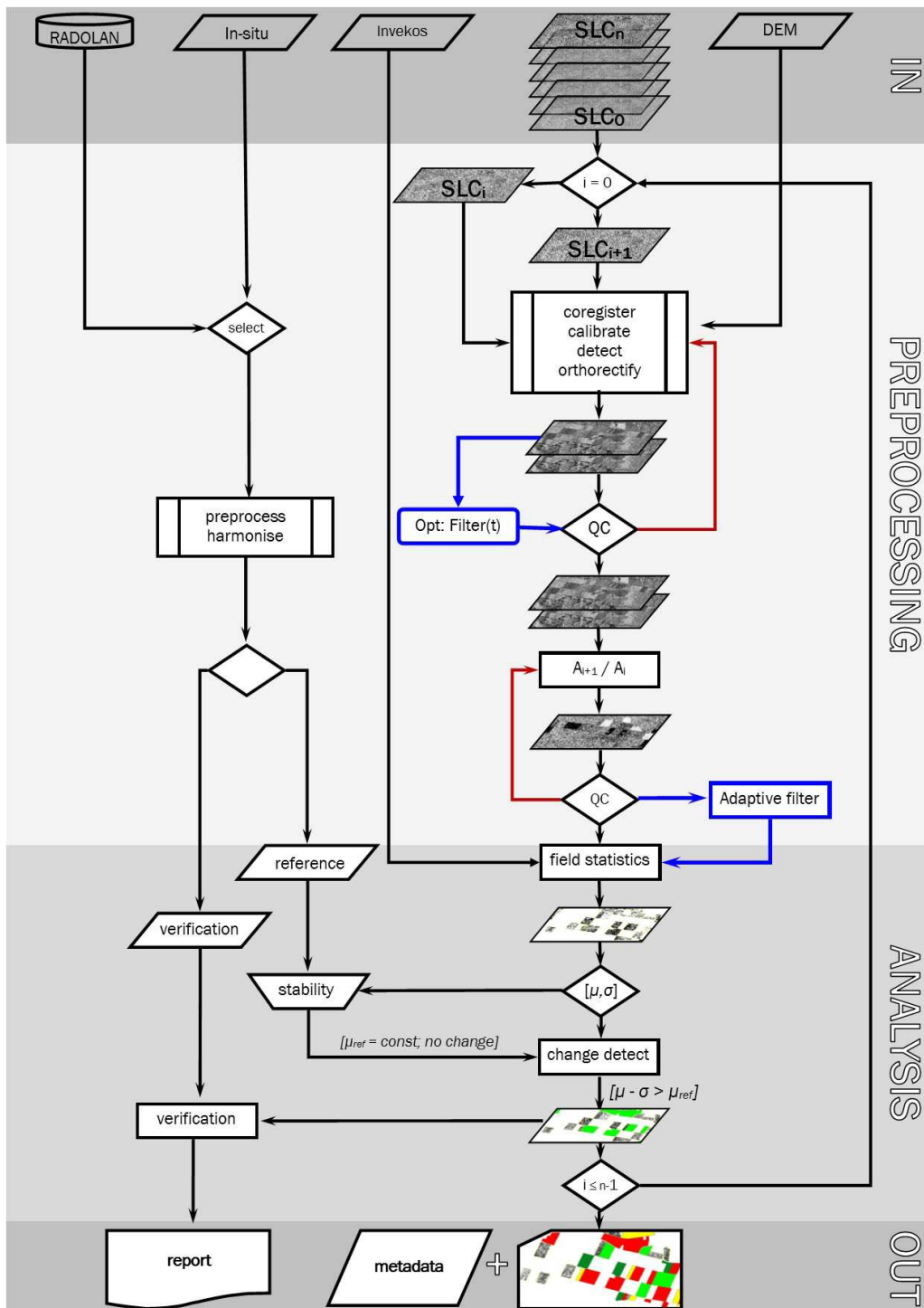


Abb. 11: Programmstrukturplan der einzelnen Prozessabläufe der Methode zur satellitengestützten Schnitttermindetektion

Zusätzlich wurde die entwickelte Methode für eine spätere Programmierung in eine entsprechende IT-Umgebung in der vereinheitlichte Modellierungssprache (UML) beschrieben (Abb. 12). Dabei sind alle Beziehungen zwischen den Prozessen sowie die dynamischen Abläufe gekennzeichnet.

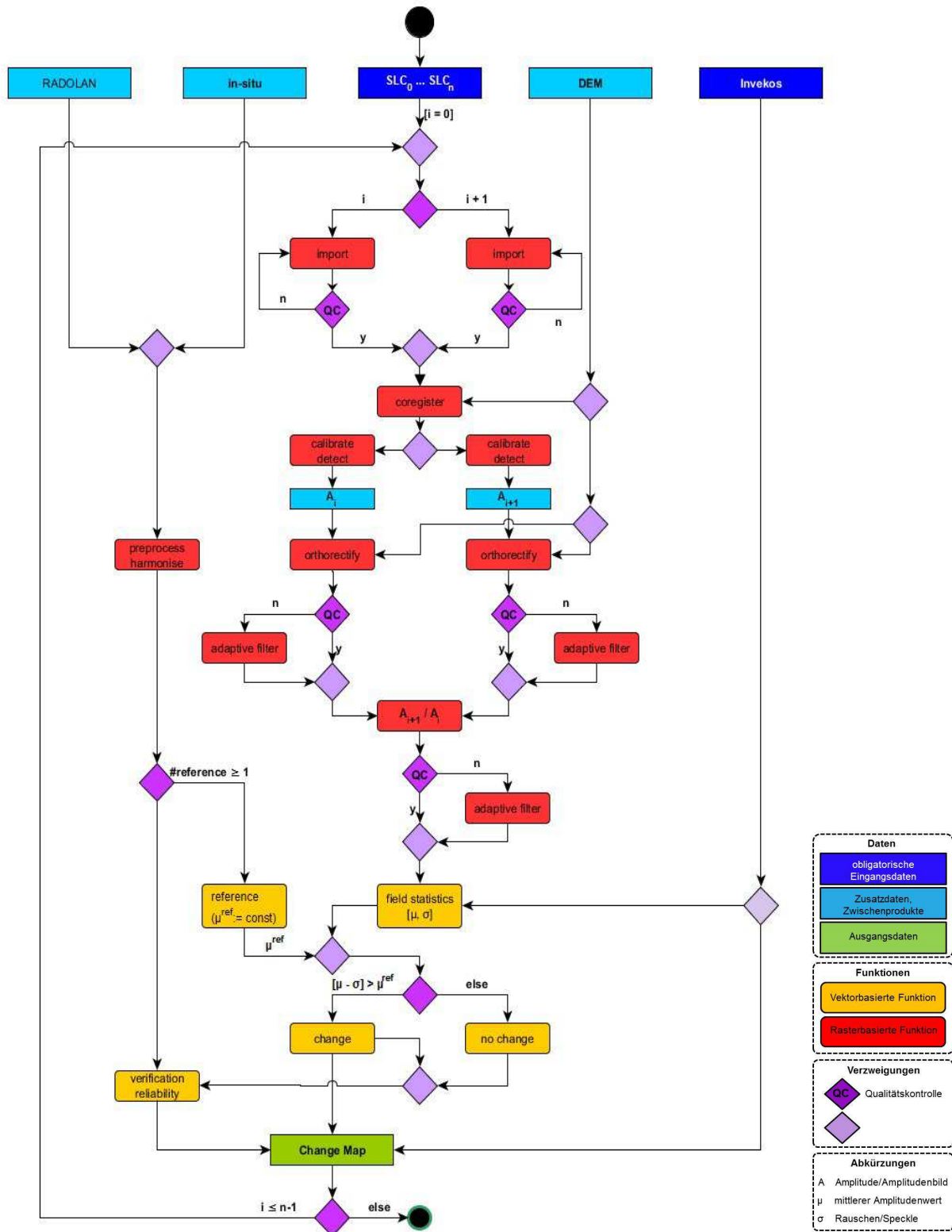


Abb. 12: Beschreibung der Methode zur Schmittermindetektion in UML

Bei einer dauerhaften Einbindung der Methode ist die hohe, zu verarbeitende Datenmenge der Satellitenbilder zu beachten. Eine Möglichkeit könnte die Prozessierung der Daten in einer Cloud sein. Zusätzlich muss bei einer Anwendung der Methode in der gesamten Bundesrepublik Deutschland muss die anonyme Verwendung der Feldstückgrenzen aus den InVeKoS-Daten geklärt werden.

B Modellkomponente

B.1 Anpassung eines Grünlandertragsmodelles

Die gewonnenen Kenntnis der Schnitthäufigkeit als ertragsbestimmender Faktor über die Radarbildauswertung kann zu einer besseren Abschätzung der Grünlanderträge führen. Eine Möglichkeit bietet die Kombination der satellitengestützten Schnitfterminerkennung mit einem Grünlandertragsmodell (Abb. 13).

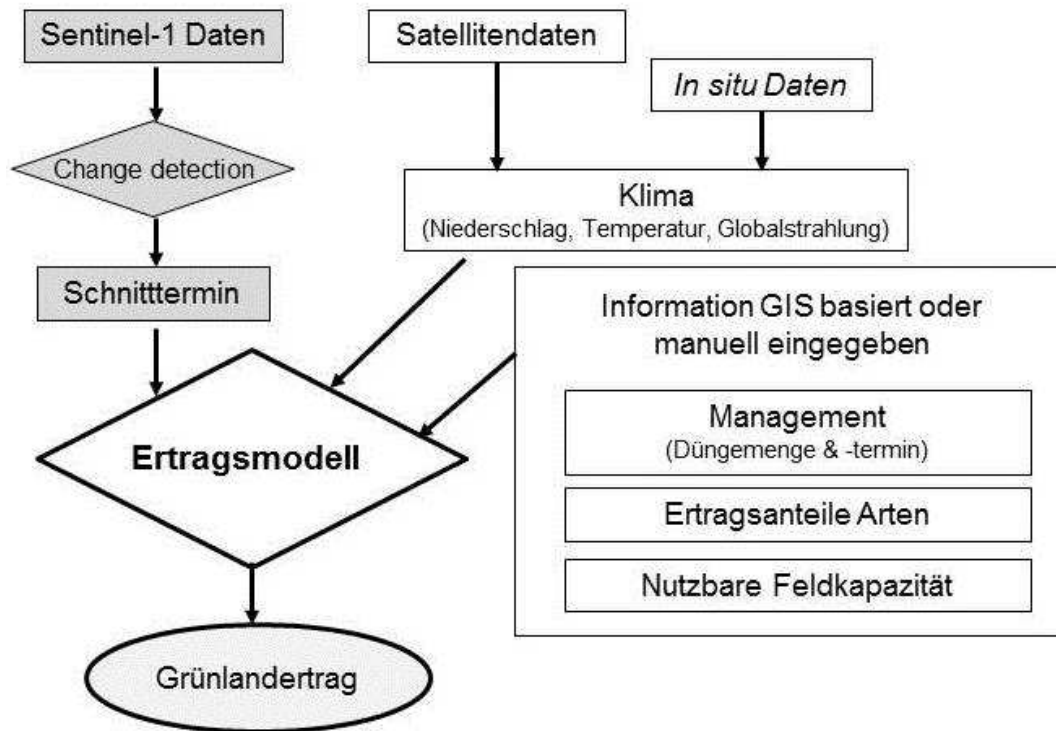


Abb. 13: Skizze der Kombination der satellitengestützten Schnitfterminerkennung (dunkelgrau) mit einem Ertragsmodell zur flächendeckenden Ertragsmodellierung (hellgrau)

An der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) wurde bereits ein an norddeutsche Verhältnisse angepasstes Ertragsmodell erarbeitet. Das FOPROQ (FORage PROduction Quality) ist ein Grünlandmodell, das neben der Ertragsbildung auch eine umfassende Simulation von Futterqualitätsparametern unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren, Bestandescharakteristika und pflanzenbaulichem Management ermöglicht (Herrmann, et al., 2005). Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist dem Endbericht des Unterauftragnehmers CAU (siehe Anhang) zu entnehmen.

Das vorhandene FOPROQ Modell wurde auf das bayerische Testgebiet des Projektes angepasst. Zusätzlich zu der ersten Anpassung wurde der zu erwartenden Arbeitsbedarf für eine hinreichend differenzierte Anpassung dieses Modells an die unterschiedlichen Regionen Bayerns ermittelt, um die Kosten weiterer regionaler Anpassungen abschätzen zu können.

B.1.1 Datengrundlage

Für die Anpassung bzw. Optimierung des Modells war es notwendig, die Aufwuchsentwicklung von Grünland auf repräsentativen Flächen über längere Zeit (hier nur 1-2 Jahre möglich) zu beobachten und alle für die Modellierung des Aufwuchses nötigen Parameter dabei zu erheben. Bei der Wahl der Grünlandflächen sollte beachtet werden, dass sie eine möglichst gleiche Artenzusammensetzung haben sowie und ähnlich bewirtschaftet werden. Für das Testgebiet sind intensiv genutzte Grünlandbestände mit einem hohen Anteil von Deutschen Weidelgras (*Lolium perenne*) und einer 5-fachen Schnittnutzung charakteristisch.

Flächenwahl:

Die Proben für die Anpassung des Ertragsmodells wurden im ersten Projektjahr an 5 Standorten erhoben. Dazu zählen zum einen die Flächen der LfL Versuchsstationen Grub, Karolinenfeld und Osterseeon und zwei private Grünlandflächen. Die beprobten Flächen in Osterseeon sind Monokulturen des Deutschen Weidelgras. Weiterhin wurde eine Grünlandfläche in Bad-Aibling- OT Willing und eine in Bad-Aibling- OT Ellmosen beprobt. Die Flächen in Osterseeon und Ellmosen wurden aufgrund des späten Projektbeginnes und Mangel an kooperativen Landwirten, die Ihre Flächen zur Verfügung stellen könnten, gewählt, obwohl sie als Monokultur im Sortenversuch (Osterseeon) und als extensiv genutztes Grünland ohne Düngung (Ellmosen) nicht ganz den Anforderungen des gesuchten Grünlandtyps entsprachen. Im 2. Projektjahr (2015) wurden diese daher nicht weiter beprobt und durch den Standort Brückmühl (Weidelgras-dominiert, 5-fache Nutzung) ausgetauscht.

Aufwuchsentwicklung:

An allen Standorten wurden regelmäßig und stichpunktartig Grasmenge und -qualität bestimmt. Dazu wurden zu jedem Termin an mindestens drei Stellen mit Hilfe eines 1 m² Rahmens alle Pflanzen 5 cm oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten und in luftdurchlässige Tüten gepackt. Von dem Pflanzenmaterial wurde sofort das Frischgewicht bestimmt. Die Pflanzenproben wurden dann bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Ein Teil jeder Pflanzenprobe wurde nach der Trocknung in das Zentrallabor der LfL in Grub gebracht, wo es auf Futterwerte untersucht wurde. Der andere Teil der Proben wurde für die Bestimmung des Trockensubstanzanteils weiter verarbeitet. Dazu wurde das Pflanzenmaterial gewogen und gehäckselt. Ein Teil des gehäckselten Materials wurde in Aluschalen eingewogen und bei 105°C für 3 Stunden getrocknet. Nach Rückwaage wurde der Trockensubstanzanteil (%) nach folgender Formel berechnet:

$$TS(\%) = \text{Trockengewicht} / \text{Frischgewicht} * 100$$

Da die Proben vorgetrocknet waren, wurde als Frischgewicht das Gewicht nach 60°C Trocknung (Einwaage) verwendet. Anschließend wurde der TS-Anteil für die bei 60°C getrockneten Proben berechnet und mit dem TS-Anteil bei 105°C verrechnet:

$$TS(\%) = TS(60^\circ\text{C}) * TS(105^\circ\text{C}) / 100$$

Umweltdaten

Das Modell erforderte folgende Angaben zu Umweltverhältnissen an den Standorten in täglicher Auflösung:

- Globalstrahlung (J/m²d)
- mittlere, minimale und maximale Tagestemperatur (°C)

- Niederschlag (mm/d)
- Verdunstung/potentielle Evaporation (mm/d)

Die LfL Versuchstationen Grub, Karolinenfeld und Osterseeon sind mit eigenen Wetterstationen ausgerüstet die Teil des bayerischen, agrarmeteorologische Messnetz sind. An allen drei Stationen werden stündlich Temperatur, Niederschlag, Relative Luftfeuchte und Globalstrahlung gemessen. Aus Temperatur und Relativer Luftfeuchte konnte jeweils die tägliche Verdunstung berechnet werden. Die Standorte Willing, Bruckmühl und Ellmosen liegen in der Nähe der LfL Versuchstation Karolinenfeld (Distanz zwischen 3,5 & 11 km). Die Umweltdaten von Karolinenfeld wurden für diese drei Standorte verwendet. Damit wurden kleinräumige Unterschiede der Standorte vernachlässigt. Fehlende Werte (z.B. bei Ausfall der Messgeräte oder Datenlogger) wurden durch Daten der nächstgelegenen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (Ebersberg-Halbing oder Rosenheim) ersetzt.

Management

Die Landwirte bzw. Betriebsleiter gaben Auskunft über die Termine der Schnitte und die Termine, Menge und Art der Düngung auf den jeweiligen Flächen.

Bodenparameter

Das Modell benötigt die standort-abhängige Angabe über die maximale Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im durchwurzelten Bodenraum (nutzbare Feldkapazität, nFK). Dieser Kennwert wurde für jeden Standort bestimmt, indem einmalig an drei repräsentativen Stellen auf der Fläche der Boden untersucht wurde. Bei dieser Untersuchung wurde zunächst eine Bodenansprache gemacht und die Bodenschichten identifiziert. Pro Schicht wurde eine Bodenprobe genommen und im LfL Labor in Freising die Korngrößenverteilung bestimmt. Mit der Korngrößenverteilung konnte anhand der Tabellenwerte (KA4: Tabelle 70, Annahme Lagerungsdichte 3) aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA4 (AG Boden, 1996) die nFK-Werte pro Bodenschicht ermittelt werden.

Laboranalysen:

Neben der Berechnung des Grünlandertrages kann FOPROQ auch die Qualitätsentwicklung des Grünlands abbilden. Für eine Anpassung des Modells in Bezug auf Qualitätswerte wurden die bei 60°C getrockneten Pflanzenproben ins LfL Zentrallabor Grub gegeben. Dort wurden die Proben mittels Nah-Infrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS) auf folgende Standardwerte für Futterqualität untersucht:

Rohasche, Rohprotein, Rohfaser, Rohfett, Zucker, NDF om, ADF om, Enzymlösliche Organische Substanz, Gasbildung (nach Hohenheimer Futterwerttest), Nutzbares Protein

Folgende Werte wurden daraus berechnet:

Ruminale N-Bilanz, Umsetzbare Energie für Wiederkäuer, und Netto-Energie-Laktation

B.1.2 Methodenbeschreibung

Die Funktionalität des FOPROQ-Modells sowie die Schritte der Modellanpassung sind dem Endbericht des Unterauftragnehmers CAU (siehe Anhang) zu entnehmen.

B.1.3 Ergebnisse

Die einzelnen Ergebnisse der Modellanpassung sind dem Endbericht des Unterauftragnehmers CAU (siehe Anhang) zu entnehmen. Die Schlussfolgerung der Modellanpassung gemäß der CAU ist wie folgt:

Die Resultate der Modellanpassungen ergeben für den TM-Ertrag eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten. Die etwas geringere Modellgüte am Standort Karolinenfeld ist auf die standörtlichen Gegebenheiten (Torf) zurückzuführen, die zu Schwierigkeiten im Hinblick auf die modellhafte Abbildung des Wasserhaushaltes führte. Die Simulation der Futterqualitätsparameter zeigt für den Rohproteingehalt und die Energiekonzentration (ME, NEL) im Vergleich zur Ertragsmodellierung weniger zufriedenstellende Ergebnisse. Erfahrungsgemäß hängt die Modellgüte entscheidend davon ab, wie der Startwert des interessierenden Futterqualitätsparameters, wie beispielsweise des Rohproteingehaltes, zu Vegetationsbeginn getroffen wird. Dies wird nicht nur durch Umweltbedingungen und die Bestandeszusammensetzung, sondern in starkem Maße durch die N-Versorgung beeinflusst, welche im Modell nicht als Eingangsgröße Berücksichtigung findet. Für den praktischen Einsatz des Modells (Reifeprüfung Grünland, Schleswig-Holstein, Niedersachsen) hat sich eine manuelle Anpassung des relevanten Modellparameters auf Basis von Probeschnitten als hilfreich erwiesen. Darüber hinaus kann auch die Jahreswitterung 2015 mit sehr geringen Sommerniederschlägen zu einer etwas weniger zufriedenstellenden Modellgüte beigetragen haben. Für die Zellwandfraktionen (NDF, ADF, Rohfaser), die enzymlösliche organische Substanz und den Gehalt wasserlöslicher Kohlenhydrate konnte keine Anpassung des Modells erfolgen, da die Modellalgorithmen abnehmende oder ansteigende Funktionsverläufe zugrunde legen. Die Messwerte zeigten untypische Verläufe, beispielsweise zunächst ansteigende und dann wieder abnehmende NDF-Gehalte, die u.U. auf Schwierigkeiten bei der Probenahme (abgestorbenes Pflanzenmaterial des vorherigen Aufwuchses) zurückzuführen sind.

Diese Ergebnisse dokumentieren, dass für die Modellierung der Futterqualitätsparameter noch weiterer Anpassungsbedarf besteht. Durch zusätzliche Ertrags- und Qualitätserhebungen an weiteren Standorten und zusätzlichen Jahren, d.h. eine Erweiterung der Kalibrationsdatenbasis, könnte eine weitere Steigerung der Prognosegüte der Qualitätsmodellierung erreicht werden.

B.2 Ausblick

Grünlandertrag

Wie in der Schlussfolgerung der Modellanpassung (siehe B 1.3. & Anhang) bereits aufgeführt ist, zeigte die Modellanpassung in Bezug auf Ertrag des im Testgebiet Weidelgrasdominierten, intensiv genutzten Grünland eine gelungene Modellanpassung mit guter Modellgüte. Hier bleibt zu überprüfen in wie weit andere, für Bayern bzw. Deutschland typisches Grünland mit dem Modell berechnet werden kann. Für Bayern ist in Anlehnung an die in der Düngeempfehlung aufgelisteten Grünlandtypen Abb. 1 zu überprüfen, wie der Ertrag (und die Qualität) für folgende Grünlandtypen mit dem Modell simuliert werden kann:

- intensiv genutzte (3-5-fache Nutzung) voralpine kräuterreiche Wiesen und Mähweiden,
- intensiv genutzte Wiesen mit dominierendem Wiesenfuchsschwanz
- extensiv genutzte, ertragsarme Streuwiesen
- extensiv genutzte, ertragsarme Bergwiesen
- extensiv genutzte, ertragsarme Wiesen, die von Glatthafer dominiert sind

Es wird pro Grünlandtyp mindestens ein ähnlicher Aufwand erwartet, wie dies in diesem Projekt für intensiv genutzte, Weidelgras-dominierte Grünland im Voralpengebiet erfolgte. Hinzu kommen die durch Klima und Orografie bedingten Unterschiede der verschiedenen Grünlandanbauegebiete (Abb. 14), die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

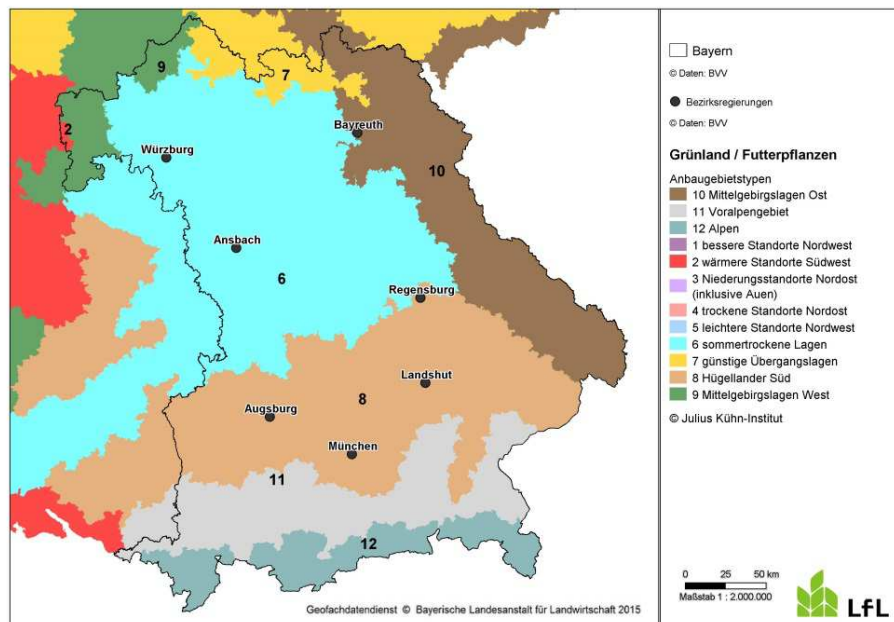


Abb. 14: Grünlandanbauegebiete in Bayern – von 12 Anbauebietstypen von Grünland in Deutschland liegen nach Angaben des Julius-Kühn-Institutes 8 innerhalb Bayerns

Futterqualität

In Bezug auf die Modellierung von Futterqualität zeigte sich, dass noch weiterer Anpassungsbedarf besteht. Eine Erweiterung der Kalibrationsdatenbasis sollte durch zusätzliche Ertrags- und Qualitätserhebungen an weiteren Standorten und zusätzlichen Jahren geschehen, um eine weitere Steigerung der Prognosegüte der Qualitätsmodellierung zu erreichen. Dabei sollten ähnlich wie bei der Ertragsmodellierung alle Hauptgrünlandtypen (siehe oben) in den unterschiedlichen Anbauebenen berücksichtigt werden. Die dadurch entstehenden Laborkosten wären ein erheblicher Kostenfaktor. Möglicherweise könnten Kalibrationsdaten über Kooperation mit Trocknungsgesellschaften günstiger erworben werden. Landwirtschaftliche Trocknungen haben breiten Zugang zu genauen Grünlandertragszahlen sowie umfassende Kenntnis über genaue Schnittermine auf zahlreichen Grünlandflächen in Bayern. Zusätzlich werden Futterwerte des getrockneten Materials bestimmt, da dieses oft als Futterpellets verkauft wird. Diese Daten ergeben sich somit aus dem Arbeitsablauf der Trocknung.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis der wichtigsten Positionen

Die angefallenen Projektkosten und deren Aufteilung in Positionen sind Tab. 10 zu entnehmen.

Tab. 10: Projektkosten aufgeteilt in Positionen

Projektkosten	
Personalausgaben	129.198,26
Vergabe von Aufträgen	111.357,07
Laborkosten	8.100,00
Dienstreisen	5.129,41
Software	17.850,00
Gesamtsumme (in €)	271.634,74

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht den vorher definierten Zielen. Sie war notwendig, da die Erntemenge von Grünland in Bayern (wie auch in anderen Bundesländern) bisher nur grob abgeschätzt werden konnte, und keine flächendeckenden Zahlen vorlagen. Die in diesem Projekt entwickelte Methode liefert Kenntnis der Schnitthäufigkeit als ertragsbestimmender Faktor und kann folglich zu einer besseren Abschätzung der Grünlanderträge führen. Darüber hinaus kann eine Kombination dieser satellitengestützten Schnitfterminerkennung mit einem Ertragsmodell in Zukunft Grünlanderträge flächendeckend berechnen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende haben sich im Vergleich zur Antragsstellung nicht geändert. Es sind keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen erfolgt. Die wissenschaftlichen/technischen Erfolgsaussicht, dass eine flächendeckende Erfassung der Schnitthäufigkeit ganz Bayerns ein Jahr nach Projektende angestrebt wird, scheint bei entsprechender Finanzierung und verlässlicher Abdeckung Bayern mit Sentinel-1 Radardaten weiterhin realistisch. Aus der Schnitthäufigkeit können sich bereits jetzt ohne Ertragsmodell bei Kenntnis von Bestandstyp Ertragszahlen ableiten und Düngegaben auf Plausibilität überprüft werden. Weiterhin könnten sich (im Kontext mit weiteren Daten) Hinweise auf die zu erwartende Diversität der Grünlandarten in bestimmten Regionen sowie über Zeitreihenanalysen (Erfassung, Regionalisierung und Quantifizierung von Nutzungsänderungen) Argumentationsgrundlagen für die Politikberatung ergeben. Damit kann die LfL als Mittelbehörde des Bundeslandes Bayern ihr Ziel einer ressourceneffizienten und steuermittelsparenden Unterstützung bei der Umsetzung des Dienstauftrages erfüllen. Konkret erfolgt dies in der regionalen Biomasseabschätzung für das Testgebiet und künftig für ein Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Daher sollte als nächster Schritt zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse eine Datenbankanwendung entwickelt werden, die auf Grundlage des Schnitftermin-Detektion-Automatismus und des Ertragsmodells zeitnah Grünlanderträge für ganz Bayern berechnen kann. Dafür müssten insbesondere Klima und Standortfaktoren (Bestand, Boden) flächendeckend bestimmt und einbezogen werden, die notwendig für verlässliche Ertragsschätzungen sind. In einem weiteren Schritt könnte ein WebInterface für Landwirte und andere Nutzer entwickelt werden, das Prognosen zu optimalen Schnitftermin und Ertragshöhen für Einzelflächen geben kann.

Die mit diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse für Bayern bzw. die hier genutzte Software/Satellitendatenkombination ist grundsätzlich von allen Länder- & Bundesdienststellen in Deutschland nutzbar (z.B. im Rahmen der vom Wissenschaftlichen Beirat für Biodiversität und genetische Ressourcen beim Bundeslandwirtschaftsministerium geforderten „nationalen Grünlandstrategie“). Benötigt wird allerdings ein (deutschlandweiter) Zugriff auf die anonymisierten InVeKoS-Nutzungsdaten für die genaue Abgrenzung der Grünlandfeldstückgrenzen, so dass keine vorherige Grünlandklassifikation erfolgen muss, die zu einer Ungenauigkeit der Feldstückgrenzen führen könnte. Momentan scheint dieser Zugriff nicht in allen Bundesländern möglich zu sein.

II.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die in diesem Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse wurden auf Fachtagungen im Rahmen von Vorträgen oder Posterpräsentationen vorgestellt und u.a. in dazugehörigen Tagungsbandbänden veröffentlicht (Tab. 11).

Tab. 11: Veröffentlichungen der Ergebnisse auf Tagungen und/oder in Tagungsbänden und Zeitschriften

Datum	Tagung/Zeitschrift	Beitragsform	Titel	Tagungsband
4/2014	Nationales Copernicus Forum, Berlin	Vortrag	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	X
8/2014	Jahrestagung der AGGF (Arbeitsgemeinschaft Grünland und Feldfutterbau), Arnstadt	Poster	Satelliten-gestützte Erfassung von Schnittterminen im Wirtschaftsgrünland	ja
11/2014	Österreichische Pflanzenzüchertagung, Raumberg - Gumpenstein (Österreich)	Vortrag	Erfassung von Schnittterminen im Wirtschaftsgrünland auf Grundlage von Oberflächenänderungen im Radarbildvergleich	ja
2015	LfL Jahresbericht 2014, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung	Bericht	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	
2/2015	Arbeitskreis Landwirte, Kreis Rosenheim	Vortrag	Satellitengestützte Erfassung von Schnittterminen im Grünland und Feldfutterbau	X
2/2015	Jahrestagung GIL (Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft), Geisenheim	Vortrag	Satellitengestützte Erfassung von Schnittterminen im Grünland und Feldfutterbau	ja
5/2015	ISRSE 36 -International Symposium on Remote Sensing of Environment, Berlin	Vortrag	Satellite-based assessment of grassland yields	Ja
5/2015	Sommertagung GFPi (Gemeinschaft zur Förderung von Pflanzeninnovation e. V.), Meschede	Vortrag	Satellitengestützte Erfassung von Schnittterminen im Grünland und Feldfutterbau	X
6/2015	Jahrestagung EGF – European Grassland Federation, Wageningen (NL)	Poster	The use of radar images for detecting when grass is harvested and thereby improve grassland yield estimates	Ja
8/2015	Jahrestagung der AGGF, Aulendorf	Vortrag	Flächenhafte Erfassung von Schnittterminen mittels Radartechnik zur Optimierung von Grünlandertrags-schätzungen	Ja
9/2015	Jahrestagung der GPW (Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften), Braunschweig	Vortrag	Flächenhafte Erfassung von Schnittterminen mittels Radartechnik zur Optimierung von Grünlandertrags-schätzungen	Ja
11/2015	Nationales Copernicus Forum, Berlin	Vortrag & Poster	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	X
11/2015	NEREUS/ Copernicus Workshop, München	Vortrag	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	X
5/2016	Abschlussveranstaltung, Bonn	Vortrag	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	X
6/2016	Geofachdaten LfL, Freising	Vortrag	Satellitengestützte Schätzung von Grünland- und Feldfuttererträgen	X
6/2016	Führungsakademie Bayern: Schule & Beratung	Artikel	Satellitengestützte Ertragsermittlung im Grünland: Nutzung von Radardaten in der Landwirtschaft	
8/2016	Jahrestagung der AGGF, Luxemburg	Poster	Optimierung der satellitengestützten Erfassung von Schnittterminen durch RADOLAN-Niederschlagsdaten	ja
9/2016	Jahrestagung der GfÖ (Gesellschaft für Ökologie), Marburg	Vortrag	Satellite-based monitoring of grassland: Assessment of cutting dates and frequency using Sentinel data	X
9/2016	Schule und Beratung	Artikel	Satellitengestützte Ertragsermittlung im Grünland – Flächendeckende Ertragsermittlung über Radardaten	
9/2016	SPIE Remote Sensing Conference, Edinburgh (Schottland)	Vortrag	Satellite-based monitoring of grassland: Assessment of harvest dates and frequency using SAR	ja

Es folgen detaillierte Angaben zu den schriftlichen Veröffentlichungen:

- Grant, K., Siegmund, R., Vorwalter, T. Baron, M. & Hartmann, S. (2014): Satellitengestützte Erfassung von Schnittermen im Wirtschaftsgrünland. Tagungsband der 58. Jahrestagung der AGGF, Ausgabe 1/2014, Multifunktionalität des Grünlandes erhalten und nutzen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), S. 187 – 190
- Grant K., Wagner M., Siegmund R. & Hartmann S. (2014) Erfassung von Schnittermen im Wirtschaftsgrünland auf Grundlage von Oberflächenänderungen im Radarbildvergleich, 65. Tagung der Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2014, ISBN: 978-3-902849-22-9, S. 39 – 41
- Grant K., Siegmund R., Wagner M. & Hartmann S. (2015) Satellitengestützte Erfassung von Schnittterminen im Grünland und Feldfutterbau, In: Ruckelshausen A., Schwarz H.P., Theuvsen B. (Hrsg.): Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings, Series of the Gesellschaft für Informatik, P-238, S. 57 – 60
- Grant K. Siegmund R., Wagner M. & Hartmann S. (2015): Satellite-based assessment of grassland yields, ISRSE Conference Berlin 11-15 May 2015, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3, S. 15–18
- Grant K., Wagner M., Siegmund R. & Hartmann S. (2015) The use of radar images for detecting when grass is harvested and thereby improve grassland yield estimates, EGF 15-17 May 2015, Grassland Science in Europe, Grassland and forages in high output dairy farming systems, Ausgabe 20, S. 419 – 421
- Grant K., Siegmund R., Wagner M., Kluß C., Herrmann A., Taube F. & Hartmann S. (2015) Flächenhafte Erfassung von Schnittermen mittels Radartechnik zur Optimierung von Grünlandertragschätzungen, Tagungsband der 59. Jahrestagung der AGGF, Grünland effizient und umweltschonend nutzen, Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei LAZBW (Hrsg.), S. 40 - 45
- Grant K., Siegmund R., Wagner M., Kluß C., Herrmann A., Taube F. & Hartmann S. (2015) Regionalisierte Erfassung von Nutzungsintensitäten im Grünland mittels Radartechnik, Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Ausgabe 27, Multifunktionale Agrarlandschaften - Pflanzenbaulicher Anspruch, Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen, Kage H., Sieling K., Francke-Weltmann L. & GPW (Hrsg.), S. 113-114
- Grant K. Siegmund R., Wagner M., Maier H. & Hartmann S. (2016): Optimierung der satellitengestützten Erfassung von Schnittermen durch RADOLAN-Niederschlagsdaten, Tagungsband der 60. Jahrestagung der AGGF, Nachhaltige Milchproduktion: Forschung und Praxis im Dialog, ASTA, Lycée Technique Agricole & CONVIS (Hrsg.), S. 133-135
- Siegmund R., Grant K., Wagner M., Hartmann S. (in press) Satellite-based monitoring of grassland: Assessment of harvest dates and frequency using SAR, SPIE Proceedings, Ausgabe 9998, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VIII
- Grant K. & Hartmann, S. (2016) Satellitengestützte Ertragsermittlung im Grünland – Flächendeckende Ertragsermittlung über Radardaten, Schule und Beratung, Heft 9-10/2016 Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), S. 31-34

Durch die Teilnahme an verschiedenen Arbeitskreisen (Landwirte LK Rosenheim) sowie den Kontakt mit Landwirten und Trocknungsgesellschaften erfolgte ein Wissenstransfer aus dem Forschungsvorhaben in die Praxis. Des Weiteren ist geplant, einige Ergebnisse in ein oder zwei wissenschaftlichen Fachzeitschriften (peer-reviewed) zu veröffentlichen. Auf der Homepage der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wird auch nach Projektende eine Projektübersicht inkl. Schlussbericht abrufbar sein. Außerdem soll der Endbericht in der LfL-Schriftenreihe veröffentlicht werden.

Literaturverzeichnis

- Aase, J. & Siddoway, F., 1981. Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, Band 11, pp. 267-277.
- AG Boden, 1996. *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4) - Nachdruck*. 4. Hrsg. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Albertz, J., 2001. *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Angus, J., Kornher, A. & Torssell, B., 1980. *A system approach to Swedish ley production*, Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Barrett, B., Dwyer, N. & Whelan, P., 2012. Sensitivity of spaceborne radar to near-surface soil moisture in grassland across southern Ireland. *Irish Geography*, 45(2), pp. 131-149.
- Bouman, B. & van Kasteren, H., 1990. Ground-based X-band (3 cm wave) radar backscattering of agricultural crops. I. Sugar beet and potato; Backscattering and crop growth. *Remote Sensing of Environment*, Band 34, pp. 93-105.
- Boumann, B. & van Kasteren, H., 1990. Ground-based X-band (3 cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barely, and oats; the impact of canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, Band 34, pp. 107-118.
- Diepolder, M., Raschbacher, S., Heinz, S. & Kuhn, G., 2013. Rohproteinträge und -gehalte bayerischer Grünlandflächen. In: *Mehr Eiweiß vom Grünland und Feldfutterbau - Potenziale, Chancen und Risiken - Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft*. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, pp. 136-140.
- DLR, 2014. *Copernicus in Deutschland*. [Online]
Available at: <http://www.d-copernicus.de/sentinel-daten-fuer-deutschland>
[Zugriff am 20 11 2014].
- DWD, 2015. *RADOLAN Kurzbeschreibung - Radargestützte Analysen stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeit-betrieb für Deutschland (RADOLAN) und Mitteleuropa (RADOLAN-ME)*. [Online]
Available at:
http://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radarniederschlagsprodukte/radolankurzbeschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4
[Zugriff am 30 05 2016].
- ESA, 2014. *Observing the Earth – Copernicus – Sentinel 1 Facts and Figures*. [Online]
Available at: http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-1_sheet_140311.pdf
[Zugriff am 20 11 2014].

- Fagerberg, B. & Nyman, P., 1994. Modelling weather effects on nutritional value of grass-clover leys. *Swedish Journal of Agricultural Research*, Band 24, pp. 147-156.
- Franke, J., Keuck, V. & Siegert, F., 2012. Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation schemes. *Journal for Nature Conservation*, Band 20, pp. 125-134.
- Grant, K., Siegmund, R., Wagner, M. & Hartmann, S., 2015. Satellite-based assessment of grassland yields. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band XL-7/W3, pp. 15-18.
- Han, D., O'Kiely, P. & Wen Sun, D., 2003. Application of water-stress models to estimate the herbage dry matter yield of permanent grassland pasture sward regrowth. *Biosystems Engineering*, 84(1), pp. 101-111.
- Hartmann, S., Diepolder, M. & Lichti, F., 2011. Grünland für die Biogasanlage. *Biogas Forum Bayern*, Nr. 1-12/2011, pp. 1-10.
- Hatfield, J., 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote Sensing of Environment*, Band 13, pp. 301-311.
- Herrmann, A., Kelm, M., Kornher, A. & Taube, F., 2005. Performance of grassland under different cutting regimes as affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather—a simulation study. *European Journal of Agronomy*, Band 22, pp. 141-158.
- Hunt, H. et al., 1991. Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems. *Ecological Modelling*, Band 53, pp. 205-246.
- Kornher, A., Nyman, P. & Taube, F., 1991. Ein Computermodell zur Berechnung der Qualität und Qualitätsveränderung von gräserdominierten Grünlandaufwüchsen aus Witterungsdaten. *Das wirtschaftseigene Futter*, Band 37, pp. 232-248.
- Kornher, A. & Torssell, B., 1983. Estimation of parameters in a yield prediction model for temporary grassland using regional experimental data. *Swedish Journal of Agricultural Research*, Band 13, pp. 137-144.
- Le Toan, T. et al., 1997. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1), pp. 41-56.
- Nouvellon, Y. et al., 2001. Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. *Remote Sensing of Environment* 78, Band 78, pp. 131-149.
- Oppelt, N., 2010. Use of remote sensing data to assist crop modeling. *Journal of Applied Remote Sensing*, Band 4.
- Petersen-Fredrich, E., 1987. *Quantitative Beschreibung des Ertragsverlaufes und der Qualitätsentwicklung von Grünlandbeständen durch dynamische rechnergestützte Modelle*, Universität Kiel: Dissertation.

Ribbes, F. & Le Toan, T., 1999. Rice field mapping and monitoring with RADARSAT data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(4), pp. 745-765.

Schapendonk, A., Stol, W., van Kraalingen, D. & Bouman, B., 1998. LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, Band 9, pp. 87-100.

Torsell, B. & Kornher, A., 1983. Validation of a yield prediction model for temporary grasslands. *Swedish Journal of Agricultural Research*, Band 13, pp. 125-135.

Trnka, M. et al., 2006. A simple statistical model for predicting herbage production from permanent grassland. Band 61, pp. 253-271.

Wendland, M., Diepolder, M. & Capriel, P., 2012. *Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland - Gelbes Heft*. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.

Zoughi, R., Bredow, J. & Moore, R., 1987. Evaluation and comparison of dominant backscattering sources at 10 GHz in two treatments of tall-grass prairie. *Remote Sensing of Environment*, Band 22, pp. 395-412.

Anlage

- Tabelle A1: Detektionsergebnisse aus der Analyse aller verfügbaren Radarbildpaare
- Karte 1: Schnittfrequenzen im Testgebiet 2015 mittels Sentinel-1A
- Karte 2: Schnittfrequenzen im Testgebiet 2015 mittels COSMO-SkyMed
- Endbericht Unterauftrag CAU „Modellierung der Ertragsbildung und Qualitätsentwicklung von Grünlandbeständen“

Tabelle A1: Detektionsergebnisse aus der Analyse aller verfügbaren Radarbildpaare

Sentinel-1A Bildpaarvergleich

ungefiltert:

Orbit	95	95	95	168	168	168	95	95	95	95	95	168-HH	168-HH	95	95	95	95	95	95	95	95	95	168	95	
Datum	10.4.-22.4.	22.4.-4.5.	10.4.-4.5.	27.4.-9.5.	9.5.-2.6.	9.5.-2.6.	4.5.-16.5.	16.5.-9.6.	16.5.-9.6.	9.6.-3.7.	9.6.-3.7.	14.6.-8.7.	14.6.-8.7.	3.7.-15.7.	15.7.-8.8.	15.7.-8.8.	8.8.-20.8.	8.8.-20.8.	20.8.-1.9.	20.8.-1.9.	1.9.-13.9.	13.9.-31.10.	24.10.-5.11.	31.10.-12.11.	
					Mai Shape*	Juni Shape		Mai Shape	Juni Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juli Shape	Juli Shape	August Shape	August Shape	August Shape	August Shape	Sept Shape					
Schnitt richtig erkannt	x	3	2	158	167	9	308	4	39	30	5	20	12	5	36	21	85	6	6	x	21	x	46	x	
"kein Schnitt" richtig erkannt	322	24	145	123	95	54	3	232	101	38	44	85	34	69	9	70	13	144	176	36	x	37	86		
Schnitt falsch erkannt	17	311	190	47	74	116	7	101	12	8	11	63	36	11	4	62	118	36	25	120	x	5	12		
Schnitt nicht erkannt	x	1	2	11	3	x	21	2	27	103	33	11	11	8	44	77	12	44	x	24	x	10	x		
Summe Referenzflächen	339	339	339	339	339	179	339	339	179	179	93	179	93	93	93	230	230	230	201	201	201	x	98	98	
zeitlicher Abstand Aufnahme	12	12	24	12	24	24	12	12	24	24	24	24	24	12	24	24	12	12	12	12	12	48	12	12	
Detektionsrate	95,0	8,0	43,4	82,9	77,3	35,2	91,7	69,6	78,2	38,0	52,7	58,7	49,5	79,6	48,4	39,6	42,6	65,2	87,6	28,4			84,7	87,8	

Frostfilter 7x7:

Orbit	95	95	95	168	168	168	95	95	95	95	95	168-HH	168-HH	95	95	95	95	95	95	95	95	95	168	95
Datum	10.4.-22.4.	22.4.-4.5.	10.4.-4.5.	27.4.-9.5.	9.5.-2.6.	9.5.-2.6.	4.5.-16.5.	16.5.-9.6.	16.5.-9.6.	9.6.-3.7.	9.6.-3.7.	14.6.-8.7.	14.6.-8.7.	3.7.-15.7.	15.7.-8.8.	15.7.-8.8.	8.8.-20.8.	8.8.-20.8.	20.8.-1.9.	20.8.-1.9.	1.9.-13.9.	13.9.-31.10.	24.10.-5.11.	31.10.-12.11.
					Mai Shape	Juni Shape		Mai Shape	Juni Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juli Shape	Juli Shape	August Shape	August Shape	August Shape	August Shape	Sept Shape				
Schnitt richtig erkannt	x	3	3	161	168	9	316	3	41	29	3	19	11	6	39	23	87	4	4	x	22	x	46	
"kein Schnitt" richtig erkannt	321	21	153	115	86	50	2	235	99	39	41	82	33	70	10	74	16	144	176	38	x	38		
Schnitt falsch erkannt	18	314	183	55	83	120	8	98	14	7	14	66	37	10	3	58	115	36	25	118	x	2		
Schnitt nicht erkannt	x	1	1	8	2	x	13	3	25	104	35	12	12	7	41	75	10	46	x	23	x	9		
Summe Referenzflächen	339	339	339	339	339	179	339	339	179	179	93	179	93	93	93	230	230	230	201	201	201	x	98	
zeitlicher Abstand Aufnahme	12	12	24	12	24	24	12	12	24	24	24	24	24	12	24	24	12	12	12	12	12	48	12	
Detektionsrate	94,7	7,1	46,0	81,4	74,9	33,0	93,8	70,2	78,2	38,0	47,3	56,4	47,3	81,7	52,7	42,2	44,8	64,3	87,6	29,9			85,7	

Multitemporal Filter:

Orbit	95	95	95	168	168	168	95	95	95	95	95	168-HH	168-HH	95	95	95	95	95	95	95	95	95	168	95
Datum	10.4.-22.4.	22.4.-4.5.	10.4.-4.5.	27.4.-9.5.	9.5.-2.6.	9.5.-2.6.	4.5.-16.5.	16.5.-9.6.	16.5.-9.6.	9.6.-3.7.	9.6.-3.7.	14.6.-8.7.	14.6.-8.7.	3.7.-15.7.	15.7.-8.8.	15.7.-8.8.	8.8.-20.8.	8.8.-20.8.	20.8.-1.9.	20.8.-1.9.	1.9.-13.9.	13.9.-31.10.	24.10.-5.11.	31.10.-12.11.
					Mai Shape	Juni Shape		Mai Shape	Juni Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juni Shape	Juli Shape	Juli Shape	Juli Shape	August Shape	August Shape	August Shape	August Shape	Sept Shape				
Schnitt richtig erkannt	x	3	3	x	x	x	314	3	39	29	5	x	x	6	39	22	87	5	5	x	22	x	x	x
"kein Schnitt" richtig erkannt	324	23	143	x	x	x	3	229	101	39	43	x	x	70	10	74	17	142	175	37	x	x	x	90
Schnitt falsch erkannt	15	312	192	x	x	x	7	104	12	7	12	x	x	10	3	58	114	38	26	119	x	x	8	
Schnitt nicht erkannt	x	1	1	x	x	x	15	3	27	104	33	x	x	7	41	76	10	45	x	23	x	x	x	
Summe Referenzflächen	339	339	339				339	339	179	179	93			93	93	230	230	230	201	201	201	x	98	
Detektionsrate	95,6	7,7	43,1				93,5	68,4	78,2	38,0	51,6			81,7	52,7	41,7	45,2	63,9	87,1	29,4			91,8	

*Monat Shape = durch mehrfache Kartierung des Testgebietes lagen für gleiche Bildpaare unterschiedliche Feldstückinformationen als Referenz zugrunde

Tabelle A1 (Fortsetzung): Detektionsergebnisse aus der Analyse aller verfügbaren Radarbildpaare

CosmoSkyMed Bildpaarvergleich

ungefiltert:

Orbit	HI-14 ASC	HI-14 ASC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	
Datum	2.5.-10.5.	10.5.-14.5.	1.5.-9.5.	9.5.-17.5	17.5.-6.6.	6.6.-10.6.	10.6.-18.6.	18.6.-20.7.	20.7.-21.7.	21.7.-24.7.	20.7.-24.7.	29.8.-6.9.	29.8.-6.9.	6.9.-14.9.	14.9.-23.9.	23.9.-30.9.
												August Shape*	Sept Shape			
Schnitt richtig erkannt	137	86	159	156	39	30	74	28	7	2	5	13	x	63	6	35
"kein Schnitt" richtig erkannt	41	48	124	142	107	57	84	10	49	25	23	180	168	5	115	21
Schnitt falsch erkannt	133	127	50	27	12	85	17	x	35	66	59	37	33	130	6	125
Schnitt nicht erkannt	28	78	6	14	21	7	4	55	2	x	6	x	x	3	74	20
Summe Referenzflächen	339	339	339	339	179	179	179	93	93	93	93	230	201	201	201	201
zeitlicher Abstand Aufnahme	8	4	8	8	20	4	8	32	1	3	4	8	8	8	9	7
Detektionsrate	52,5	39,5	83,5	87,9	81,6	48,6	88,3	40,9	60,2	29,0	30,1	83,9	83,6	33,8	60,2	27,9

Frostfilter 7x7:

Orbit	HI-14 ASC	HI-14 ASC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	
Datum	2.5.-10.5.	10.5.-14.5.	1.5.-9.5.	9.5.-17.5	17.5.-6.6.	6.6.-10.6.	10.6.-18.6.	18.6.-20.7.	20.7.-21.7.	21.7.-24.7.	20.7.-24.7.	29.8.-6.9.	29.8.-6.9.	6.9.-14.9.	14.9.-23.9.	23.9.-30.9.
												August Shape	Sept Shape			
Schnitt richtig erkannt	126	97	156	156	35	28	74	24	5	2	5	12	x	63	5	31
"kein Schnitt" richtig erkannt	45	48	145	136	109	61	83	10	44	18	16	184	172	5	113	19
Schnitt falsch erkannt	128	126	29	33	10	81	18	x	40	73	67	33	29	130	8	127
Schnitt nicht erkannt	39	67	9	14	25	9	4	59	4	x	5	1	x	3	75	24
Summe Referenzflächen	338	338	339	339	179	179	179	93	93	93	93	230	201	201	201	201
zeitlicher Abstand Aufnahme	8	4	8	8	20	4	8	32	1	3	4	8	8	8	9	7
Detektionsrate	50,6	42,9	88,8	86,1	80,4	49,7	87,7	36,6	52,7	21,5	22,6	85,2	85,6	33,8	58,7	24,9

Multitemporal Filter:

Orbit	HI-14 ASC	HI-14 ASC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	HI-09 DSC	
Datum	2.5.-10.5.	10.5.-14.5.	1.5.-9.5.	9.5.-17.5	17.5.-6.6.	6.6.-10.6.	10.6.-18.6.	18.6.-20.7.	20.7.-21.7.	21.7.-24.7.	20.7.-24.7.	29.8.-6.9.	29.8.-6.9.	6.9.-14.9.	14.9.-23.9.	23.9.-30.9.
												August Shape	Sept Shape			
Schnitt richtig erkannt	134	87	157	158	37	29	74	20	6	2	6	12	x	63	5	32
"kein Schnitt" richtig erkannt	43	47	143	140	109	59	80	10	49	19	17	185	170	4	116	21
Schnitt falsch erkannt	131	128	31	29	10	83	21	x	35	72	65	32	31	131	5	125
Schnitt nicht erkannt	31	77	8	12	23	8	4	63	3	x	5	1	x	3	75	23
Summe Referenzflächen	339	339	339	339	179	179	179	93	93	93	93	230	201	201	201	201
zeitlicher Abstand Aufnahme	8	4	8	8	20	4	8	32	1	3	4	8	8	8	9	7
Detektionsrate	52,2	39,5	88,5	87,9	81,6	49,2	86,0	32,3	59,1	22,6	24,7	85,7	84,6	33,3	60,2	26,4

*Monat Shape = durch mehrfache Kartierung des Testgebietes lagen für gleiche Bildpaare unterschiedliche Feldstückinformationen als Referenz zugrunde

Tabelle A1 (Fortsetzung): Detektionsergebnisse aus der Analyse aller verfügbaren Radarbildpaare

TerraSAR-X Bildpaarvergleich

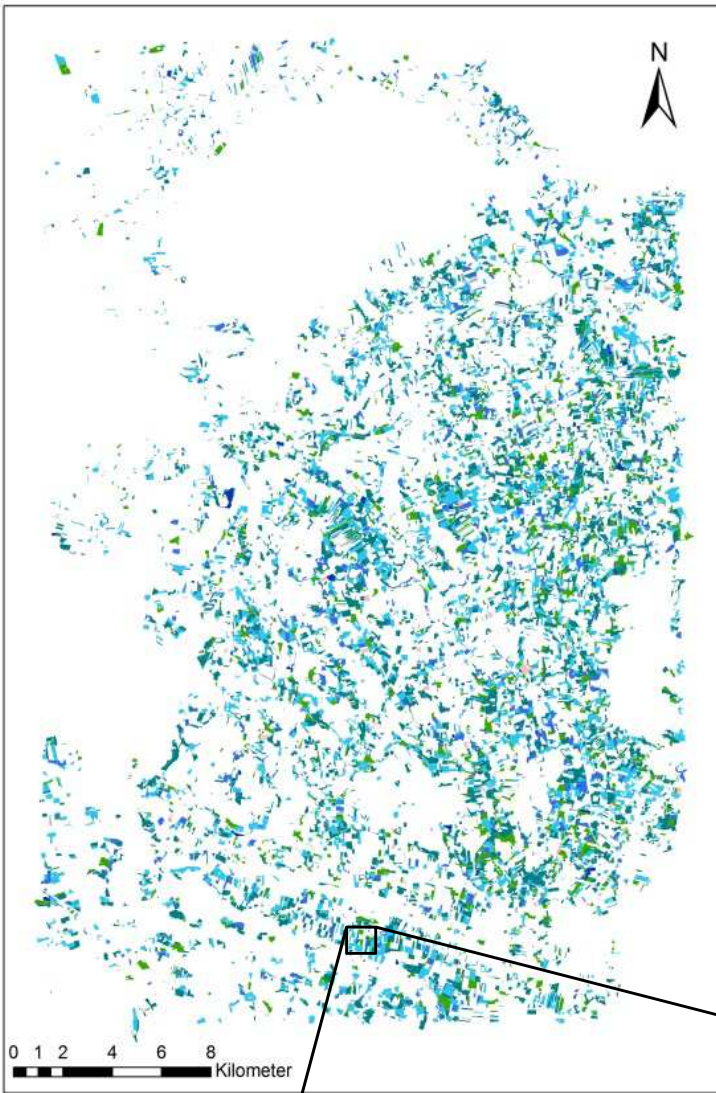
Frostfilter 7x7:

Orbit	2 DSC	55 ASC	56 ASC
Datum	19.6.& 30.6.	22.6.&3.7.	22.6.&3.7.
		Juni Shape	Juli Shape
Schnitt richtig erkannt	1	13	13
"kein Schnitt" richtig erkannt	89	120	42
Schnitt falsch erkannt	73	30	25
Schnitt nicht erkannt	3	11	7
Summe Referenzflächen	166	174	87
zeitlicher Abstand Aufnahme	11	11	11
Detektionsrate	54,2	76,4	63,2

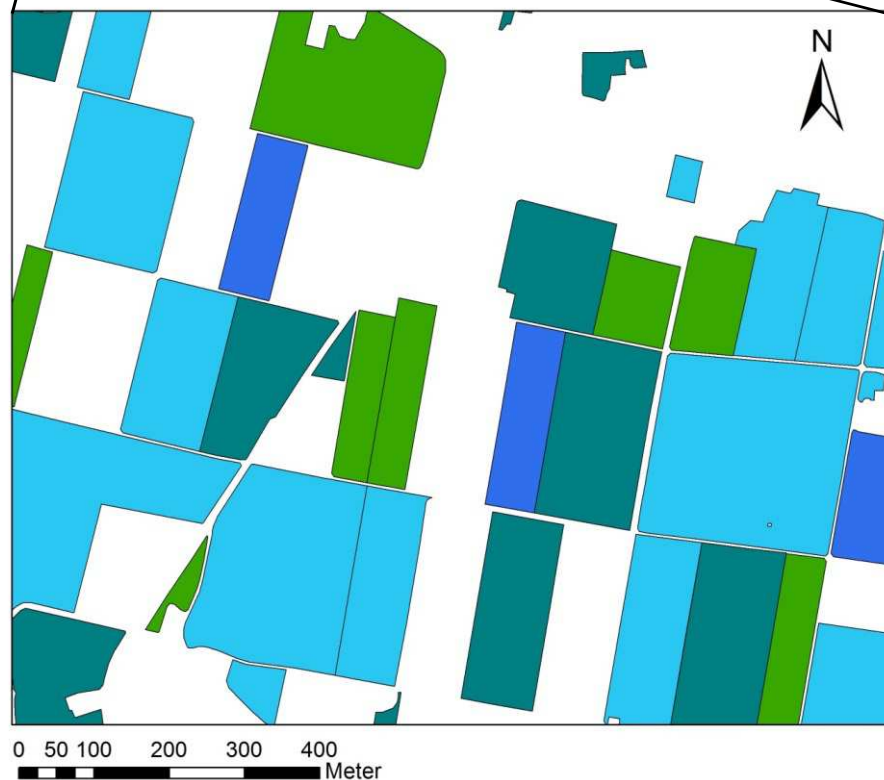
**Monat Shape = durch mehrfache Kartierung des Testgebietes lagen für gleiche Bildpaare unterschiedliche Feldstückinformationen als Referenz zugrunde*

Karte 1

Schnittfrequenz im Testgebiet 2015: Sentinel-1A

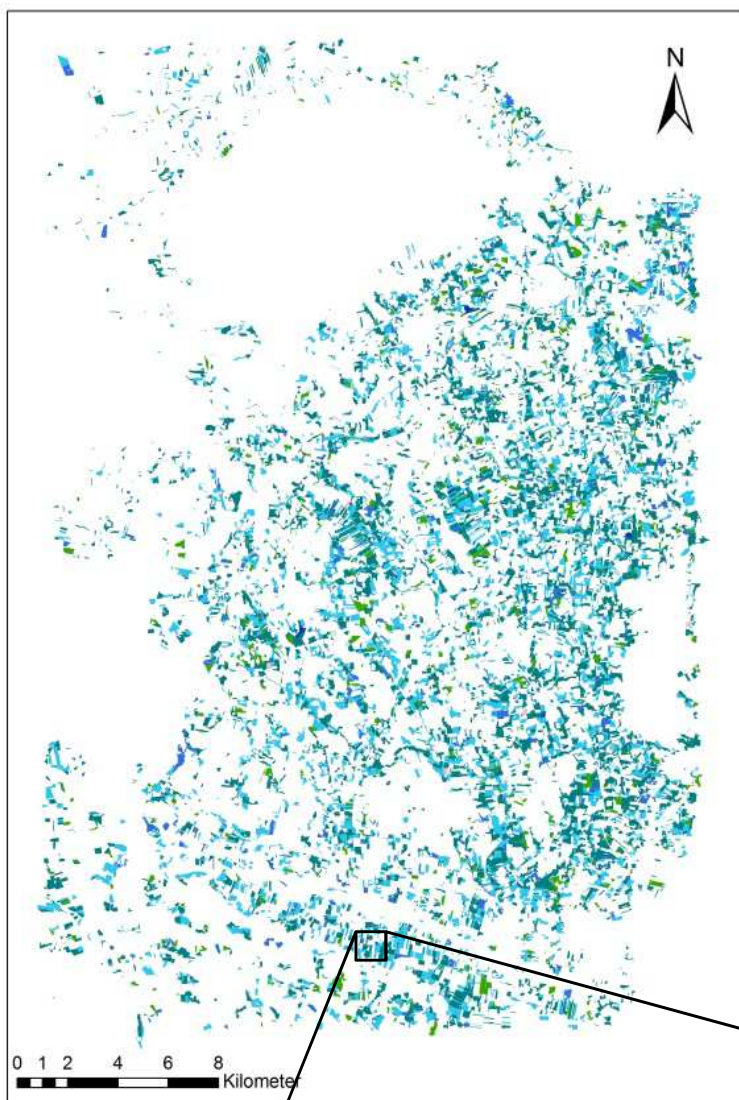


Schnitte pro Jahr

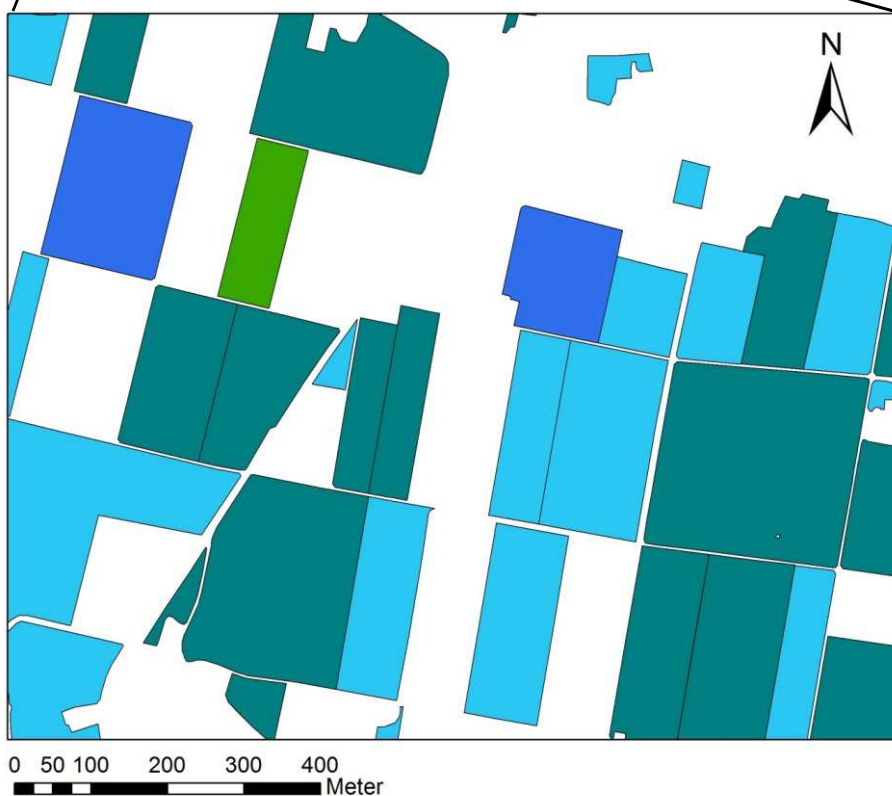


Karte 2

Schnittfrequenz im Testgebiet 2015: Cosmo-SkyMed



Schnitte pro Jahr



Endbericht

Satellitengestützte Schätzung von Grünland und Futtererträgen

Unterauftrag

„Modellierung der Ertragsbildung und Qualitätsentwicklung von Grünlandbeständen“

Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

C. Kluß, F. Taube, A. Herrmann

Inhalt

Modellbeschreibung.....	2
1.1 Einleitung.....	2
1.2 Ertragsmodell	2
1.3 Qualitätsmodell	6
1.4 Modellkalibrierung	7
1.5 Sensitivitätsanalyse	13
Schlussfolgerungen.....	17
Literatur	17
Anhang	19

Modellbeschreibung

1.1 Einleitung

FOPROQ (FOrage PROduction Quality) ist eines der wenigen Grünlandmodelle, das neben der Ertragsbildung eine umfassende Simulation von Futterqualitätsparametern unter Berücksichtigung von Umweltfaktoren, Bestandes-Charakteristika und pflanzenbaulichem Management ermöglicht (Torssell und Kornher, 1983a und b; Kornher et al., 1991). Basierend auf dem Ansatz von Angus et al. (1980) simuliert FOPROQ die täglichen Änderungen von Trockenmasse-Ertrag. Dieser Ansatz wurde fortlaufend weiter entwickelt (Kornher und Petersen, 1986 und Petersen-Fredrich, 1987) und um ein Futterqualitätsmodell erweitert (Petersen-Fredrich, 1987, Kornher et al., 1991).

FOPROQ-Simulationen basieren auf Wetterdaten, Bestandes- und Bodeneigenschaften. Das Modell ist für die Simulation von Metabolische Energie (ME), Netto-Energie-Laktation (NEL), Rohproteingehalt (XP) und andere Qualitätseigenschaften von unterschiedlichen Grünlandbeständen gut geeignet. Der Einfluss folgender Faktoren wird im Modell berücksichtigt:

- die initiale Bestandes-Eigenschaften, wie: Art, Sorte (Genotyp), Bestandeszusammensetzung, -dichte und phänologische Entwicklung der Pflanzen eines Bestandes.
- die tägliche Umweltverhältnisse als Modell-Eingabe: Licht (Globalstrahlung, $J/m^2/Tag$), mittlere Tagestemperatur ($^{\circ}C$), Niederschlag (mm/Tag), Verdunstung (potentielle Evaporation, mm/Tag)
- als Standort-abhängige Eingabe-Parameter hat die maximale Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im durchwurzelten Bodenraum (Feldkapazität)
- die Bewirtschaftungsmaßnahmen, d.h. Nutzungsstrategie (Zeitpunkt bzw. Rhythmus der Nutzungen).

FOPROQ hat sich als zuverlässig unter verschiedenen klimatischen Bedingungen erwiesen (Kornher und Torssell, 1983a und b; Fagerberg und Nyman, 1994 und 1995), so dass die Modellalgorithmen als allgemeingültig angenommen werden können. Das Modell wird unter anderem in der Officialberatung der Landwirtschaftskammern Schleswig-Holstein und Niedersachsen zur Prognose des Erntetermins von Grünlandbeständen erfolgreich eingesetzt. Eine Modellparametrisierung, die eine bundesweite Prognose der Jahresleistung hinsichtlich Ertrag und Futterqualität von intensiv schnittgenutzten Grünlandbeständen gestattet, ist aufgrund einer fehlenden Datenbasis jedoch noch nicht vorhanden. Im Folgenden wird das Ertrags- und Futterqualitätsmodell von FOPROQ ausführlich beschrieben und eine Kalibration an Versuchsdaten vorgestellt, abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

1.2 Ertragsmodell

Der Zuwachs im Frühjahr und nach jeder Nutzung eines Grünlandbestandes beginnt mit einem initialen Wert für die vorhandene Biomasse (W_0), die das Zuwachspotential zu Beginn des Aufwuchses charakterisiert. Die tägliche Wachstumsrate (ΔW , g/Tag) wird aus dem Produkt der oberirdischen Biomasse (W , g/m^2) des Vortages und der aktuelle relativen Zuwachsrate (R , $g/g/Tag$) berechnet:

$$\Delta W = W * R$$

Die optimale Zuwachsrate (rs , $g/g/Tag$) wird im Modell beeinflusst durch

- einen Altersindex (AGE), der die Auswirkungen der Pflanzenalterung in Abhängigkeit des Blattflächenindex (LAI) berechnet und

- einen Wachstumsindex (GI), der die Auswirkungen von Temperatur, Strahlung und pflanzenverfügbarem Bodenwasser auf die Zuwachsrate bestimmt:

$$R = r_s * AGE * GI$$

Einfluss des Pflanzenalters (AGE)

Die relative Wachstumsrate eines Grünlandbestandes ist zu Beginn jeder Zuwachsperiode am höchsten (r_s , g/g/Tag). Während des Zuwachses nimmt diese kontinuierlich ab. Modelliert wird dies durch die Alterung des Bestandes (AGE), der an die Zunahme des Blattflächenindex (LAI , leaf area index, m^2/m^2) gekoppelt ist. Der LAI berechnet sich aus der erntebaren Biomasse (W) und den beiden Modell-Parametern b_{lai} und c_{lai}

$$LAI = b_{lai} * (1 - \exp(-c_{lai} * W))$$

Beeinflusst wird der Altersindex durch den halben maximal auftretender Blattflächenindex (LAI_{50}) und der Konstante ak , die die Krümmung der AGE-Kurve bestimmt. So ergibt sich eine S-Funktion, die mit ansteigendem Blattflächenindex von 1 auf 0 absinkt:

$$AGE = 1 / (1 + (LAI / LAI_{50})^{ak})$$

Der Startwert der relativen Wachstumsrate (r_s) und die Parameter der Altersfunktion sind spezifische Kenngrößen der Produktivität eines Bestandes und können somit für jeden Aufwuchs einzeln gewählt werden. Der Wachstumsbeginn im Frühjahr, d. h. der Tag an dem die Berechnung der täglichen Wachstumsraten im Modell beginnt, wird anhand der vorgegebenen mittleren Tagestemperatur, einer gewählten Basistemperatur (0°C) und einem Temperatursummen-Schwellwert (250°C) berechnet.

Einfluss der Umweltfaktoren

Der Einfluss von Umweltfaktoren auf den Ertragszuwachs wird durch einen Umweltindex (GI) berücksichtigt (Fitzpatrick und Nix, 1970). Dieser setzt sich aus einem Temperaturindex (TI), einem Strahlungsindex (RI) sowie einem Index für das pflanzenverfügbare Bodenwasser (WI) zusammen. Diese Umweltindices sind auf einen Wertebereich von 0 bis 1 beschränkt. Bei einem Wert von 0 ist die Zuwachsrate gleich null, bei einem Wert von 1 ist die Zuwachsrate unter optimalen Bedingungen maximal.

Temperaturindex

Für den Zusammenhang der mittleren Tagestemperatur ($^\circ\text{C}$) und dem Temperaturindex wird eine glockenförmige Funktion angenommen:

$$TI = 0 \text{ falls } T < T_0 \text{ oder } T > T_{max}$$

$$TI = 1 - 0.5 (2z)^{tk} \text{ falls } z < 0.5$$

$$TI = 0.5 (2(1-z))^{tk} \text{ falls } z < 1$$

mit $z = |T_{opt} - T| / |T_{opt} - T_0|$, der mittleren Tagestemperatur in einer Höhe von 2m (T , $^\circ\text{C}$), der mittlere Tagestemperatur für maximales Wachstum ($T_{opt} = 17^\circ\text{C}$) und der mittlere minimalen und maximalen Tagestemperatur für Wachstum ($T_0 = 1^\circ\text{C}$; $T_{max} = 42^\circ\text{C}$) und einer Krümmungskonstanten tk .

Strahlungsindex

Bei der Berechnung des Strahlungsindex wird berücksichtigt, dass das nutzbare Strahlungsmaximum vom Blätterdachindex (CAI , crop area index) abhängt. Die Höhe der Globalstrahlungssumme bei Lichtsättigung (R_{max} , $\text{J}/\text{m}^2/\text{Tag}$) eines Bestandes, bei dem der Strahlungsindex also den Wert 1 annimmt, ist abhängig vom Blattflächenindex. Bis zu einem für Bestände wählbaren minimalen Blattflächenindex (LAI_{low}) kann R_{max} ein Wert in Abhängigkeit vom Bestand zugewiesen werden ($rmlo$). Steigt der Blattflächenindex des Bestandes während des Zuwachses an, erhöht sich R_{max} von $rmlo$ auf $rmxp$. Dabei $rmlo$ die minimal für Wachstum erforderliche tägliche Strahlungssumme und $rmxp$ die tägliche Strahlungssumme für maximales Wachstum.

Zur Berechnung von R_{\max} wird ein Blätterdachindex CAI verwendet, der zwischen den Parametern LAI_{low} und LAI_{high} von 0 auf 1 ansteigt.

$$CAI = 1 - \exp(-cank * (LAI - LAI_{\text{low}}) / LAI_{\text{high}}) / (1 - \exp(-cank))$$

$$R_{\max} = rmlo + CAI * (rmxp - rmlo)$$

Die Beziehung zwischen der täglichen Summe einfallender kurzwelliger Strahlung (R , J/m²/Tag) und dem Strahlungsindex RI wird beschrieben durch

$$RI = (1 - \exp(-rk * R / R_{\max})) / (1 - \exp(-rk))$$

mit einer Konstanten rk , die den Verlauf der Strahlungs-Responskurve bestimmt.

Bodenwasserindex

Der Bodenwasserhaushalt von FOPROQ wird durch die Menge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, das eine zuvor gewählte Bodenart im Wurzelraum speichern kann definiert. Dadurch kann das Modell auch an verschiedene Bodenverhältnisse angepasst werden. Die obere Bodenzone wird als einschichtiger Wasserspeicher betrachtet. Die Evapotranspiration (ET_{akt}) stellt in dieser Bodenzone die wesentlichste Bilanzgröße dar. Das überlaufende Wasser wird als Sickerwasser (bzw. Grundwasserneubildung) angenommen. Der Bodenwasserspeicher wird durch das pflanzenverfügbare Bodenwasser (nFK) gebildet, das weder als Sickerwasser in tiefere Bodenschichten versickert noch durch Kapillarkräfte so stark gebunden ist, dass die Pflanzen es dem Boden nicht entziehen können.

Die aktuelle Evapotranspiration ist bestimmt durch die potenziellen Evapotranspiration (ET_{pot}) und limitiert durch die Wassermenge im Boden, die für die Verdunstung zur Verfügung steht. Bei maximaler Feldkapazität (BWF) hat ET_{act} die gleiche Größe wie ET_{pot} und das Verhältnis $ET_{\text{act}}/ET_{\text{pot}}$ beträgt 1. Wenn der Boden trocknet, behält ET_{act} zunächst den gleichen Wert wie ET_{pot} bis eine bestimmte Bodenwassermenge (BWG , Bodenwassergrenzwert) erreicht wird. Bei weiterer Austrocknung sinkt ET_{act} unter ET_{pot} . Dadurch sinkt das Verhältnis $ET_{\text{act}}/ET_{\text{pot}}$ linear auf 0, wenn der Boden zum permanenten Welkepunkt (PWP) austrocknet. So wird der Bodenwasserindex (WI) definiert durch

$$WI = ET_{\text{act}} / ET_{\text{pot}}$$

Konkreter wird der Bodenwasserindex (WI) mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz berechnet (vgl. Mohrlök 2009):

$$BWF = sw_{\text{max}}$$

$$BWG = sw_{\text{thr}} * BWF$$

Der Parameter sw_{max} ist die Feldkapazität des Bodens (BWF , mm). Beispielwerte sind für Sandboden (sS) 60 mm und bei Torf 300 mm. Der Parameter sw_{thr} ist der Schwellwert, ab dem das Defizit an Bodenwasser die Trockenmasseproduktion beeinflusst, mit ihm wird der Bodenwassergrenzwert (BWG) berechnet. Die potenzielle Evapotranspiration reduziert sich linear in Abhängigkeit von der Blattflächenindex (LAI), sobald der LAI Werte unter einen empirischen Schwellenwert fällt.

$$ET_{pot} = \min(ET_0, ET_0 * (9+7*LAI)/30)$$

Bei der Abschätzung der aktuellen Evapotranspiration ET_{act} wird der aktuelle Bodenwasserspeichers (BW, mm) berücksichtigt, d.h. das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum

$$ET_{act} = ET_{pot} * BW/BWG$$

Das verfügbare Bodenwasser (BW, mm) wird mit der Klimatischen Wasserbilanz berechnet, mit Niederschlag (N) als Eingang und ET_{act} als Ausgang. Steigt die Bodenwassermenge (BW) über die Feldkapazität (BWF), wird die Differenzmenge als Sickerwasser angesehen. Der Bodenwasserspeicher ist definiert durch $0 \leq BW \leq BWF$.

$$BW = BW + N - ET_{act}$$

Die Formel nach Haude liefert in der humiden Klimazone Mitteleuropas eine gute Abschätzung der potenziellen Evapotranspiration und wird auch vom Deutschen Wetterdienst verwendet. In der Formel werden empirische Monatskoeffizienten (X_M , mm/mm Hg) für unterschiedliche Pflanzenarten und deren Vegetationsperioden berücksichtigt, außerdem gehen die Messwerte (um 14 Uhr) von Lufttemperatur (T_{14} , °C), relative Luftfeuchte (RF_{14} , %) und dem temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck p_s (mm Hg) ein.

$$ET_0 = X_M p_s T_{14} (1 - RF_{14}/100)$$

1.3 Qualitätsmodell

Die tägliche Veränderungsrate einzelner Qualitätseigenschaften in einer Zuwachsperiode wird in Abhängigkeit von der Tageslänge, Temperatur, Strahlung und dem Bodenwassergehalt berechnet (Petersen-Fredrich, 1987; Kornher, 1991; Kornher et al., 1991).

Die tägliche **Umwelt-Veränderungsrate** (PE_{CHR} , environmental change rate) ist das Produkt der variablen Raten für Temperatur (T_{CHR}), Strahlung (R_{CHR}), Tageslänge (P_{CHR}) und pflanzenverfügbaren Bodenwasser (MI_{CHR}). Die PE_{CHR} wird im Laufe eines Zuwachses zu einem Wert SPE_{CHR} addiert, der als Maß für die biologische Zeit der erntebaren Biomasse interpretiert werden kann:

$$PE_{CHR} = P_{CHR} * T_{CHR} * R_{CHR} * MI_{CHR}$$

$$SPE_{CHR} = SPE_{CHR} + PE_{CHR}$$

Bisherige Berechnungen haben gezeigt, dass eine „switch-on“-Funktion (für im Zuwachsverlauf zunehmende Größen wie Strukturkohlenhydraten und Lignin) oder „switch-off“-Funktion (für abnehmende Größen wie Rohprotein, Verdaulichkeit und Nettoenergie) jeweils am besten geeignet ist, um die Veränderung der betrachteten Qualitätseigenschaften zu beschreiben. Es wird eine S-Response-Funktion benutzt, die durch das obere und untere Niveau der betrachteten Qualitätseigenschaft beschränkt wird (Q_{min} , Q_{max}).

$$\lambda = (SPE_{CHR} / schr_{50})^{chrk}$$

$$Q = Q_{min} + \lambda / (1 + \lambda) (Q_{max} - Q_{min}) \quad (\text{für zunehmende Qualitätseigenschaften})$$

$$Q = Q_{min} + 1 / (1 + \lambda) (Q_{max} - Q_{min}) \quad (\text{für abnehmende Qualitätseigenschaften})$$

$schr_{50}$ ist der Wert von SPE_{CHR} der die Qualitätseigenschaft um die Hälfte zwischen dem maximalen und minimalen Wert reduziert. Der Parameter $chrk$ bestimmt die Krümmung der Kurve. Das mathematische Prinzip der Auswirkungen der klimatischen Faktoren wird von Fagerberg und Nyman (1994) detailliert beschrieben.

Der Einfluss von Umweltfaktoren auf die täglichen Veränderungsrate einzelner Qualitätseigenschaften wird durch verschiedene Funktionen quantitativ beschrieben. Als allgemeine Form der Beziehung zwischen Umweltfaktor und Veränderungsrate wurden exponentielle Funktionen gewählt und so die tägliche Veränderungsrate einzelner Qualitätseigenschaften in Abhängigkeit von der Tageslänge, der Temperatur und der Strahlung berechnet:

Die **Temperatur-Veränderungsrate** (T_{CHR} , temperature change rate) beschreibt den Einfluss der Tagesmitteltemperatur (T , °C) auf die tägliche Veränderung einer Qualitätseigenschaft. Bei erhöhter Temperatur werden die Änderungsrate und der Einfluss auf die Änderungsrate erhöht

$$T_{CHR} = 1 - \exp(-tk * (T - t_{thr}))$$

Die Temperaturkonstante (tk) und die Temperaturschwelle (t_{thr}) sind qualitätsspezifische Größen.

Bei der **Strahlungs-Veränderungsrate** (R_{CHR} , radiation change rate) wird davon ausgegangen, dass die täglich Summe der eingehenden kurzwellige Strahlung (rad, MJ/m²/Tag) die Änderungsrate von der Qualitätseigenschaft verzögert:

$$R_{\text{CHR}} = \exp(-rk * (\text{rad} - r_{\text{thr}}))$$

mit einer Strahlungskonstante (rk) und einer Strahlungsschwelle ($r_{\text{thr}} = 3 \text{ MJ/m}^2/\text{Tag}$)

Die **Tageslängen-Veränderungsrate** (P_{CHR} , photo periode change rate) beschreibt den Einfluss der Tageslänge (daylength in Stunden) mit einem bestimmten Tageslängenschwellenwert ($p_{\text{thr}} = 10$ Stunden) auf die Veränderung einzelner Futterqualitätsparameter und der Konstanten ($pk = 0.1$)

$$P_{\text{CHR}} = 1 - \exp(-pk * (\text{daylength} - p_{\text{thr}}))$$

Eine **Bodenfeuchteindex-Änderungsrate** (MI_{CHR} , moisture index change rate) beschreibt den Einfluss von Wasserstress auf die Qualitätsveränderung. Dabei geht der Wasserindex (WI), aus dem Ertragsmodell, und der WI-Wert ab dem Wasserstress einen Einfluss auf die Qualitätseigenschaft hat ($mfk = 0.05$) ein:

$$MI_{\text{CHR}} = \text{falls } (WI < mfk) \text{ dann } (WI/mfk) \text{ sonst } 1$$

1.4 Modellkalibrierung

Eine Voraussetzung für eine realistische Simulation ist die Kenntnis spezifischer Eingabeparameter der Funktionen des Modells. Diese können aus experimentellen Untersuchungen oder empirischen Informationen abgeleitet werden. Die bisher durchgeführten Optimierungs- und Validierungsarbeiten (vgl. Kornher und Torssell, 1983 ab, Torssell und Kornher, 1983; Petersen-Fredrich, 1987, Taube et al., 1989, Kornher, 1991) haben gezeigt, dass die Bestandes bezogenen Parameter (W_0 , rs , ak) gute Kenngrößen des Produktionspotentials eines Grünlandbestandes darstellen. Die optimale relative Wachstumsrate zu Beginn eines jeden Aufwuchses (rs) charakterisiert vor allem das genetisch bedingte Zuwachspotential, während der Trockenmasse-Startwert (W_0) eine Abhängigkeit vom Zustand des Bestandes bezüglich Restblattfläche, phänologische Entwicklung, Triebzahl und ähnliches zeigt. Diese Eigenschaften werden vor allem durch die Nutzung beeinflusst. Der Formparameter (ak) der Altersfunktion (AGE) bildet den Einfluss der Veränderung der Bestandmorphologie und der damit verbundenen Architektur der Blattfläche ab. Für die Berechnungen der Wasserverfügbarkeit ist außerdem die ortsspezifische Feldkapazität von großer Bedeutung.

Die Höhe und die Veränderungen im Qualitätsmodell hängt von der betrachteten Qualitätseigenschaft ab und wird vor allem durch die Parameter $chrk$, $schr_{50}$ und Q_{min} und Q_{max} gesteuert. Wie beschrieben werden Umweltfaktoren (Temperatur, Tageslänge, Strahlung, verfügbares Bodenwasser) in Veränderungsraten umgewandelt, die je nach Qualitätseigenschaft mit positiv oder negative exponentiellen Funktionen beschrieben werden. Für den Rohproteingehalt erfolgt beispielsweise die Veränderung von einem höchsten zu einem niedrigsten Wert. Den optimierten Minimum- und Maximum-Werten liegen Referenzdaten durchgeführten Untersuchungen zu Grunde.

Im verwendeten Ansatz wird unterstellt, dass die Parameter des Ertrags- und Qualitätsmodelles Bestandes- bzw. Aufwuchs-spezifisch sind. Dies bedeutet, dass für unterschiedliche Bestände mit bestimmter botanischer Zusammensetzung sowie für unterschiedliche Aufwüchse die Werte der Parameter unterschiedlich sein können.

Durchführung einer Optimierung

Eine gute Optimierung der Modell-Parameter setzt voraus, dass mehrere Zuwachserhebungen gemeinsam verrechnet werden (z. B. die Ergebnisse aus verschiedenen Jahren und von verschiedenen Standorten mit den gleichen Bestandestypen). Zum Zeitpunkt der Optimierung standen für die Versuche in Grub, Karolinenfeld und Willing Zuwachs- und Qualitätsdaten für zwei Jahre vor. Jedoch gab es nur für den Versuch in Willing in beiden Jahren dieselbe Schnittnutzung (2014/2015: 4/4-Schnitt. In Grub (2014/2015: 5/4-Schnitt) und Karolinenfeld (2014/2015: 5/6-Schnitt) unterschied sich die Nutzung zwischen den Jahren um jeweils einen Schnitt. Dennoch wurden bei diesen 3 Standorten die beiden Jahre zusammen angepasst.

Bei einer Optimierung werden die Parameter iterativ verändert, so dass der Unterschied zwischen den Versuchsmesswerten und den berechneten Zuwachswerten möglichst klein ist. In der Programmiersprache R steht mit „nls“ (*nonlinear least squares*) eine automatische Methode zur Verfügung, die entwickelt wurde, um Parameterwerte zu finden, die die Summe der quadratischen Fehler zwischen gemessenen Werten und simulierten Werten eines nichtlinearen Modells minimieren. Zudem bietet „nls“ mit dem „port“-Algorithmus die Möglichkeit untere und obere Schranken für jeden Parameter zu definieren, also die Wertebereich eines Parameters sinnvoll einzuschränken.

In den Tabellen 1-5 sind die verwendeten, bzw. optimierten, Modell-Parameter für das Ertrags- und Futterqualitäts-Modell dargestellt.

Tabelle 1. Die Eingabeparameter des Ertrags-Modells von FOPROQ mit Angabe der Werte, die sich bei früheren Kalibrationen mit zahlreichen Versuchsdaten als Standard herausgestellt haben.

Par.	Wert	Beschreibung	Par.	Wert	Beschreibung
Bodenwasser-Index					
W_0	10	g/m^2 , vorhandenen TM	sw_{max}		mm, max. Bodenwassermenge (Feldkapazität)
rs		$g/g/Tag$, rel. Wachstumsrate	sw_{thr}	0.8	Bodenwasserschwelle (% der max. Bodenwassermenge)
b_{lai}	4.8	Konstante in der LAI Funktion			
c_{lai}	0.008	Konstante in der LAI Funktion			
Alters-Index			Strahlungs-Index		
LAI_{50}	3	halber max Blattflächenindex	$cank$	3	Konstante
ak		Krümmung AGE-Kurve	LAI_{low}	1	BFI-niedrig
Temperatur-Index			LAI_{high}	2.5	BFI-hoch
T_0	1	$^{\circ}C$, Basistemperatur	rm_{lo}	22	min. Strahlung für Wachstum
T_{opt}	17	$^{\circ}C$, Temp. für max. Zuwachs	rm_{xp}	32	Strahlung für max. Wachstum
T_{max}	42	$^{\circ}C$, Temp. für Zuwachsstopp	rk	2	Krümmung der Strahlungskurve
tk	2	Krümmung Temperaturkurve			

Tabelle 2. Parametrisierung des Ertrags-Modells von FOPROQ je Versuchsstandort und Aufwuchs nach der Optimierung. (Ellmosen (El), Bruckmühlen (Br), Grub (Gr), Karolinenfeld (Ka), Willing (Wi), Osterseon (Os))

Aufw	El	Br	Gr	Ka	Wi	Os (mt)	Os (fr)	El	Br	Gr	Ka	Wi	Os (mt)	Os (fr)
	rs – opt. rel. Wachstumsrate ($g/g/Tag$)							ak - Krümmung der AGE-Kurve						
1	0.30	0.55	0.65	0.40	0.32	0.48	0.45	4	2	4	5	4	5.8	4
2	0.29	0.26	0.40	0.25	0.26	0.23	0.42	10	6.3	4	8	6.3	6.3	6.3
3	-	0.20	0.15	0.16	0.22	0.21	0.15	-	12.3	4	12	10	12	20
4	-	0.22	0.25	0.20	0.22	0.20	0.25	-	9	10	10	9	12.3	12
5	-	0.16	0.25	0.20	0.16	0.20	0.25	-	20	10	12	20	12.3	12
6	-	0.16	-	0.20	-	-	0.18	-	20	-	8	-	-	12

Tabelle 3. Werte des Parameters sw_{max} (maximale Feldkapazität) in FOPROQ je Versuchsstandort

	Ellmosen	Bruckmühlen	Grub	Karolinenfeld	Willing	Osterseon
sw_{max}	90	80	54	300 (Torf)	95	84

Tabelle 4. Standort-unabhängig Parameter des Qualitäts-Modells von FOPROQ je Aufwuchs.

Par.	Aufw.	XP	nXP	NEL	ME	Beschreibung
t _{thr}	alle	1	1	5	5	°C, Temperatur-Schwellenwert
tk	alle	0.096	0.096	0.095	0.095	Konstante in Temperatur-Veränderungsrate
rk	alle	0.033	0.033	0.028	0.028	Konstante in Strahlungs-Veränderungsrate
func	alle	dec	dec	dec	dec	Qualitätsfunktion-Typ zunehmend/abnehmend
Q _{min}	alle	12.5%	14%	6	10	minimaler Wert der Qualitätseigenschaft
Q _{max}	alle	28%	18%	8	13	maximaler Wert der Qualitätseigenschaft
chrk	1	2.5	2.5	1.77	1.77	Konstante in der Beziehung zwischen Qualitätseigenschaft und PE _{CHR} ("Switch-on und -off")
chrk	2	3.4	3.4	1.68	1.68	
chrk	3	4.2	4.2	2.03	2.03	
chrk	ab 4	3.9	3.9	2.46	2.46	

Tabelle 5. Der Parameter schr₅₀ des Qualitäts-Modells von FOPROQ je Versuchsstandort und Aufwuchs nach der Optimierung. (Ellmosen (El), Bruckmühlen (Br), Grub (Gr), Karolinenfeld (Ka), Willing (Wi), Osterseon (Os))

Aufw.	Os Os						Os Os					
	Br	Gr	Ka	Wi	(mt)	(fr)	Br	Gr	Ka	Wi	(mt)	(fr)
	schr ₅₀ für XP (% i.d.TM)						schr ₅₀ für NEL (MJ/kgTM)					
1	2.5	3	5	5	3	2.8	1	1	2	2	5	5.5
2	4	5	7	7	3	4	5	1	3	3	4.5	5
3	6	9	7	8	4	5.5	5	2	4	4	4.5	7
4	7	7	12	8	5	5	6	4	3.5	5	5	4.5
5	8	6	8	7	4.5	5	6	5	4	6	6.5	6
6	3		4			4	3		4			5
	schr ₅₀ für nXP (% i.d.TM)						schr ₅₀ für ME (MJ/kgTM)					
1	1	3	3	3	4	4	1	1.5	3	2	4.5	4.5
2	2	3	4.5	4	3	4.5	4	2.5	5	4	4	5
3	5	5	5	5.5	4	5	4	3.5	4	4	4.25	7
4	6	5	5	5	4.5	5	4	4	4	3	4.5	4.5
5	7	5.5	5	5.5	5	5	4	6	5	6	6.5	6
6	3		5			4	4		5			5

Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten

Abbildung 1 und Tabelle 6 stellen die gemessenen und simulierten Trockenmasse-Erträge (g/m²) gegenüber. In Abbildung 2 wird die lineare Regression zwischen diesen Werten gezeigt. Im Anhang sind entsprechende Abbildungen für einige Futterqualitäts-Parameter dargestellt.

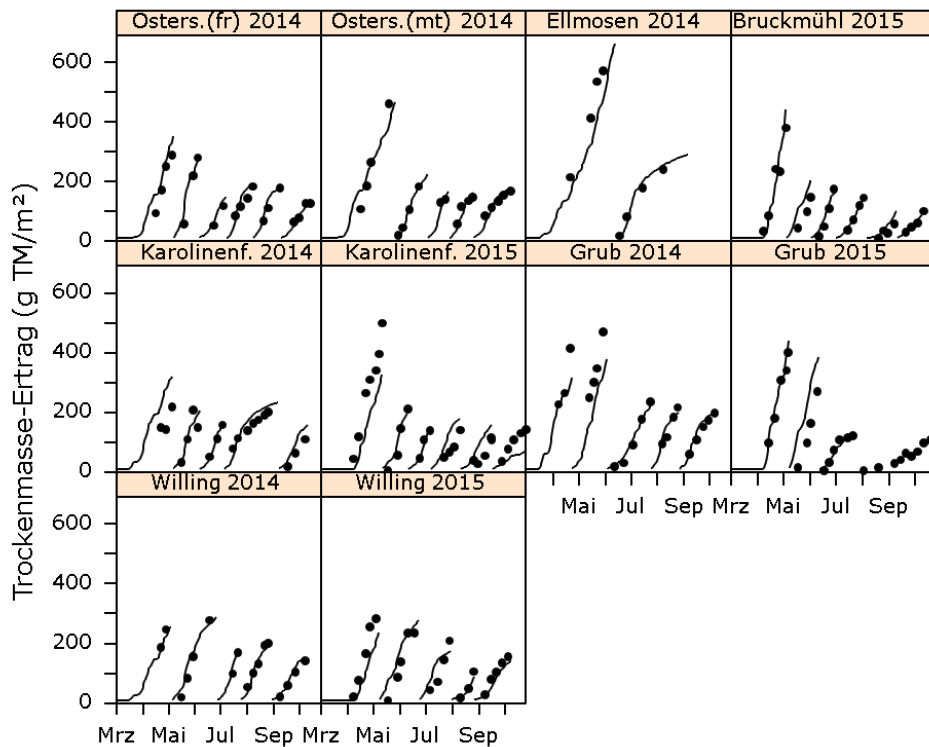


Abbildung 1. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Trockenmasse-Erträge (TM, g/m²) für die Versuchsstandorte und -jahre. (Der 4. Schnitt in Grub in 2015 wurde nicht weiter betrachtet, da dieser nicht sinnvoll zusammen mit den 4. Schnitt 2014 angepasst werden konnte)

Tabelle 6. Gegenüberstellung der mittleren gemessenen (gem) und simulierten (sim) Trockenmasseerträge (g/m²) und des Jahresertrages auf den Versuchsstandorten für 2014 und 2015.

Jahr/Aufw		Ellmosen		Bruckm.		Grub		Karolin.		Willing		Os.(fr)		Ost.(mt)	
		gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim
2014	1	570	663			415	318	219	320	247	255	287	351	462	466
2014	2	240	291			470	379	209	205	278	287	280	279	184	223
2014	3					236	223	158	158	169	176	118	147	140	166
2014	4					217	200	201	235	200	198	183	192	147	163
2014	5					197	199	110	158	141	148	178	183	167	176
2014	6											127	139		
2014	ges	810	954			1535	1319	897	1076	1035	1064	1173	1292	1100	1194
2015	1			380	442	401	441	499	326	282	235				
2015	2			148	203	270	384	212	196	235	278				
2015	3			174	167	122	128	140	139	209	173				
2015	4			145	148			141	179	105	90				
2015	5			59	100			114	157	156	141				
2015	6			60	86			143	75						
2015	ges			966	1146	793	953	1249	1072	987	917				

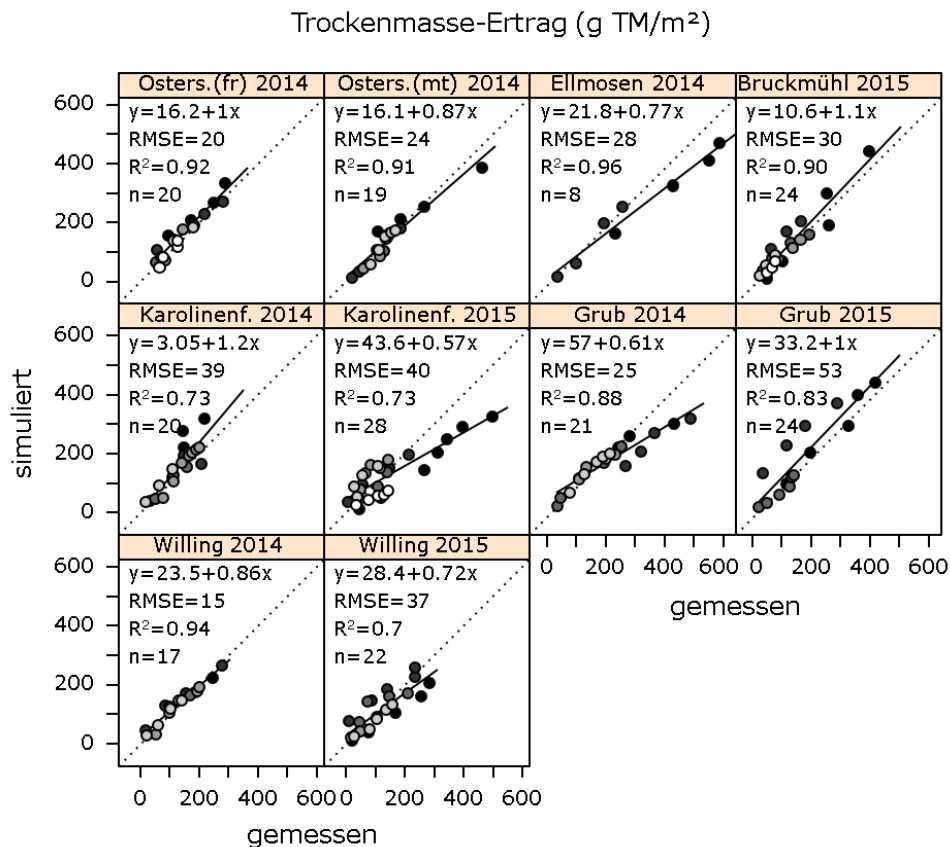


Abbildung 2. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Trockenmasse-Erträge (g TM/m²) für die Versuchsstandorte mit Bestimmtheitsmaß (R²), Root-Mean-Square Error (RMSE) und Anzahl der Messwerte (n)

Berechnung der Modellgüte

Zur Beurteilung wie gut das Modell zu den Messdaten passt können quantitative Messungen der Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werte betrachtet werden. Der mittlere quadratische Fehler (*MSE*, *Mean Square Error*) ist definiert als

$$MSE = \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2$$

wobei obs_i der i -te gemessene Wert, sim_i der entsprechende simulierte Wert und n die Anzahl der Messungen ist. Der *Root Mean Square Error* (*RMSE*) und der relative *RMSE* sind entsprechend definiert durch

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

$$rel.RMSE = RMSE / \overline{obs}$$

wobei \overline{obs} der Mittelwert der gemessenen Werte ist; er drückt also den Fehler als Bruchteil des durchschnittlichen Messwertes aus. Mit der Modelleffizienz (*EF*) kann ein Modell mit einem *Trivialmodell* (Durchschnitt aller Messwerte) verglichen werden.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2}$$

Wenn das Modell perfekt ist, dann ist $obs_i = sim_i$ für jedes i und $EF = 1$. Wird immer der Durchschnitt der beobachteten Werte als Vorhersage verwendet, also $sim_i = \overline{obs}$ für alle i , dann ist $EF = 0$. Ein

Modell mit EF = 0 ist also nicht besser als der Durchschnitt der Messdaten, d.h. die Variabilität der Daten wird durch das Modell nicht erklärt. Ein Modell, das noch schlechter als der Durchschnitt der Messdaten ist hat einen EF-Wert kleiner als 0.

Die Güte der Anpassung kann zudem mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2 , *coefficient of determination*), der Steigung und dem Achsenabschnitt der linearen Regression von den simulierten gegen die beobachteten Werte bewertet werden. In Tabelle 7 und Abbildung 2 werden diese Modellgüten für die Orte und Jahre getrennt angegeben.

Tabelle 7. Die Simulationsgüte und die Anzahl der Messwerte (n) je Ort und Jahr für die Messgrößen Trockenmasse (TM, g/m²), Rohprotein (%XP i.d. TM), nutzbares Rohprotein am Duodenum (%nXP i.d. TM), Netto-Energie-Laktation (MJ NEL/kg TM) und metabolische Energie (MJ ME/kg TM)

Versuchsort	Jahr	n	R ²	MSE	RMSE	rel. RMSE	EF	n	R ²	MSE	RMSE	rel. RMSE	n
TM (g/m²)													
Bruckmühl	2015	23	0.90	1216	34.9	0.31	0.87						
Grub	2014	21	0.88	3071	55.4	0.31	0.46						
	2015	15	0.83	4340	65.9	0.34	0.75						
Karolinenfeld	2014	20	0.73	2268	47.6	0.31	0.62						
	2015	28	0.73	4416	66.5	0.54	0.29						
Osterseeon fr mt	2014	20	0.92	710	26.6	0.17	0.87						
	2014	19	0.91	732	27.1	0.19	0.90						
Willing	2014	17	0.94	361	19.0	0.14	0.91						
	2015	22	0.70	1918	43.8	0.38	0.59						
XP (%i.d.TM)								NEL (MJ/kgTM)					
Bruckmühl	2015	18	0.72	6.76	2.6	0.12	0.50	18	0.39	0.10	0.32	0.05	0.22
Grub	2014	18	0.75	2.97	1.72	0.08	0.77	18	0.05	0.39	0.62	0.10	-1.05
	2015	13	0.11	22.45	4.74	0.21	-0.33	13	0.00	1.02	1.01	0.16	-2.17
Karolinenfeld	2014	17	0.55	3.76	1.94	0.08	0.55	17	0.45	0.22	0.47	0.07	0.06
	2015	21	0.52	4.27	2.07	0.08	0.19	21	0.71	0.10	0.32	0.05	0.59
Osterseeon fr mt	2014	19	0.87	3.68	1.92	0.09	0.79	19	0.73	0.04	0.21	0.03	0.74
	2014	16	0.90	2.02	1.42	0.07	0.89	16	0.58	0.06	0.25	0.03	0.48
Willing	2014	15	0.85	1.30	1.14	0.05	0.84	15	0.07	0.21	0.46	0.07	-0.19
	2015	16	0.66	6.44	2.54	0.10	0.26	16	0.51	0.12	0.35	0.05	0.50
nXP (%i.d.TM)								ME (MJ/kgTM)					
Bruckmühl	2015	18	0.61	0.59	0.77	0.05	0.60	18	0.54	0.18	0.43	0.04	0.54
Grub	2014	18	0.51	0.66	0.81	0.05	0.53	18	0.19	0.44	0.66	0.06	-0.04
	2015	13	0.12	3.24	1.80	0.11	-0.72	13	0.00	1.56	1.25	0.11	-1.36
Karolinenfeld	2014	17	0.60	0.81	0.90	0.06	0.54	17	0.68	0.18	0.43	0.04	0.68
	2015	21	0.78	0.30	0.55	0.03	0.77	21	0.67	0.26	0.51	0.04	0.52
Osterseeon fr mt	2014	19	0.93	0.07	0.27	0.02	0.92	19	0.76	0.09	0.29	0.02	0.74
	2014	16	0.83	0.23	0.48	0.03	0.79	16	0.64	0.13	0.36	0.03	0.57
Willing	2014	15	0.34	0.72	0.85	0.05	0.37	15	0.37	0.24	0.49	0.04	0.39
	2015	16	0.74	0.38	0.61	0.04	0.69	16	0.53	0.23	0.48	0.04	0.54

1.5 Sensitivitätsanalyse

Viele Simulationsmodelle, wie auch FOPROQ, beinhalten mehrere Quellen von Unsicherheit, die Eingabevariablen, die Werte der Parameter und die Modell-Gleichungen. Tägliche Eingabegrößen sind die Witterungsdaten, wie Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Evapotranspiration, deren Werte von möglichst nahegelegenen Wetterstationen kommen sollten. Viele Modell-Parameter können nicht direkt gemessen werden, sondern erfordern Expertenwissen und eine umfangreiche Basis an Felddaten und hängen damit auch von der Qualität dieser Datensätze ab. Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es die Empfindlichkeit der Ausgabe auf einzelne Parameter zu bestimmen. Dabei nehmen die betrachteten Parameter bei der Analyse Werte in ihrer gesamten Variationsbreite an. Eine Sensitivitätsanalyse kann verschiedene Ziele haben, wie zum Beispiel

- Parameter zu bestimmen, die einen kleinen/großen Einfluss auf die Ausgabe haben
- zu identifizieren, welche Inputfaktoren genauer geschätzt/gemessen werden sollten
- Wechselwirkung zwischen den Eingabe-Parametern zu erkennen und zu quantifizieren
- aufzuzeigen welche Beziehungen zwischen Modelleingabe und -ausgabe bestehen
- mögliche Vereinfachung des Modells herauszufinden

Im Folgenden wird FOPROQ mit drei aktuelle Methoden der Sensitivitätsanalyse (vgl. Wallach 2013, Franc 2012) mit der Statistiksoftware R genauer untersucht.

Varianzanalyse mit einem vollständig faktoriellem Modell

Als Sensitivitätstest wurde zunächst eine Varianzanalyse (ANOVA) mit einem vollständig faktoriellem Design durchgeführt. Die Parameter rs , w_0 , ak , tk und rk des ersten Aufwuchses konnten dafür jeweils drei mögliche Werte annehmen, ihren Wert aus der Anpassung und die oberen und unteren Grenzwerte, wie in Tabelle 8. Anhand dieser Auswertung kann die Varianz in den Beitrag der einzelnen Faktoren und alle ihrer Interaktionen zerlegt werden.

Tabelle 8. Die anhand von Voruntersuchungen angenommenen oberen und unteren Grenzwerte für die relative Wachstumsrate (rs), die Trockenmasse zum Wachstumsstart (w_0), und die Krümmungsparameter der Alters, Temperatur und Strahlungs-Funktionen (ak , tk und rk)

	rs	ak	w_0	tk	rk
unterer Grenzwert	0.1	1	1	1	1
oberer Grenzwert	0.7	20	20	3	3

Die Tabelle 9 zeigt, dass die Parameter rs und ak des ersten Aufwuchses im Allgemeinen die größte Wirkung auf die endgültige Trockenmasse haben. rs erklärt in diesen Fällen bis zu 90% der Varianz (Bruckmühlen), ak bis zu 60% (Grub). Die Wechselwirkungen der Parameter tragen wenig zur Varianz bei. Den größten Beitrag leistete unter den Wechselwirkungen die Interaktion zwischen rs und ak .

Tabelle 9. Ausgabe der ANOVA eines vollständig faktoriellen Modells mit den Parametern rs , w_0 , ak , rk , tk des ersten Aufwuchses. Dargestellt sind die Wechselwirkungen, deren Anteil an der Gesamt-Quadratsumme (Spalte „Idx“) größer als 0.1% ist und damit mehr als 0.1% der Varianz erklären.

df	SumSq	MeanSq	Idx	df	SumSq	MeanSq	Idx	df	SumSq	MeanSq	Idx			
Bruckmühl				Ellmosen				Grub						
rs	2	930470	465235	83.4	rs	2	1490934	745467	49.7	rs	2	1007139	503569	57.0
rk	2	119232	59616	10.7	ak	2	1322698	661349	44.1	ak	2	356403	178201	20.2
tk	2	26135	13067	2.3	rk	2	78555.1	39278	2.6	rk	2	300398	150199	17.0
ak	2	20341	10170	1.8	rs:ak	4	75698.5	18925	2.5	tk	2	74537	37268	4.2
w0	2	13809	6904	1.2	tk	2	21171.6	10586	0.7	rs:ak	4	19131	4783	1.1
rs:ak	4	3596	899	0.3	w0	2	4001.04	2001	0.1	w0	2	7004	3502	0.4
rs:rk	4	1577	394	0.1	ak:rk	4	3224.35	806	0.1					
Karolinenfeld				Willing										
rs	2	519666	259833	56.3	rs	2	360270	180135	68.1					
ak	2	213591	106796	23.1	rk	2	111741	55871	21.1					
rk	2	139158	69579	15.1	tk	2	31026	15513	5.9					
tk	2	30541	15270	3.3	ak	2	14478	7239	2.7					
rs:ak	4	10017	2504	1.1	w0	2	8676	4338	1.6					
w0	2	9574	4787	1.0	rs:ak	4	2198	550	0.4					
Osterseeon (fr)				Osterssen (mt)										
rs	2	204072	102036	61.8	ak	2	540964	270482	62.2					
rk	2	57082	28541	17.3	rs	2	264645	132323	30.4					
ak	2	53254	26627	16.1	rk	2	38595	19298	4.4					
tk	2	10750	5375	3.3	rs:ak	4	15269	3817	1.8					
rs:ak	4	3116	779	0.9	tk	2	8126	4063	0.9					
w0	2	1605	802	0.5										

Monte Carlo Methode zur Bestimmung der Simulations-Unsicherheit

Beispielhaft wird im Folgenden gezeigt, was eine Veränderung der Parameter rs und ak des ersten Aufwuchses um +/-10% vom optimierten Wert für eine Auswirkung auf den simulierten Gesamtertrag haben kann. Diese Auswertung wurde mit der Monte Carlo Methode durchgeführt. Es wurden jeweils 1000 Parameter je Versuchsort in diesem vorgegebenen Wertebereich zufällig erzeugt und jeweils eine Simulation ausgeführt. Tabelle 10 und Abbildung 3 stellen die Ergebnisse dieser Unsicherheitsanalyse dar.

Tabelle 10. Unsicherheitsanalyse der FOPROQ-Parameter rs und ak des ersten Aufwuchs am Gesamtertrag. Berechnet mit einer Monte-Carlo Simulation (n = 1000) bei der die geschätzten Parameter im Wertebereich +/- 10% um ihren optimierten Wert schwanken.

	Ellm.	Osterseeon		Bruck.	Grub		Karolinenfeld		Willing	
	2014	(fr) 2014	(mt) 2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
5% Quantil	850	1258	1138	1081	1288	902	1046	1041	1043	896
Mittelwert	958	1293	1199	1147	1317	956	1075	1072	1064	918
Simulationswert	953	1292	1194	1146	1318	953	1076	1072	1064	917
95% Quantil	1097	1332	1273	1218	1350	1018	1108	1108	1087	939

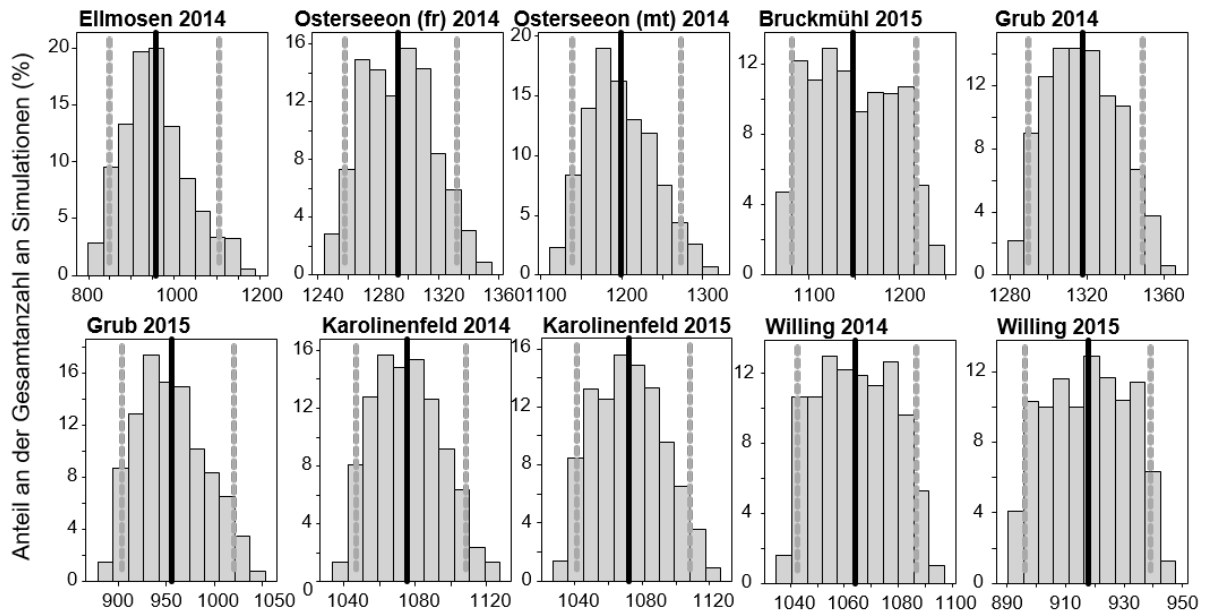


Abbildung 3. Unsicherheitsanalyse der FOPROQ-Parameter r_s und a_k des ersten Aufwuchs am Gesamtertrag. Berechnet mit einer Monte-Carlo Simulation ($n = 1000$) bei der die geschätzten Parameter im Wertebereich $\pm 10\%$ um ihre optimierten Werte schwanken. Eingezeichnet sind der Mittelwert der Simulationen (dicke schwarze Linie) und das 5%- und 95%-Quantil (grau-gestrichelte Linien).

Sensitivitätsanalyse mit der Fast-Methode

Zusätzlich wurde die Sensitivität von Modell-Parametern mit der erweiterte FAST-Methode (Saltelli et al., 1999) untersucht. Die Berechnungen wurden mit der *fast99* Funktion aus dem R-Paket *sensitivity* (Pujol et al 2015) durchgeführt. Dabei wurden die oberen und unteren Grenzen der Parameter mit jeweils $\pm 10\%$ von der optimierten Anpassung entfernt gewählt und die erweiterte FAST-Methode mit 1000 Simulationen pro Faktor durchgeführt. Es wurde für die Parameter eine Gleichverteilung unterstellt (im Bereich ihrer unteren und oberen Grenzwerte). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Auch diese Analyse bestätigt, dass die einflussreichsten Parameter r_s und a_k sind. Der Parameter w_0 hat eine untergeordnete Rolle.

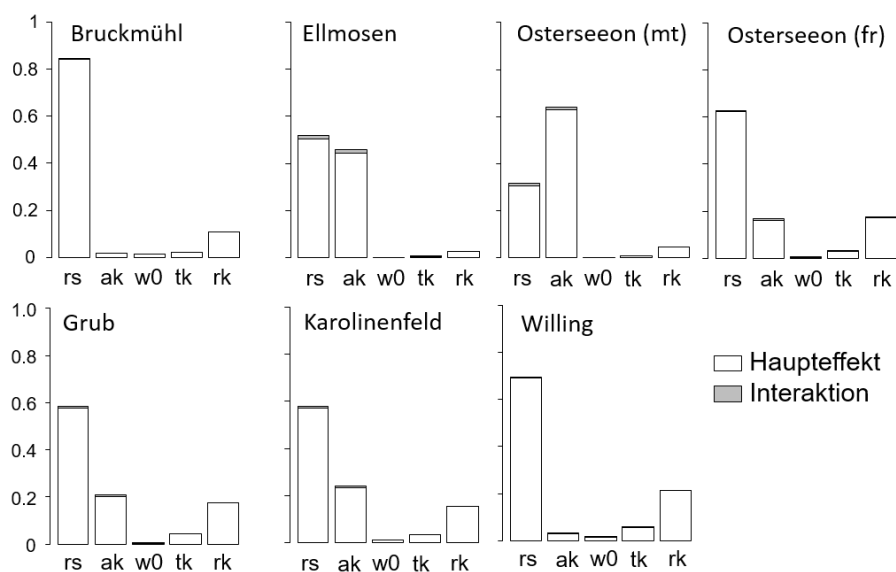


Abbildung 4. Empfindlichkeits-Indizes nach der FAST-Methode ($n = 1000$) für die Parameter r_s , a_k , w_0 , t_k , r_k des ersten Aufwuchses je Versuchsstandort.

Zusätzlich zu dieser Analyse wurde eine aufwändigere FAST-Analyse mit den Parameter rs , ak , w_0 , tk und rk für den 1.-5. Aufwuchs berechnet. Auch in dieser Analyse zeigte sich, dass der simulierte Jahresertrag vor allem sensitiv auf die Parameter rs und ak des 1. und 2. Aufwuchses reagiert (Abbildung 5).

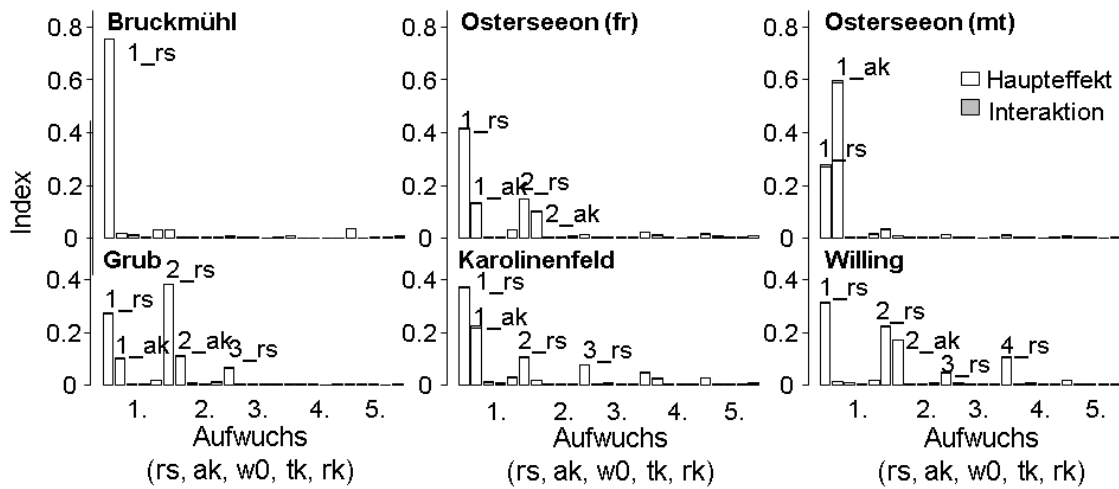


Abbildung 5. Empfindlichkeits-Indizes nach der FAST-Methode ($n = 1000$) für die Parameter rs , ak , w_0 , tk , rk der Aufwüchse 1-5 je Versuchsstandort.

Sensitivitätsanalyse mit der Morris-Methode

Auch nach dem Test mit der Morris Methode haben vor allem Abweichungen bei den Parametern rs und ak des ersten und zweiten Aufwuchses einen großen Einfluss auf den Gesamtertrag (Abbildung 6). Hohe σ -Werte von rs und ak lassen darauf schließen, dass sie einen nicht-linearen Effekt auf den Gesamtertrag haben und/oder mit anderen Parametern interagieren.

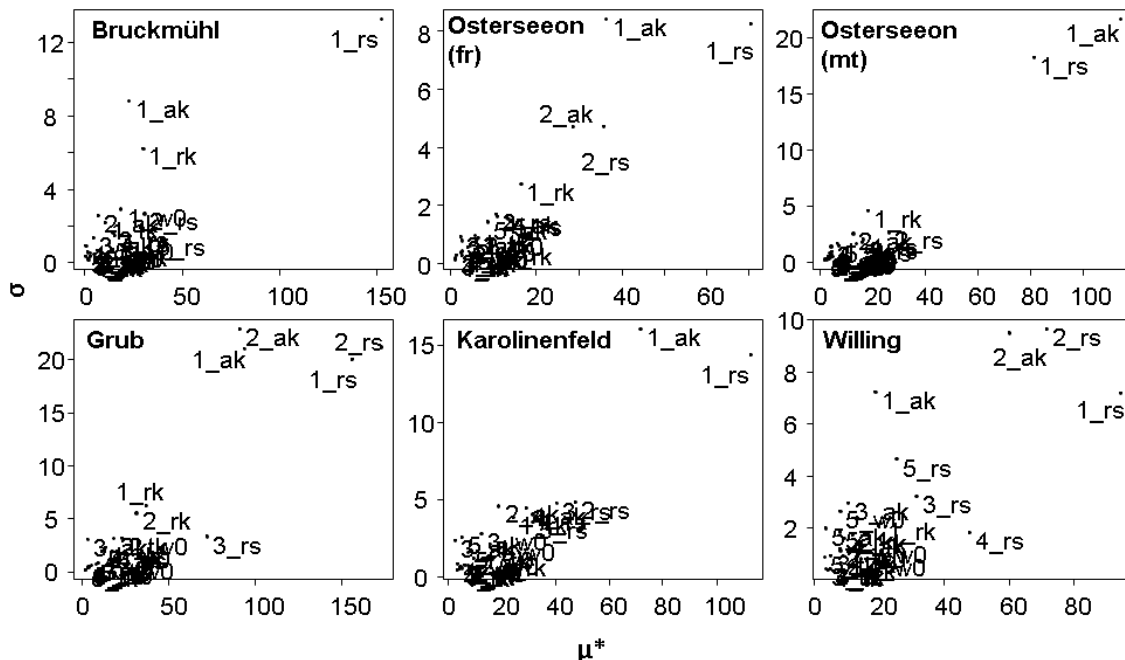


Abbildung 6. Ergebnis der Morris-Methode für die Parameter rs , ak , w_0 , tk , rk der Aufwüchse 1-5 je Versuchsstandort mit 500 Wiederholungen.

Schlussfolgerungen

Die Resultate der Modellanpassungen ergeben für den TM-Ertrag eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten. Die etwas geringere Modellgüte am Standort Karolinenfeld ist auf die standörtlichen Gegebenheiten (Torf) zurückzuführen, die zu Schwierigkeiten im Hinblick auf die modellhafte Abbildung des Wasserhaushaltes führte. Die Simulation der Futterqualitätsparameter zeigt für den Rohproteingehalt und die Energiekonzentration (ME, NEL) im Vergleich zur Ertragsmodellierung weniger zufriedenstellende Ergebnisse. Erfahrungsgemäß hängt die Modellgüte entscheidend davon ab, wie der Startwert des interessierenden Futterqualitätsparameters, wie beispielsweise des Rohproteingehaltes, zu Vegetationsbeginn getroffen wird. Dies wird nicht nur durch Umweltbedingungen und die Bestandeszusammensetzung, sondern in starkem Maße durch die N-Versorgung beeinflusst, welche im Modell nicht als Eingangsgröße Berücksichtigung findet. Für den praktischen Einsatz des Modells (Reifepfung Grünland, Schleswig-Holstein, Niedersachsen) hat sich eine manuelle Anpassung des relevanten Modellparameters auf Basis von Probeschnitten als hilfreich erwiesen. Darüber hinaus kann auch die Jahreswitterung 2015 mit sehr geringen Sommerniederschlägen zu einer etwas weniger zufriedenstellenden Modellgüte beigetragen haben. Für die Zellwandfraktionen (NDF, ADF, Rohfaser), die enzymlösliche organische Substanz und den Gehalt wasserlöslicher Kohlenhydrate konnte keine Anpassung des Modells erfolgen, da die Modellalgorithmen abnehmende oder ansteigende Funktionsverläufe zugrunde legen. Die Messwerte zeigten untypische Verläufe, beispielsweise zunächst ansteigende und dann wieder abnehmende NDF-Gehalte, die u.U. auf Schwierigkeiten bei der Probenahme (abgestorbenes Pflanzenmaterial des vorherigen Aufwuchses) zurückzuführen sind.

Diese Ergebnisse dokumentieren, dass für die Modellierung der Futterqualitätsparameter noch weiterer Anpassungsbedarf besteht. Durch zusätzliche Ertrags- und Qualitätserhebungen an weiteren Standorten und zusätzlichen Jahren, d.h. eine Erweiterung der Kalibrationsdatenbasis, könnte eine weitere Steigerung der Prognosegüte der Qualitätsmodellierung erreicht werden.

Literatur

- Angus JF, Kornher A, Torssell BWR 1980. A systems approach to estimation of Swedish ley production. Swedish Univ. Agric. Sci., Department Plant Husb. Rep. 85.
- Angus JF, Mackenzie OH, Morton R, and Schafer, CA 1981. Phasic development in field crops. II. Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. Field Crops Res., 4, 269-283
- Fagerberg B, Nyman P 1994. Modelling weather effects on nutritional value of grass-clover leys. 1. Estimation and validation of parameters in a model for changes in metabolizable energy content. Swedish J. agric. Res. 24, 147-156.
- Fagerberg B, Nyman P 1995. Modelling weather effects on nutritional value of grass-clover leys. 2. Estimation and validation of parameters in a model for changes in crude protein content. Swedish J. agric. Res. 25, 3-12.
- Faivre R, looss B, Mahévas S, Makowski D, Monod H 2013. Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement. Editions Quae. ISBN www.quae.com/fr/r2142-analyse-de-sensibilite-et-exploration-de-modeles.html
- Fitzpatrick EA, Nix HA 1970. The climatic factor in Australian grassland ecology. In: Australian grasslands (ed. RM Moore). Australian National University Press, Canberra, 3-26.
- Pujol G, looss B, Janon A 2015. sensitivity: Sensitivity Analysis. R package v 1.11.1. <https://CRAN.R-project.org/package=sensitivity>
- Herrmann A, Kelm M, Kornher A, Taube F 2005. Performance of grassland under different cutting regimes as affected by sward composition, nitrogen input, soil conditions and weather - a simulation study using the FOPROQ model. Eur. J. Agron. 22, 141-158. [10.1016/j.eja.2004.02.002](https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.02.002)
- Kornher A, Torssell BWR 1983a: Estimation of parameters in a yield prediction model for temporary grasslands using regional experimental data. Swedish J. agric. Res. 13, 137-144.

- Kornher A, Torssell BWR 1983b. Simulation of weather x management interactions in temporary grasslands in Sweden. Swedish J. agric. Res. 13, 145-155
- Kornher A, 1984. A simulation model for forage production. Bulletin No. 3. FAO-European Cooperative Network on Pastures and Fodder Crop Production.
- Kornher A, Nyman P, Taube F 1991. Ein Computermodell zur Berechnung der Qualität und Qualitätsveränderung von gräserdominierten Grünlandaufwüchsen aus Witterungsdaten. Das wirtschaftseigene Futter 37, 232-248.
- Mohrlok, U 2009. Bilanzmodelle in der Grundwasserhydraulik: Quantitative Beschreibung von Strömung und Transport im Untergrund. Karlsruhe: Univ.-Verl, [10.5445/KSP/1000012015](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-63862-p0101-9)
- Petersen-Fredrich EC 1987. Quantitative Beschreibung des Ertragsverlaufes und der Qualitätsentwicklung von Grünlandbeständen durch dynamische rechnergestützte Modelle. Dissertation, Universität Kiel.
- Saltelli A, Tarantola S, Chan K, 1999, A quantitative, model independent method for global sensitivity analysis of model output, Technometrics, 41, 39–56.
- Taube F, Kornher A, Petersen-Fredrich EC 1989. Ertragsbildung unterschiedlicher Sortentypen des Deutschen Weidelgrases im Vegetationsverlauf in Abhängigkeit vom Nutzungsregime. 1. Mitteilung: Ergebnisse eines Feldversuches. Das Wirtschaftseigene Futter 35(3), 278-288.
- Torssell BWR, Kornher A 1983. Validation of a yield prediction model for temporary grasslands. Swedish J. agric. Res. 13, 125-135.
- Wallach D, Makowski D, Jones JW, Brun F 2014. Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment. Second edition. London: Academic Press, Elsevier. ISBN 9780123970084. www.modelia.org/moodle/course/view.php?id=61

Anhang

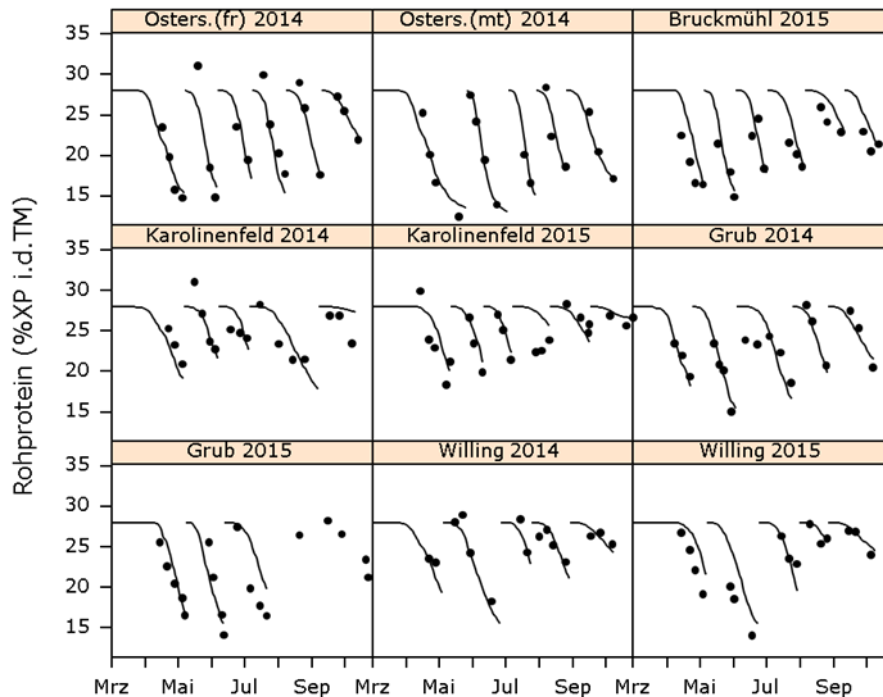


Abbildung A.1. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Rohprotein-Gehalte (%XP i.d. TM) für die Versuchsstandorte und -jahre.

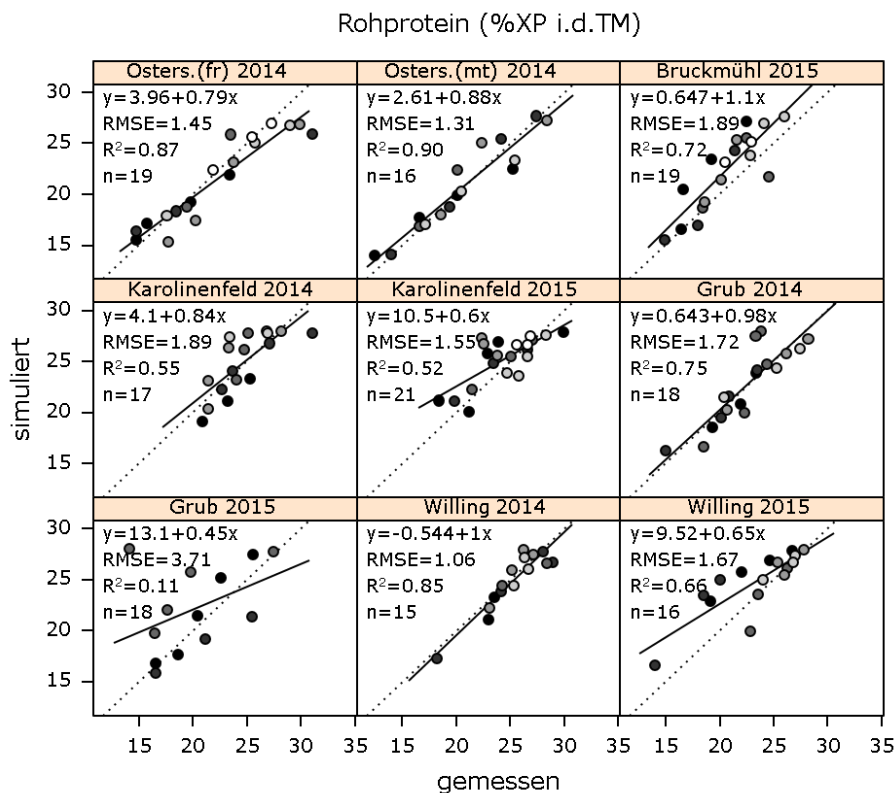


Abbildung A.2. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Rohprotein-Gehalte (%XP i.d. TM) für die Versuchsstandorte mit Bestimmtheitsmaß (R²), Root-Mean-Square Error (RMSE) und Anzahl der Messwerte (n)

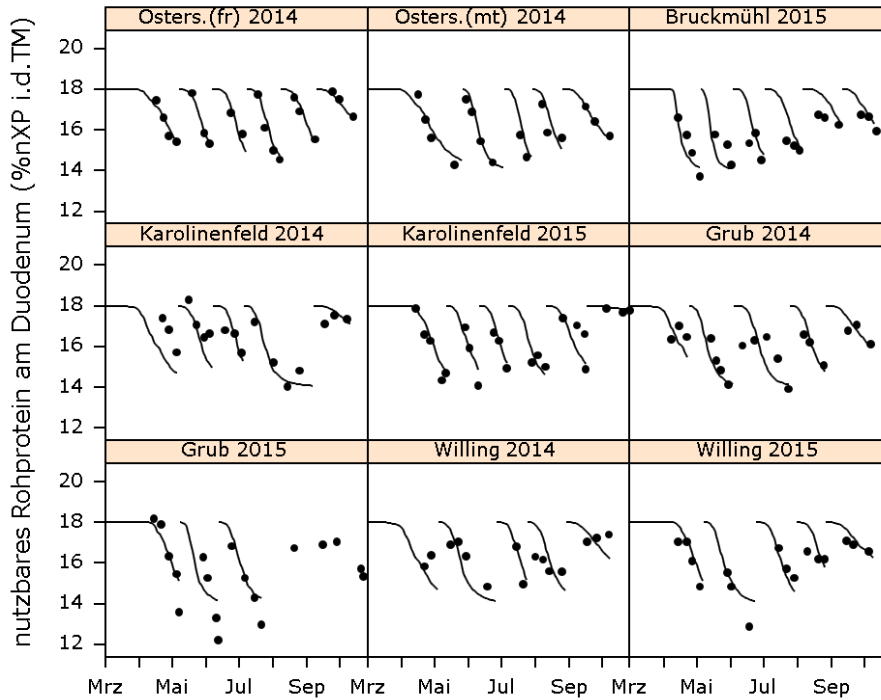


Abbildung A.3. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten nXP-Gehalte (% i.d.TM) für die Versuchsstandorte und -jahre.

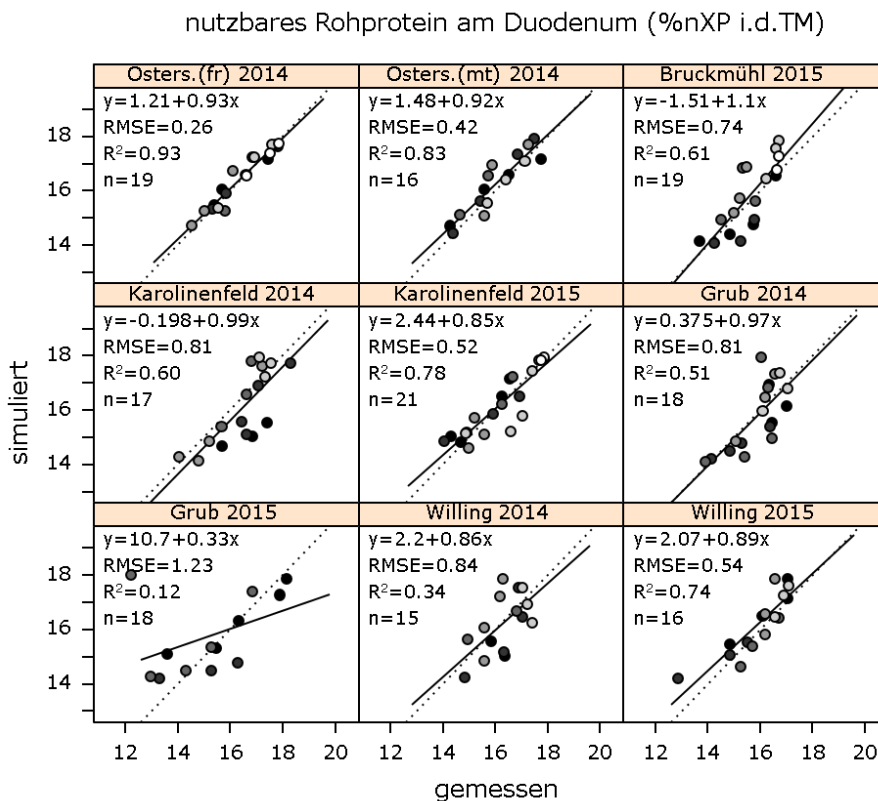


Abbildung A.4. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten nXP-Gehalte (% i.d.TM) für die Versuchsstandorte mit Bestimmtheitsmaß (R²), Root-Mean-Square Error (RMSE) und Anzahl der Messwerte (n)

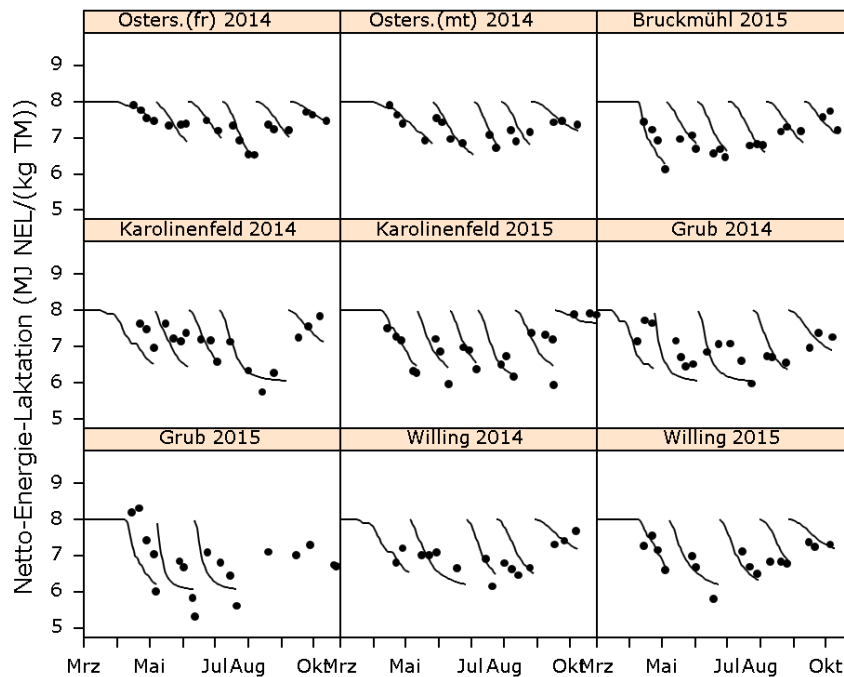


Abbildung A.5. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten NEL (MJ/kgTM) für die Versuchsstandorte und -jahre.

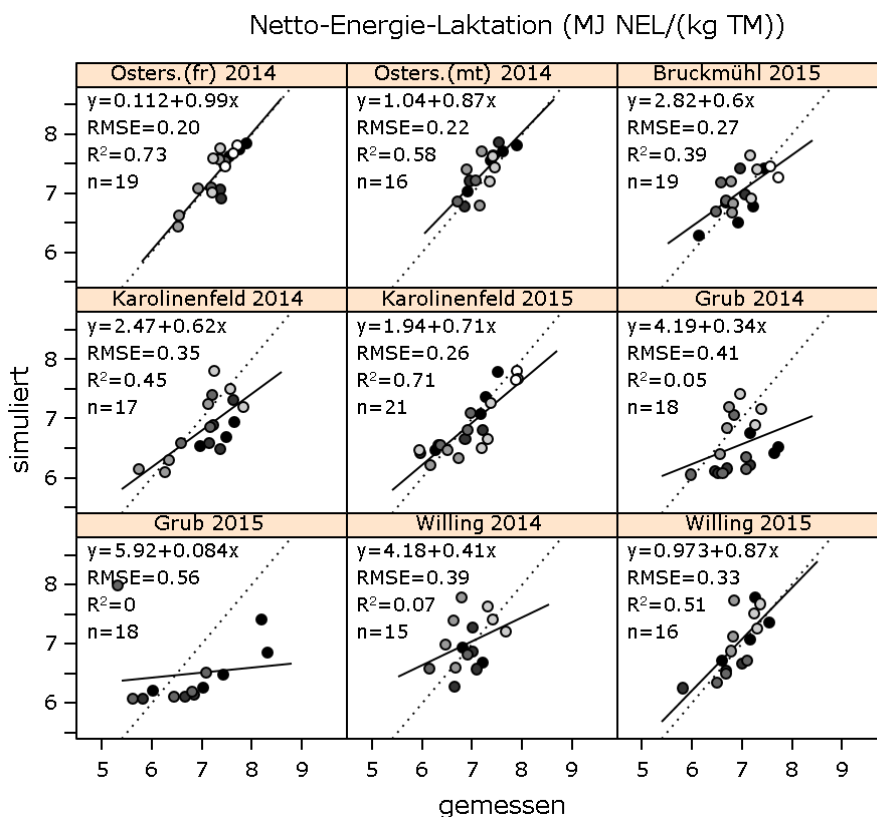


Abbildung A.6. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten NEL (MJ/kgTM) für die Versuchsstandorte mit Bestimmtheitsmaß (R²), Root-Mean-Square Error (RMSE) und Anzahl der Messwerte (n)

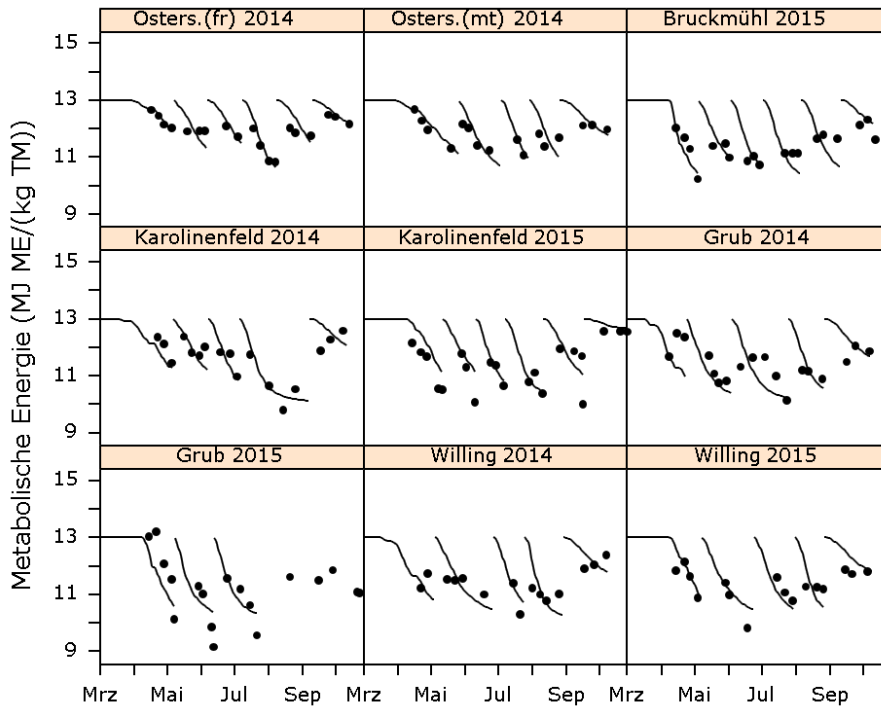


Abbildung A.7. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten ME (MJ/kgTM) für die Versuchsstandorte und -jahre.

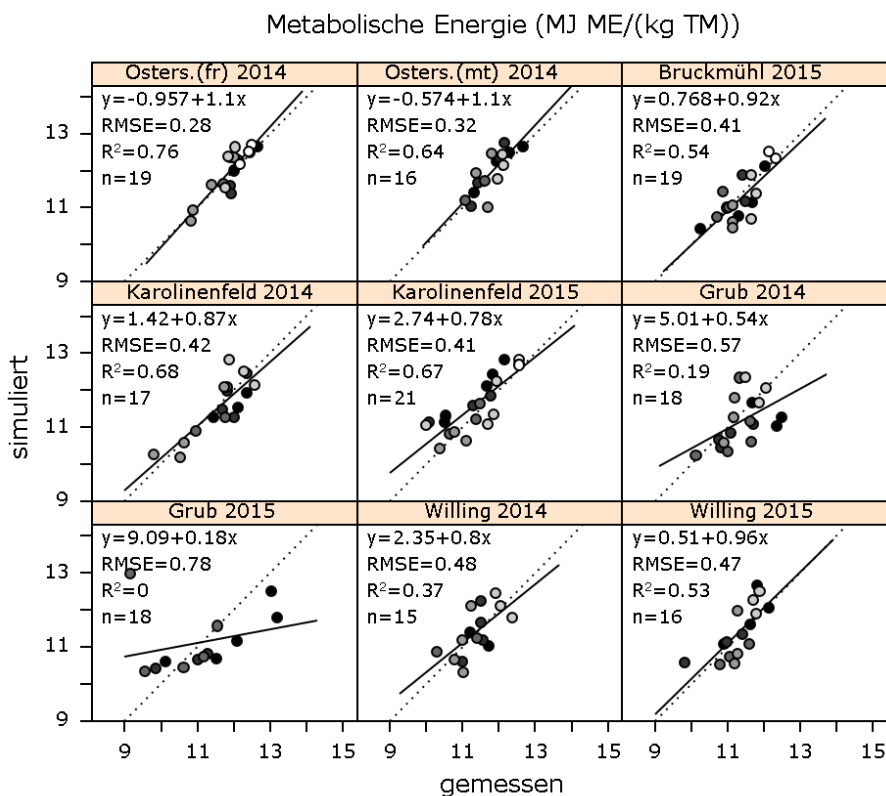


Abbildung A.8. Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten ME (MJ/kgTM) für die Versuchsstandorte mit Bestimmtheitsmaß (R²), Root-Mean-Square Error (RMSE) und Anzahl der Messwerte (n)