



UFOP-SCHRIFTEN | AGRAR

# ABSCHLUSSBERICHT

Modellgestützte Analyse von Klima-, Boden- und Management-  
einflüssen auf die Ertragsbildung von Winterraps

Autoren

Prof. Dr. Henning Kage, Wiebke Weymann

# Modellgestützte Analyse von Klima-, Boden- und Managementeinflüssen auf die Ertragsbildung von Winterraps

## **Abschlussbericht**

Bearbeiterin: Wiebke Weymann

Projektleiter: Prof. Dr. Henning Kage

Projektlaufzeit: 01.01.2012 - 31.01.2015

# Inhalt

1. Ziel des Projektes.....	3
2. Einleitung.....	4
3. Verwendete Datensätze .....	6
4. Ertragswirkungen von Witterungsbedingungen während unterschiedlicher Entwicklungsphasen	8
5. Ertragswirkung der Vorwinterentwicklung .....	18
6. Aufstellung von organspezifischen N-Verdünnungsfunktionen.....	20
7. Modellbeschreibung.....	26
8. Modellanwendungen .....	34
8.1. Phänologische Entwicklung und GAI im Standortvergleich .....	34
8.2. N-Aufnahme vor Vegetationsende.....	35
8.3. Allometrische Beziehungen des Blatt-, Stängel- und Schotenwachstums .....	37
8.4. Rest-N-Menge in den Ernteresiduen .....	38
8.5. Verlängerung der Samenentwicklung .....	39
9. Fazit .....	41
10. Literatur.....	42
11. Publikationen.....	44

## 1. Ziel des Projektes

Ziel des Projektes war die Analyse von Einflussfaktoren auf die Ertragsbildung von Winterraps. Dabei sollten sowohl Umwelt- als auch Produktionsbedingungen berücksichtigt werden.

Folgende Teilaspekte sollten bearbeitet werden:

### a) Analyse ertragsbegrenzender Faktoren

- Strahlungs- und Temperaturverhältnisse, sowie Trockenstress während unterschiedlicher Entwicklungsphasen
- Trockenmassebildung und N-Aufnahme vor Vegetationsende

### b) Erarbeitung eines dynamischen Pflanzenwachstumsmodells inklusive folgender Prozesse

- Trockenmassebildung und -verteilung
- Stickstoff (N)-Aufnahme und -verteilung
- Wurzelwachstum
- Seneszenz- und Translokationsprozesse
- Ertragsbildung
- N-Nachlieferung durch Mineralisierung
- Auswirkungen von Wassermangel und N-Mangel

### c) Pflanzenbauliche Managementoptionen

- Saatzeit
- N-Düngung, v.a. Herbst-N-Düngung
- N-Bedarf für optimale Erträge

### d) Genotypische Parameter

- Trockenmassepartitionierung
- Translokationseffizienz

## 2. Einleitung

Winterrapsenerträge zeigen trotz optimierter Anbausysteme und Züchtungsfortschritt eine hohe Variabilität zwischen Jahren und Standorten. Die Ertragsbildung hängt dabei von komplexen Wechselwirkungen zwischen Standorteigenschaften, wie Boden und Witterung, und den Managementmaßnahmen, z.B. Saattermin und N-Düngung, ab.

Ziel des Projektes war ein besseres Verständnis der Ertragsbildungsprozesse und Ertragslimitierung bei Winterraps. Dafür wurden bereits vorhandene Datensätze verschiedener Feldversuche (Kapitel 3) ausgewertet und zur Parametrisierung und Validierung eines Pflanzenwachstumsmodells genutzt.

In Kapitel 4 werden die Ertragswirkungen von Witterungsbedingungen während unterschiedlicher Entwicklungsphasen analysiert. Dabei werden sowohl die Effekte einzelner Witterungsparameter auf den Samen- bzw. Ölertrag aufgezeigt, als auch die Effekte der Interaktionen zwischen den Einflüssen der Witterungsparameter auf den Winterrapsenertrag diskutiert. Neben Samen- und Ölertrag werden auch weitere Ertragskomponenten berücksichtigt, insbesondere der Einfluss der Witterung auf die Kompensationsfähigkeit zwischen Samenanzahl pro  $m^2$  und Tausend-Korn-Masse (TKM), um Hypothesen zur Quellen- bzw. Senkenlimitierung ableiten zu können.

In Bezug auf die Managementoptionen wird aktuell die Ertragswirkung der häufig applizierten N-Gabe im Herbst diskutiert. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Frage ob ein Mindestwachstum bis Vegetationsende erforderlich ist um das Erreichen des standortspezifisch optimalen Ertrages zu ermöglichen. Dabei wird sowohl die Trockenmassebildung als auch die N-Aufnahme berücksichtigt.

In Kapitel 6 wird die Allometrie zwischen Trockenmassebildung und akkumuliertem Stickstoff anhand von Verdünnungsfunktionen beschrieben. Dabei werden Verdünnungsfunktionen für einzelne

Organe unter N-unlimitierten und N-limitierten Bedingungen verglichen, um die organ-spezifische Reaktion auf N-Mangel zu untersuchen.

Die vorher gewonnenen Ergebnisse werden genutzt, um physiologische Prozesse im Pflanzenwachstumsmodell zu implementieren. In Kapitel 7 wird ein neues Pflanzenwachstumsmodell für Winterraps vorgestellt und evaluiert. Schlussendlich werden in Kapitel 8 mögliche Modellanwendungen aufgezeigt.

### 3. Verwendete Datensätze

Folgende Daten aus Feldversuchen mit Winterraps (Tab. 1) wurden in die Auswertung einbezogen:

**Tab. 1:** Im Projekt verwendete Datensätze

<b>Datensatz 1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Hohenschulen</li><li>· 2004/05 - 2006/07</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0, 80, 200, 240 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Hohenschulen</li><li>· 2009/10 - 2010/11, 2012/13</li><li>· 4 Saatteiten</li><li>· Herbst-N-Düngung (0, 30, 60, 90 kg/ha)</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0, 80, 160, 240, 280 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 3</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Hohenschulen</li><li>· 2003/04 - 2005/06</li><li>· 2 Saatzeiten</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0, 80, 120, 160, 200, 240 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 4</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Hohenschulen</li><li>· 1990/91 - 1998/99</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0 - 240 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 5</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Châlons (Frankreich)</li><li>· 1994/95</li><li>· N-Düngung (0, 135, 270 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 6</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· 14 Standorte in Deutschland (Berge, Borwede, Christgrün, Dornburg, Futterkamp, Groß-Gerau, Gülzow, Hohenschulen, Kümbdchen, Moosburg, Nomborn, Ohrensen, Roda, Thyrow)</li><li>· 2005/06 - 2008/09 (nicht an allen Standorten dreijährig)</li><li>· 2 Saatzeiten</li><li>· Herbst-N-Düngung (0, 40 (80) kg/ha)</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0, 80, 160, 240, 280 kg/ha)</li></ul>
<b>Datensatz 7</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· 4 Standorte in Sachsen (Baruth, Forchheim, Nossen, Pommritz)</li><li>· 2008/09 - 2010/11</li><li>· 2 Saatzeiten</li><li>· Herbst-N-Düngung (0, 50 kg/ha)</li><li>· Frühjahrs-N-Düngung (0, 100, 150, 200, 250 kg/ha)</li></ul>

Das Pflanzenwachstumsmodell wurde mit den Datensätzen 1 und 2 parametrisiert und anhand der Datensätze 3, 4, 5 und 6 validiert. In Tab. 2 ist dargestellt welche physiologischen Pflanzenparameter mit welcher Häufigkeit während der Bestandesentwicklung gemessen wurden.

**Tab. 2:** Häufigkeit und Termine der Messungen der physiologischen Pflanzenparameter in den einzelnen Datensätzen (VA: Vegetationsanfang, VE: Vegetationsende, BB: Blühbeginn, BE: Blühende, TM: Trockenmasse, Nc: N-Konzentration, FI: Flächen-Index, SLA: spez. Blattfläche)

<b>Datensatz</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	ca. alle 14 Tage von VA bis Ernte	2-4 Messungen von Auflauf bis VA	VE,VA und BB, BE	3-11 Messungen von Auflauf bis Ernte	alle 14 Tage	VE, VA
<b>Spross-TM</b>	x	x	x	x	x	x
<b>Blatt-TM</b>	x	x			x	
<b>Stängel-TM</b>	x	x			x	
<b>Schoten-TM</b>	x				x	
<b>Samen-TM</b>					x	
<b>Schotenwand-TM</b>					x	
<b>Wurzel-TM</b>		x			x	
<hr/>						
<b>Spross-Nc</b>	x	x	x	x	x	x
<b>Blatt-Nc</b>	x	x				
<b>Stängel-Nc</b>	x	x				
<b>Schoten-Nc</b>	x				x	
<b>Samen-Nc</b>						
<b>Schotenwand-Nc</b>						
<b>Wurzel-Nc</b>		x			x	
<hr/>						
<b>Grün-FI</b>	x	x			x	(x)
<b>Blatt-FI</b>	x	x			x	
<b>Stängel-FI</b>	x	x				
<b>Schoten-FI</b>	x					
<hr/>						
<b>SLA</b>	x	x			x	
<hr/>						
<b>Samen/m<sup>2</sup></b>	x	x				
<b>TKM</b>	x	x	x			
<b>Proteingehalt</b>		x				
<b>Ölkonzentration</b>		x				x
<b>Ertrag</b>	x	x	x	x	x	x



#### 4. Ertragswirkungen von Witterungsbedingungen während unterschiedlicher Entwicklungsphasen

Witterungsbedingungen während unterschiedlicher Entwicklungsphasen beeinflussen die Ertragsbildung von Winterraps. Zur Untersuchung dieser Effekte wurde die Entwicklung von Rapsbeständen anhand der BBCH-Skala (Lancashire et al. 1991) aufgeteilt: Keimung und Auflaufen (00-10), Blattentwicklung (11-19), Schossen (30-39), Knospenbildung (50-59), Blüte (60-69), Samenentwicklung (71-79) und Samenreifung (80-89). Des Weiteren wurden ausgehend von Literaturrecherche weitere potenziell ertragsbestimmende Phasen definiert: Anlage von Schoten und Samen vom Beginn der Knospenbildung bis zur Vollblüte (BBCH 50-65) und kritische Phase ca. 300°Cd ab Vollblüte (z.B. Berry und Spink 2006, Habekotté 1993, Mendham et al. 1981). Beginn und Ende der einzelnen Entwicklungsphasen wurden mit Hilfe eines dynamischen Simulationsmodells ermittelt.

Folgende Witterungsparameter wurden als mögliche Einflussfaktoren auf den Ertrag getestet:

- Strahlungssumme
- durchschnittliche Tagesmitteltemperatur
- durchschnittliche Tagesminimumtemperatur
- Niederschlagssumme
- klimatische Wasserbilanz
- Trockenstress (Index, berechnet aus der nFKWe)

Die Untersuchungen der Ertragseffekte wurden anhand von Datensätzen von 14 Versuchsstandorten in Deutschland durchgeführt (Abb. 1). In Tab. 3 sind die geografische Lage, Bodeneigenschaften, langjährige Temperatur- und Niederschlagswerte, sowie die Versuchsjahre aufgelistet.



**Abb. 1:** Versuchsstandorte für die Auswertung der Witterungseffekte

**Tab. 3:** Geografische Lage, Bodenart und Versuchszeiträume der Versuchsstandorte

Datensatz	Standort	Geografische Lage	Höhe [m]	Bodenart	langjähriges Mittel (1980-2010)		Versuchszeitraum
					Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	
7	Baruth	51.1°N, 14.4°E	151	lehmiger Sand	9,8	588	2009 – 2011
6	Berge	52.4°N, 12.5°E	35	lehmiger Sand	8,8	503	2009
6	Dornburg	51.0°N, 11.4°E	235	toniger Schluff	8,3	585	2006 – 2009
7	Forchheim	50.4°N, 13.2°E	565	sandiger Lehm	6,5	879	2009 – 2011
6	Futterkamp	54.2°N, 10.4°E	56	sandiger Lehm	8,4	675	2006 – 2009
6	Groß-Gerau	49.6°N, 8.3°E	88	sandiger Lehm	9,2	622	2009
6	Gülzow	53.5°N, 12.3°E	26	lehmiger Sand	7,8	581	2006 – 2009
6	Hohenschulen	54.3°N, 9.6°E	25	sandiger Lehm	8,3	777	2006 – 2009
6	Moosburg	48.3°N, 11.6°E	421	sandiger Lehm	7,8	820	2006 – 2009
7	Nossen	51.3°N, 13.2°E	255	Lehm	8,1	642	2009 – 2011
6	Ohrensen	53.3°N, 9.3°E	19	lehmiger Sand	8,6	726	2009
7	Pommritz	51.9°N, 14.3°E	230	sandiger Lehm	8,6	698	2009 – 2011
6	Roda	51.3°N, 12.3°E	224	toniger Schluff	8,6	711	2006 – 2009
6	Thyrow	52.1°N, 13.1°E	40	schluffiger Sand	8,7	524	2009

Für alle Standorte liegen Daten von Versuchen mit verschiedenen N-Düngungs-Niveaus vor. Alle anderen Managementmaßnahmen wurden nach guter fachlicher Praxis durchgeführt, um eine optimale Ertragsbildung zu ermöglichen.

Um eine Ertragsreduktion durch N-Mangel in der Auswertung zu vermeiden wurden quadratische Ertragsfunktionen für jede Standort-Jahr-Kombination abgeleitet und der maximale Samenertrag und maximale Ölertrag bestimmt.

$$Y_{max} = a + b * N_{max} + c * (N_{max})^2 + \varepsilon$$

$Y_{max}$  : maximaler Ertrag

$N_{max}$  : für den Maximalertrag benötigte N-Düngung

a : Interzept

b : linearer Koeffizient

c : quadratischer Koeffizient

$\varepsilon$  : Fehlerterm

Neben dem Samen- und Ölertrag wurden soweit vorhanden auch die Tausend-Korn-Masse (TKM) und die Samenanzahl pro m<sup>2</sup> zur Ernte in der Auswertung berücksichtigt.

Die Daten wurden statistisch mit multipler linearer Regression ausgewertet. Dabei wurden neben den Einflüssen einzelner Witterungsparameter auch die Interaktionen erster Ordnung zwischen den Witterungsparametern berücksichtigt. Des Weiteren wurde die Sorte als kategorielle Variable im Modell implementiert, um genotypisch unterschiedliche Ertragspotenziale zu berücksichtigen.

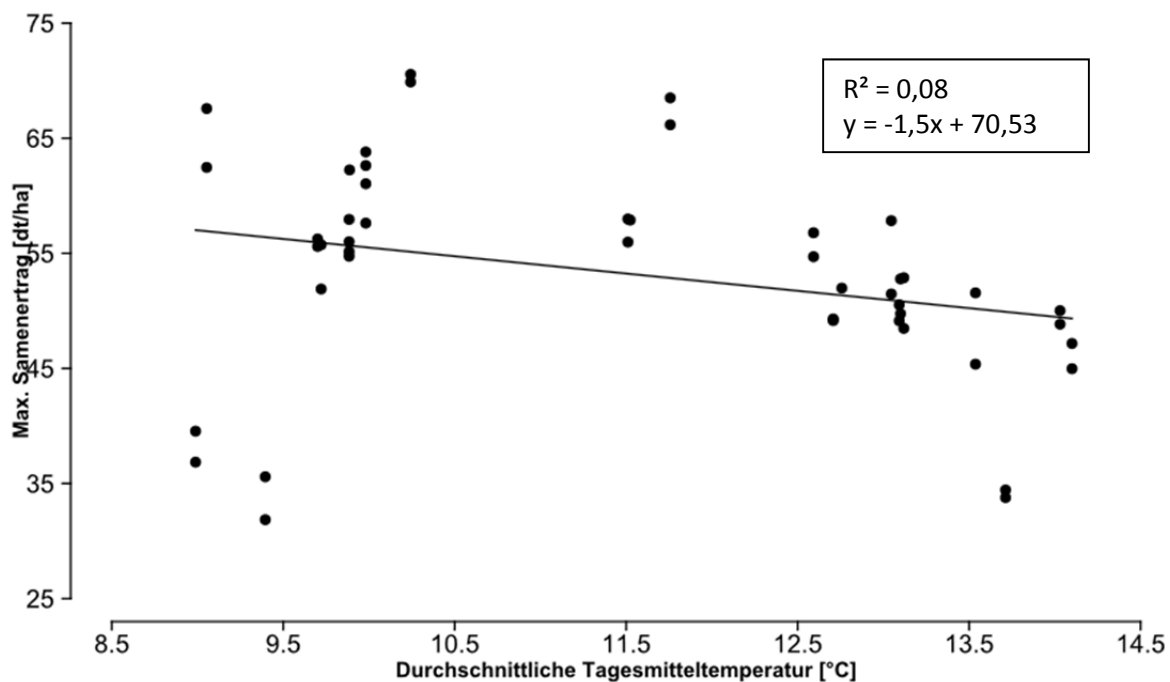
Die statistische Auswertung zeigte, dass der Samen- und Ölertrag von einer komplexen Interaktion von Witterungsparametern abhängt. Sowohl Samen- und auch Ölertrag wurden von ähnlichen Witterungsbedingungen beeinflusst.

Die wichtigsten Entwicklungsphasen für die Ertragsbildung waren die Schoten- und Samenanlage zwischen dem Beginn der Knospenbildung und der Vollblüte und die Samenentwicklung nach der Blüte. Somit wurde der Ertrag vor allem durch die Witterung während der reproduktiven Phase bestimmt.

Der Samenertrag wurde signifikant durch folgende Parameter und Interaktionen beeinflusst: Sorte, durchschnittliche Tagesmitteltemperatur während der Samenentwicklung ( $T_{\text{Samen}}$ ), Trockenstress und durchschnittliche Tagesmitteltemperatur während der Schoten- und Samenanlage ( $DI_{\text{Anlage}}$ ,  $T_{\text{Anlage}}$ ) und den Interaktionen zwischen  $T_{\text{Anlage}}$  und Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage ( $R_{\text{Anlage}}$ ) und zwischen  $T_{\text{Samen}}$  und  $R_{\text{Anlage}}$ . Die Kombination dieser Witterungsparameter erklärt insgesamt 40% der Gesamtvariabilität des Samenertrages. Die Sorte erklärt nur 1% der Ertragsvariabilität.

Der Ölertrag wurde signifikant durch folgende Parameter und Interaktionen beeinflusst: Sorte,  $T_{\text{Anlage}}$ ,  $DI_{\text{Anlage}}$ ,  $T_{\text{Samen}}$  und die Interaktion zwischen  $T_{\text{Anlage}}$  und  $DI_{\text{Anlage}}$ . Das lineare Regressionsmodell erklärt 29% der Gesamtvariabilität des Ölertrages.

Abb.2 zeigt, dass Tagesmitteltemperatur und Trockenstress während der Schoten- und Samenanlage negativ mit dem Ertrag korreliert waren.



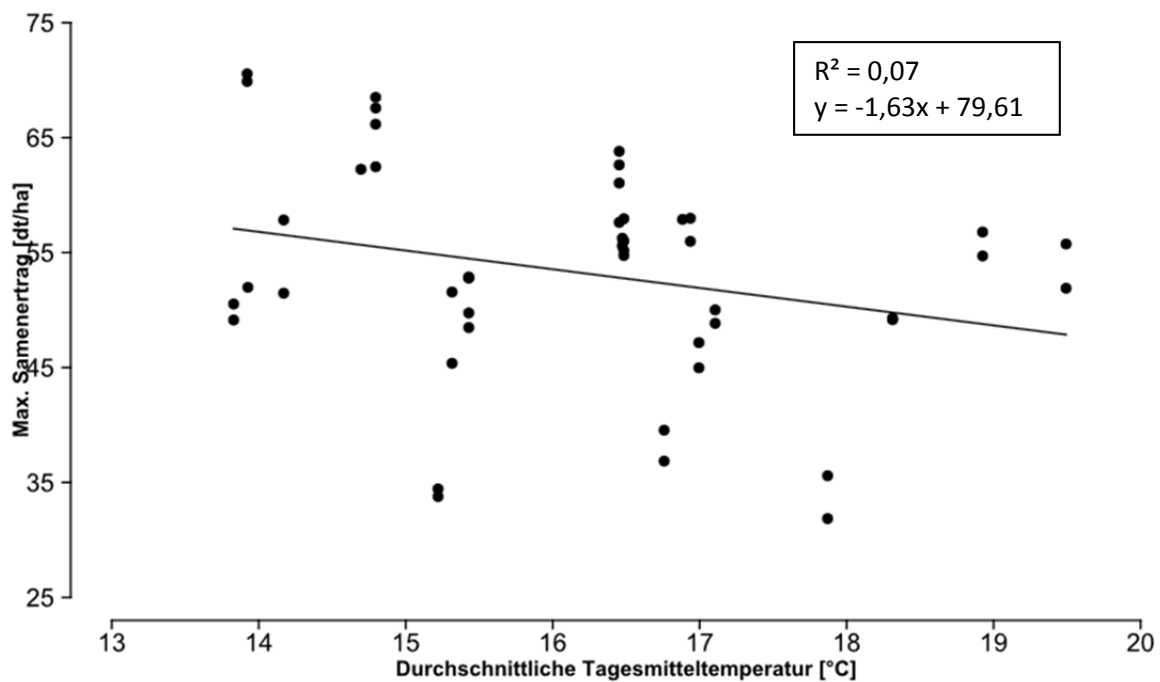
**Abb. 2:** Max. Samenertrag in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur während der Schoten- und Samenanlage.

Erhöhte Temperaturen verkürzen die Phasendauer und limitieren dadurch die Assimilatproduktion während der Schoten- und Samenanlage. Die Assimilatverfügbarkeit vor und während der Blüte bestimmt die potenziell gebildete Menge reproduktiver Organe (Gomez und Miralles 2011, Mendham und Scott 1975).

Trockenstress während der Blüte führt zu einer reduzierten vegetativen und generativen Trockenmasseproduktion, da das Blattwachstum und damit der Blattflächenindex und die aufgenommene Strahlungsmenge reduziert sind (Blum 1996). Frühere Studien bestätigen, dass Winterraps während der Blüte besonders sensitiv auf Trockenstress reagiert und dieser die Anzahl der Schoten pro Pflanze und Samen pro Schote verringern kann.

Auch die Temperatur während der Samenentwicklung hatte einen signifikant negativen Effekt auf den Samen- und Ölertrag (Abb. 3). Die Verkürzung der Samenentwicklung durch erhöhte

Temperaturen kann zu beschleunigter Seneszenz der Blätter und Schoten und dadurch zu einer reduzierten Strahlungsaufnahme und Photosyntheseaktivität führen. Des Weiteren hat eine verkürzte Samenentwicklung auch einen negativen Einfluss auf den Ölertrag, da Proteine in den Samen vor den Fetten gebildet werden und somit eine verkürzte Phasendauer zu einem reduzierten Ölgehalt in den Samen führt (Diepenbrock und Geisler 1979).

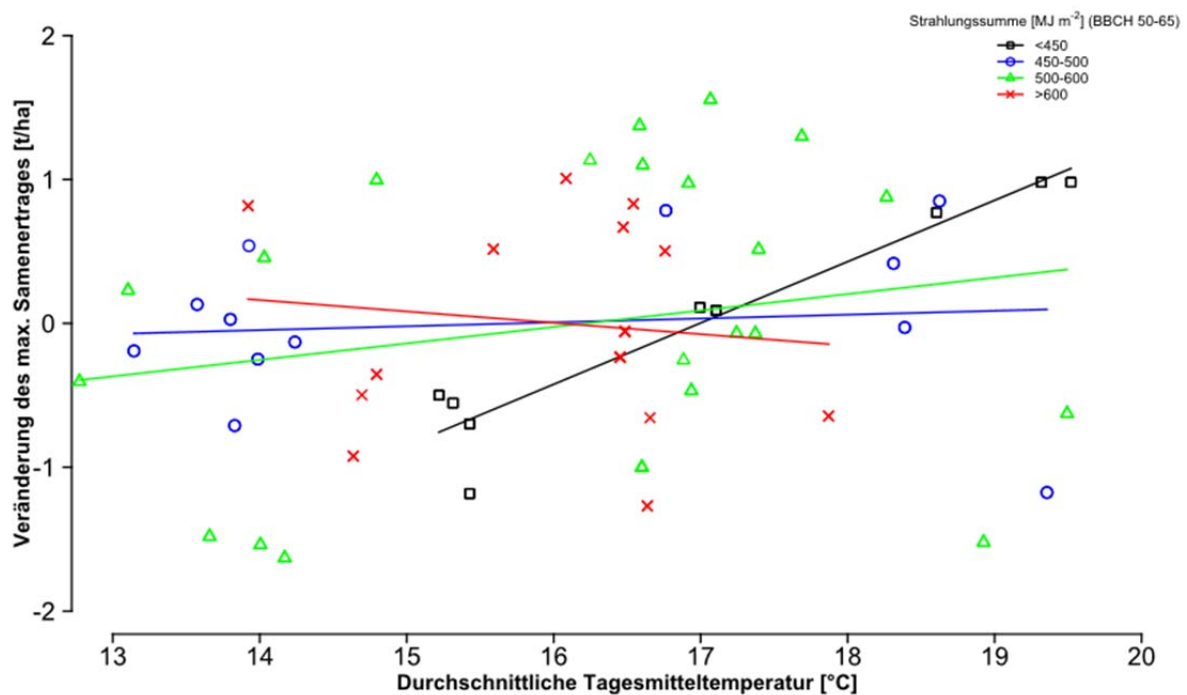


**Abb. 3:** Max. Samenertrag in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur während der Samenentwicklung

Neben den Effekten einzelner Witterungsparameter während verschiedener Entwicklungsphasen wurden auch die Effekte der Interaktionen von Witterungsvariablen sowohl innerhalb einer Entwicklungsphase als auch zwischen den Entwicklungsphasen untersucht und es zeigte sich, dass sie einen großen Einfluss auf die Ertragsbildung haben und in Untersuchungen nicht vernachlässigt werden sollten:

Der Einfluss der Temperatur während der Anlage der Schoten und Samen und der Samenentwicklung variierte je nach Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage. Der negative Effekt der

Temperatur während der Schoten- und Samenanlage auf den Ertrag wurde nur bei geringer Strahlungssumme nachgewiesen. Im Gegensatz dazu war die Temperatur während der Samenentwicklung nur bei hoher Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage negativ mit dem Ertrag korreliert (Abb. 4, Tab. 4).



**Abb. 4:** Veränderung des max. Samenertrages bei steigender Tagesmitteltemperatur während der Samenentwicklung unter Berücksichtigung der Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage

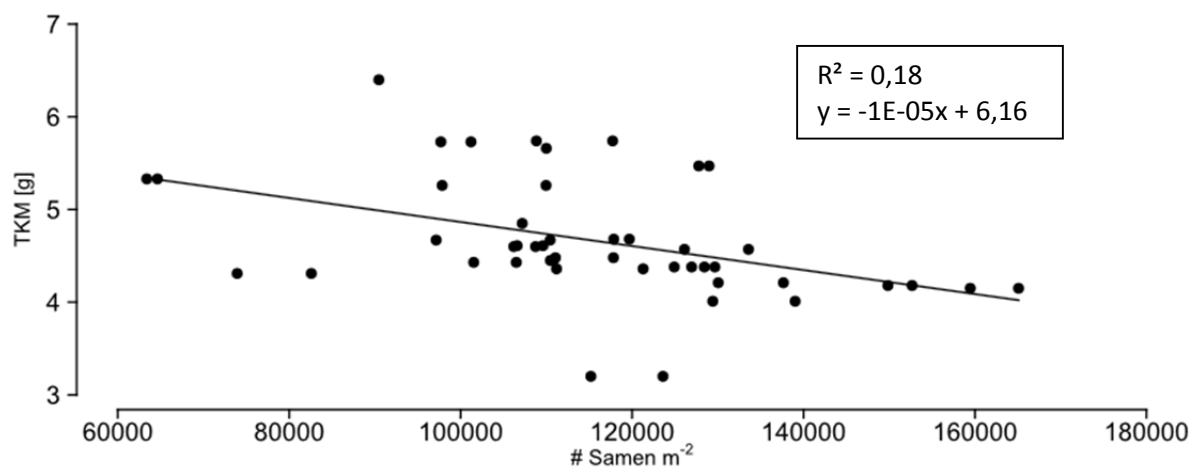
**Tab. 4:** Güteparameter und Parameter der linearen Regression zwischen Veränderung des max. Samenertrages und der durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur während der Samenentwicklung

Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage	R <sup>2</sup>	Regressionsparameter a (Interzept)	Regressionsparameter b (Steigung)
< 450 MJ/m <sup>2</sup>	0,92	-7,24	0,43
450 - 500 MJ/m <sup>2</sup>	0,01	-0,42	0,03
500 - 600 MJ/m <sup>2</sup>	0,04	-1,86	0,11
> 600 MJ/m <sup>2</sup>	0,01	1,27	-0,08



Die Interaktion zwischen Temperatur und Trockenstress während der Schoten- und Samenanlage zeigte einen stärkeren Temperatureffekt bei erhöhtem Trockenstress. Dies könnte daran liegen, dass unter Trockenstress die Bestandestemperatur höher werden kann als die Umgebungstemperatur (Gardner et al. 1981, Maes und Steppe 2012).

Die Untersuchung der Ertragskomponenten zeigte, dass TKM und Samenanzahl pro m<sup>2</sup> zur Ernte negativ korreliert sind (Abb. 5). Dies deutet auf eine Kompensation zwischen den Ertragskomponenten hin. Eine geringe Anzahl von Samen wird bei ausreichender Assimilatverfügbarkeit während der Samenentwicklung durch eine erhöhte TKM ausgeglichen.



**Abb. 5:** Korrelation zwischen Tausend-Korn-Masse (TKM) und Samenanzahl pro m<sup>2</sup>

Der Kompensationseffekt zwischen den Ertragskomponenten variierte in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen. Eine erhöhte Anzahl Samen pro m<sup>2</sup> und eine gleichzeitig erniedrigte TKM konnte tendenziell bei geringer Strahlung während der Schoten- und Samenanlage beobachtet werden. Im Gegensatz dazu war die TKM trotz variierender Samenanzahl pro m<sup>2</sup> bei hoher Strahlungssumme während der Schoten- und Samenanlage konstant. Diese Reaktion deutet darauf hin, dass bei niedrigen Strahlungssummen während der Schoten- und Samenanlage weniger Samen angelegt werden, dies bei ausreichender Assimilatverfügbarkeit zur Samenfüllung aber nicht zu einer

Ertragslimitierung führen muss. Bei verkürzter Samenfüllung durch hohe Temperaturen während der Samenentwicklung wurde jedoch kein Kompensationseffekt beobachtet, da die Assimilatverfügbarkeit reduziert war. Dies führte zu einer signifikanten Ertragslimitierung.

Die vorgestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Winterrapserttrag vorwiegend quellenlimitiert ist, da eine geringe Senkenkapazität bei ausreichender Assimilatverfügbarkeit in der Samenentwicklung zu keiner Ertragslimitierung im untersuchten Datensatz führte.

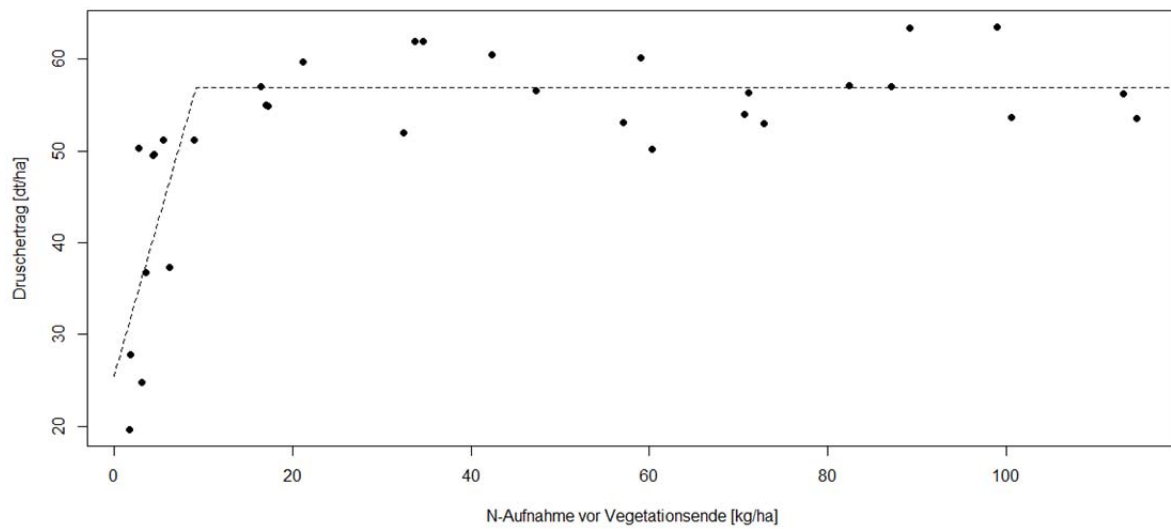
## 5. Ertragswirkung der Vorwinterentwicklung

Die Vorwinterentwicklung von Winterraps wird in der Literatur als wichtiger ertragslimitierender Faktor beschrieben. Diepenbrock (2000) definierte ein Minimalwachstum vor Vegetationsende: 6-8 Blatt-Stadium, Wurzeldurchmesser  $> 5\text{mm}$ , Sprosslänge  $< 20\text{mm}$ . Des Weiteren wurde von Diepenbrock und Grosse (1995) eine optimale oberirdische Biomasseakkumulation von  $200\text{ g/m}^2$  vor Vegetationsende bestimmt. Auch die N-Aufnahme vor Vegetationsende ist ein sinnvoller Parameter, um die Vorwinterentwicklung abzuschätzen. Henke et al. (2007) schlagen eine Reduktion der Frühjahrsdüngung vor, wenn vor Winter mehr als  $50\text{ kg N/ha}$  durch den Bestand aufgenommen wurden. Auf Grund von später Aussaat oder schlechten Bedingungen während der Keimung und der Jugendentwicklung kann es jedoch zu einer weit stärker beeinträchtigten Vorwinterentwicklung in den Beständen kommen. Daraus ergibt sich die Frage, ob es in der Vorwinterentwicklung Grenzwerte für die N-Aufnahme und die akkumulierte Trockenmasse gibt, die bei Unterschreitung zu einer signifikanten Ertragsreduktion führen.

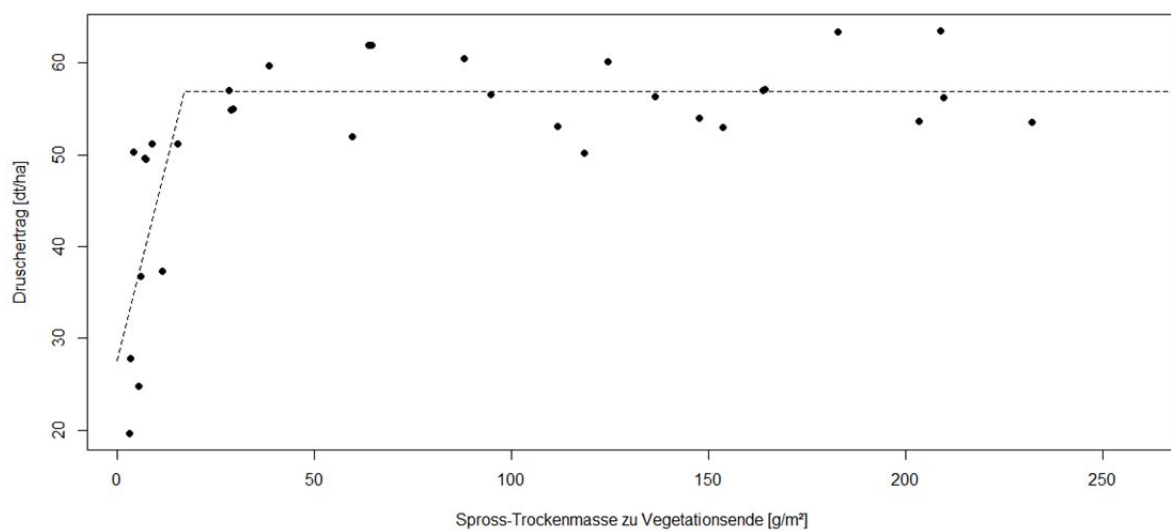
Datensatz 2 mit 4 Saatterminen und 4 Herbst-N-Stufen zeigte stark variierende Vorwinterentwicklungen. Die N-Aufnahme erreichte bis zu  $115\text{ kg N/ha}$  und die Sprosstrockenmasse vor Vegetationsende variierte zwischen  $2,6\text{ g/m}^2$  und  $260\text{ g/m}^2$ . Die Auswirkungen auf den Ertrag wurden mit einer Linear-Plateau-Funktion dargestellt, um einen möglichen Grenzwert definieren zu können (Abb. 6, Abb. 7).

Die Ergebnisse zeigten Grenzwerte bei deren Unterschreitung eine deutliche Ertragsreduktion auftritt. Diese Grenzwerte lagen bei  $9,2\text{ kg/ha}$  N-Aufnahme und  $17,0\text{ g/m}^2$  Sprosstrockenmasse zu Vegetationsende. Die bestimmten Grenzwerte sind damit deutlich niedriger als die zuvor publizierten Werte und deuten darauf hin, dass die Vorwinterentwicklung zumeist keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag hat, da der Winterraps eine geringe Vorwinterentwicklung bei ausreichender

Assimilatproduktion im Frühjahr kompensieren kann. Diese Ergebnisse bestätigen auch die Ergebnisse aus der Auswertung der Ertragseffekte der Witterung während unterschiedlicher Entwicklungsphasen (Kapitel 3). Die Witterung während der Vorwinterentwicklung hatte dabei keinen signifikanten Einfluss auf den maximalen Samen- bzw. Ölertrag.



**Abb. 6:** Druschertrag in Abhängigkeit von der N-Aufnahme vor Vegetationsende



**Abb. 7:** Druschertrag in Abhängigkeit von der Spross-Trockenmasse zu Vegetationsende

## 6. Aufstellung von organspezifischen N-Verdünnungsfunktionen

Die N-Konzentration der oberirdischen Biomasse variiert während der Entwicklung von Ackerkulturen. Für die Berechnung der N-Aufnahme in Ertragsbildungsmodellen müssen funktionelle Beziehungen ermittelt werden, die diesen Zusammenhang beschreiben, wobei diese entweder auf der Ebene des Gesamtprozesses oder aber einzelner Organe des Sprosses definiert werden können. Für Winterraps liegen bisher nur wenige Daten vor, insbesondere auf der Ebene einzelner Organe.

Salette und Lemaire (1981) beschrieben eine allometrische Beziehung zwischen der akkumulierten N-Menge und der akkumulierten Trockenmasse der oberirdischen Biomasse von Gräsern. Auch für weitere Kulturarten, wie z.B. Weizen, wurde in den letzten Jahrzehnten eine abnehmende N-Konzentration in der oberirdischen Biomasse bei steigender Trockenmasse nachgewiesen (Justes et al. 1994). Es wurde vermutet, dass die Abnahme der N-Konzentration bei steigender Trockenmasse durch Selbstbeschattung der Blätter und eine Veränderung des Blatt-Spross-Verhältnisses während der Entwicklung hervorgerufen wird. Zur Beschreibung der Allometrien wurden Verdünnungsfunktionen abgeleitet, die die Veränderung der N-Konzentration bei steigender Trockenmasse abbilden. Je nach Entwicklungsphase und Stickstoffversorgungsstatus können diese Funktionen variieren.

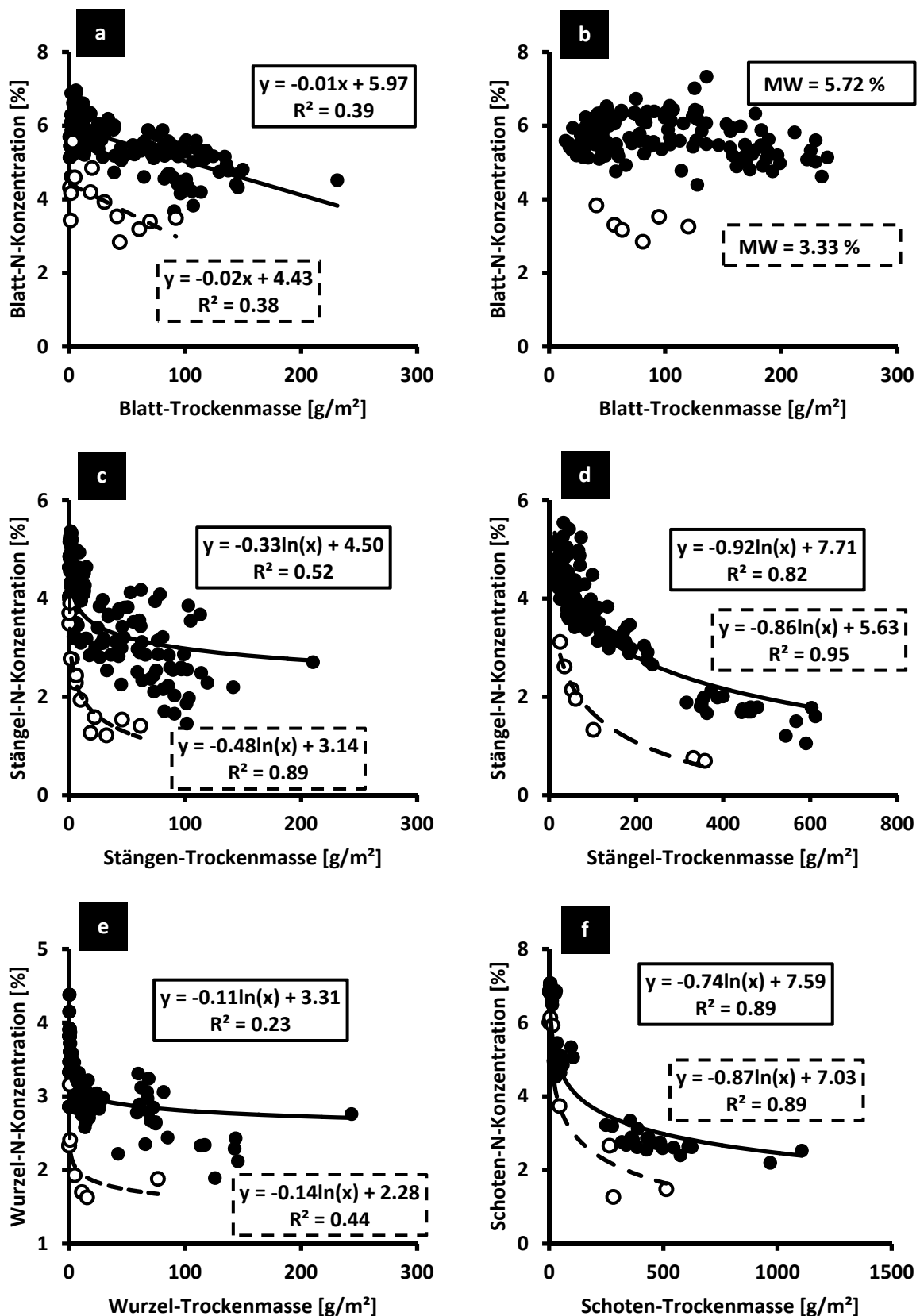
Colnenne et al. (1998) leiteten eine kritische N-Verdünnungsfunktion für die oberirdische Biomasse von Winterraps vom Auflaufen bis zur Blüte her. Die kritische N-Konzentration entspricht dabei der minimalen N-Konzentration, die zum Erreichen der maximalen Trockenmasse benötigt wird.

Untersuchungen detaillierter Datensätze aus Hohenschulen (Datensatz 1 und 2) zeigten, dass es sinnvoll ist N-Verdünnungsfunktionen für einzelne Pflanzenorgane von Winterraps aufzustellen, da diese unterschiedlich verlaufen und auch die Reaktion auf N-Mangel variiert. Insbesondere für die Quantifizierung möglicher Effekte einer verbesserten N-Translokation aus den vegetativen in die

generativen Organe ist eine getrennte Betrachtung der „N-Verdünnungsfunktionen“ notwendig. Im Folgenden haben wir für Blätter (Abb. 8a, b), Stängel (Abb. 8c, d), Wurzeln (Abb. 8e) und Schoten (Abb. 8f) jeweils optimale und kritische N-Verdünnungsfunktionen abgeleitet, die die Beziehung zwischen N-Konzentration und Trockenmasse während unterschiedlicher Entwicklungsphasen beschreiben. Die optimalen Verdünnungsfunktionen wurden aus Daten N-unlimitierter Plots geschätzt, während die kritischen Verdünnungsfunktionen aus Daten ungedüngter Plots abgeleitet wurden.

Die N-Konzentration in den Blättern nimmt vom Auflaufen bis Schossbeginn mit steigender Trockenmasse linear ab. Ab Beginn des Sprosswachstums bleibt die N-Konzentration konstant. Die Stängel-Verdünnungsfunktionen folgen einem logarithmischen Verlauf, die Parameter variieren jedoch vor und nach Beginn des Schossens. Auch die Verdünnungsfunktionen für Wurzeln vor Schossbeginn und für Schoten während der generativen Phase haben eine logarithmische Form.

Die abgeleiteten Funktionen inklusive Funktionsparameter wurden im Pflanzenwachstumsmodell (Kapitel 6) implementiert, um die Dynamik der N-Konzentration und N-Menge in den einzelnen Organen zu beschreiben und einen Stickstoff-Mangel-Faktor zur Abbildung der Effekte von N-Mangel zu berechnen.

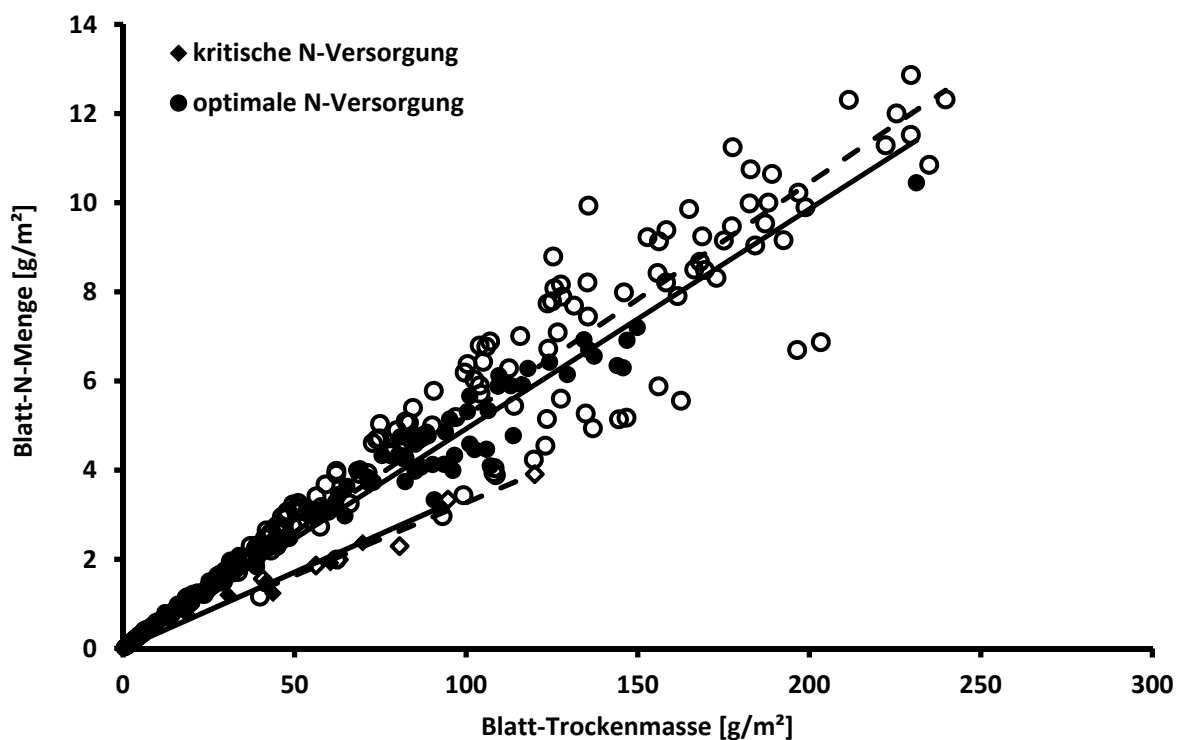


**Abb. 8:** Optimale (gefüllte Kreise und durchgezogenen Linien) und kritische (offene Kreise und gestrichelte Linien) N-Verdünnungsfunktionen inkl. Regressionsgleichungen für a) Blätter vor Schossbeginn, b) Blätter nach Schossbeginn, c) Stängel vor Schossbeginn, d) Stängel nach Schossbeginn, e) Wurzeln vor Schossbeginn, f) Schoten bis Blühende

Bei N-Mangel ist sowohl die Trockenmasseproduktion, als auch die N-Akkumulation limitiert. Die spezifische Reaktion der einzelnen Organe auf N-Mangel unterscheidet sich jedoch.

Trockenmasse und N-Menge entwickeln sich in allen Organen sowohl unter optimaler N-Versorgung, als auch unter N-Mangel proportional zueinander. Unter N-Mangel kommt es in allen Organen zu einer stärkeren Reduktion der N-Akkumulation als der Trockenmassebildung.

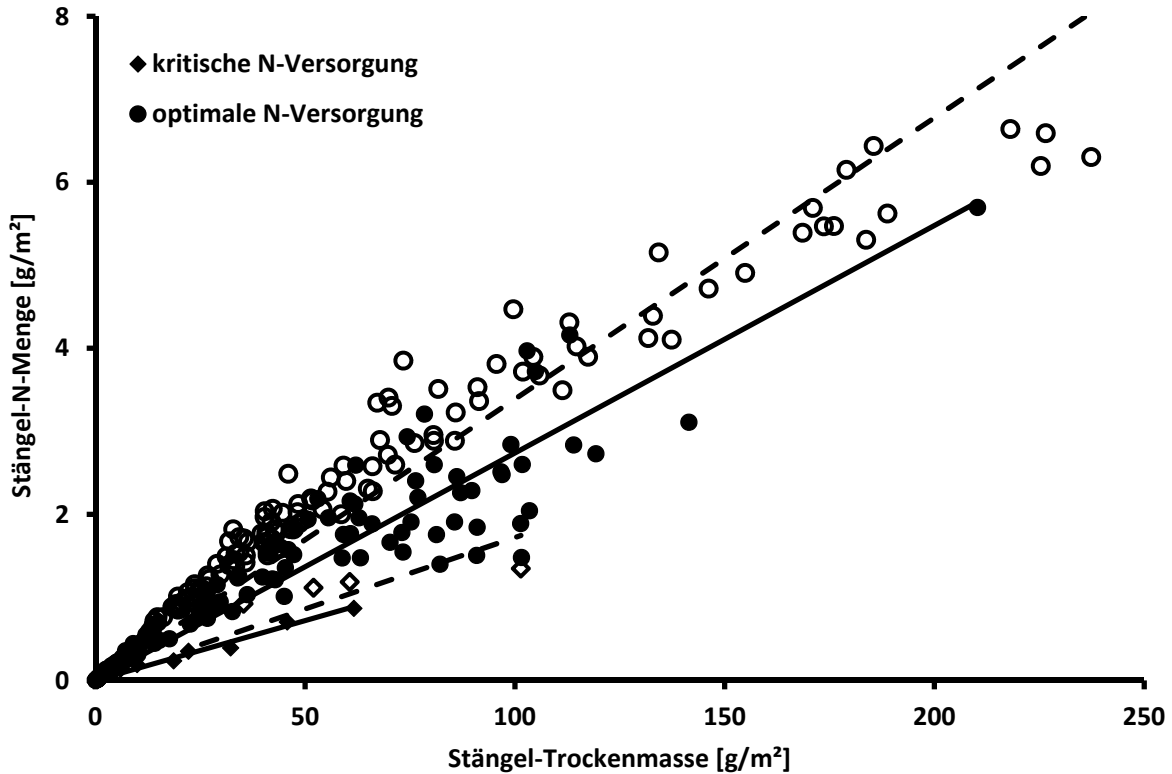
In den Blättern (Abb. 9, Tab. 5) hat die Regressionsgerade zwischen N-Menge und Trockenmasse unter optimaler N-Versorgung eine Steigung von ca. 0.05, während die Steigung unter N-Mangel nur ca. 0.033 beträgt. Das bedeutet, dass die Steigung der Regressionsgerade um 30-40% reduziert ist. Die Regressionsgeraden vor und nach Schossbeginn unterscheiden sich trotz unterschiedlicher Verdünnungsfunktionen kaum.



**Abb. 9:** Zusammenhang zwischen N-Menge und Trockenmasse der Blätter bei Winterraps (gefüllte Symbole und durchgezogene Linie: Auflaufen bis Schossbeginn; offene Symbole und gestrichelte Linie: Schossbeginn bis Blüte)



Im Stängel (Abb. 10, Tab. 5) reduziert sich die Steigung der Regressionsgerade sowohl vor als auch nach Beginn des Sprosswachstums unter starkem N-Mangel um ca. 50% im Vergleich mit der N-unlimitierten Variante.



**Abb. 10:** Zusammenhang zwischen N-Menge und Trockenmasse der Stängel bei Winterraps (gefüllte Symbole und durchgezogene Linie: Auflaufen bis Schossbeginn; offene Symbole und gestrichelte Linie: Schossbeginn bis Blüte)

**Tab. 5:** Güteparameter und Parameter der linearen Regressionen zwischen N-Menge und Trockenmasse von Blättern und Stängeln

Pflanzenorgan	Entwicklungsphase	N-Versorgung	R <sup>2</sup>	Regressionsparameter a (Steigung)
Blätter	Auflaufen bis Schossbeginn	kritisch	0,98	0,034
		optimal	0,98	0,049
	Schossbeginn bis Blüte	kritisch	0,95	0,033
		optimal	0,89	0,052
Stängel	Auflaufen bis Schossbeginn	kritisch	0,98	0,014
		optimal	0,91	0,027
	Schossbeginn bis Blüte	kritisch	0,89	0,017
		optimal	0,90	0,034

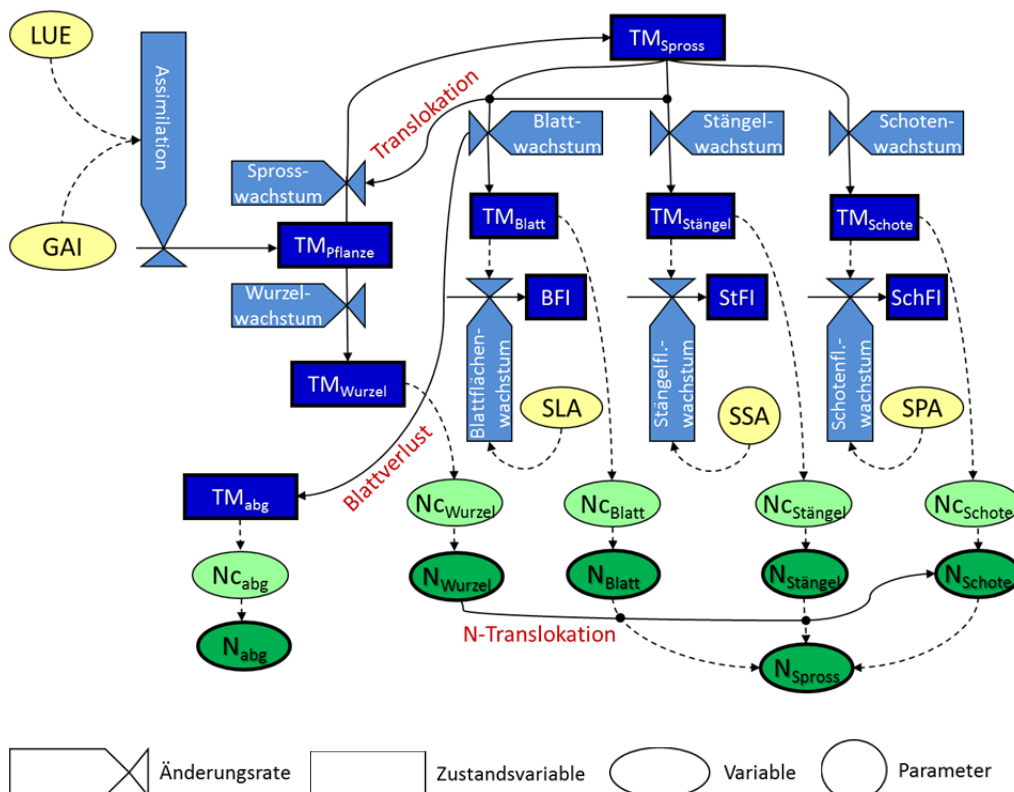
Diese Reaktionen auf N-Mangel weisen darauf hin, dass im Stängel die N-Menge unter N-Mangel in Relation zur Trockenmasse stärker reduziert wird als in den Blättern. In den Blättern wird demnach eine möglichst hohe N-Menge erhalten, um eine hohe photosynthetische Aktivität auch unter N-Mangel zu ermöglichen. Hieraus wird deutlich, dass für eine realistische Beschreibung der Ertragsbildung von Rapsbeständen die Betrachtung der N-Dynamik auf der Ebene einzelner Organe notwendig ist. Hierzu wurden im Projekt, wichtige Daten und Beziehungen ermittelt.

## 7. Modellbeschreibung

Zur Abbildung der Bestandsentwicklung und der Ertragsbildung von Winterraps unter optimalen, sowie wasser- und N-limitierten Bedingungen wurde in unserer Arbeitsgruppe ein dynamisches prozessorientiertes Pflanzenwachstumsmodell erarbeitet, das mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell und einem Phänologiemoell verknüpft ist.

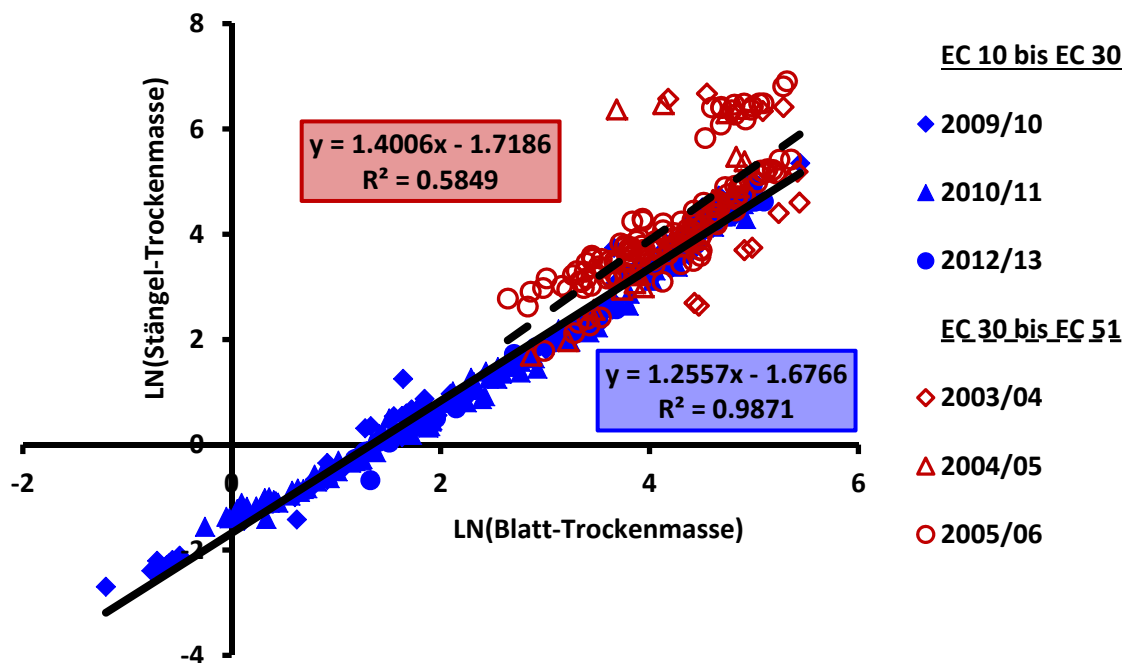
Die phänologische Entwicklung wird im Phänologiemoell simuliert. Die Phasendauer hängt vor allem von Temperatursummen, aber auch von der Photoperiode und der Vernalisation ab.

Das Pflanzenwachstumsmodell simuliert die physiologischen Prozesse in Tagesschritten in Abhängigkeit der Witterung und der Wasser- und N-Verfügbarkeit im Boden, berücksichtigt jedoch weder Krankheiten noch Schädlingsdruck. Eine vereinfachte Übersicht der Modellstruktur ist in Abb. 11 gegeben.

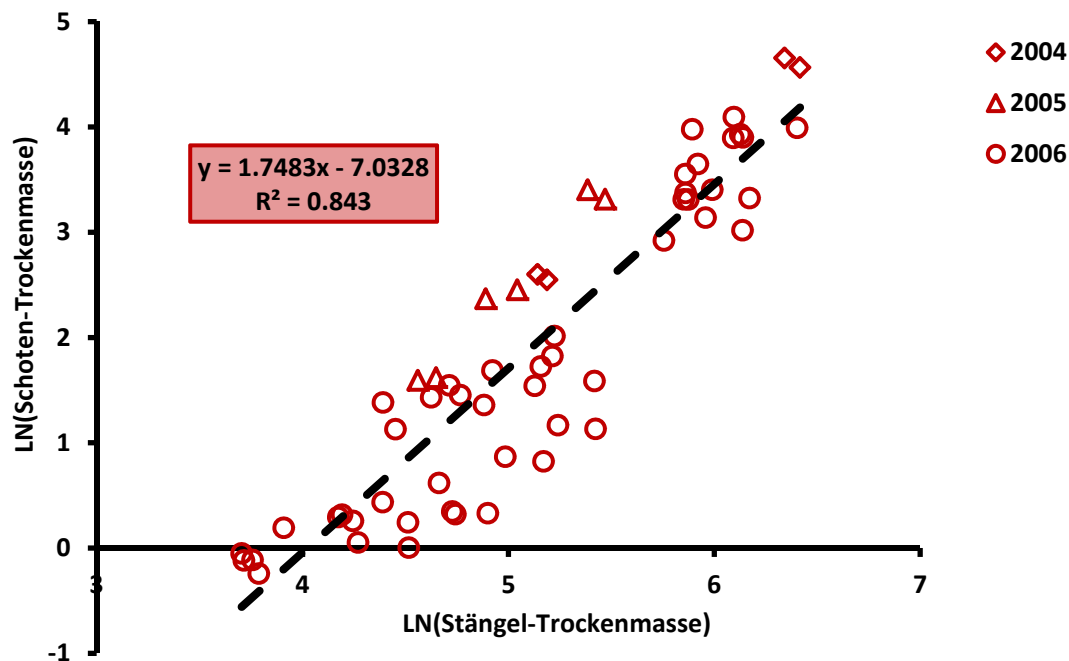


**Abb. 11:** Vereinfachte Struktur des dynamischen Pflanzenwachstumsmodells mit Stoffflüssen (durchgezogene Linie) und Informationsweitergabe (gestrichelte Linie) für Winterraps (TM: Trockenmasse, Nc: N-Konzentration, N: N-Menge, BFI: Blattflächenindex, StFI: Stängelflächenindex, SchFI: Schotenflächenindex, SLA: spezifische Blattfläche, SSA: spezifische Stängelfläche, SPA: spezifische Schotenfläche, LUE: Lichtnutzungs-Effizienz, PW: Schotenwand, abg: abgestorben)

Der Gesamttrockenmassezuwachs wird aus der Strahlungsaufnahme und der Lichtnutzungs-Effizienz des Bestandes berechnet. Der Anteil des Wurzelzuwachses am Gesamttrockenmassezuwachs steigt während der Vorwinterentwicklung zunächst an, erreicht im Frühjahr ein Maximum und fällt danach wieder ab. In Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium wird die Sprosstrockenmasse in vegetative und generative Organe aufgeteilt. Dabei wird die Trockenmassepartitionierung anhand allometrischer Beziehungen zwischen Blatt- und Stängelwachstum (Abb. 12) und Stängel- und Schotenwachstum (Abb. 13) beschrieben.



**Abb. 12:** Allometrische Beziehungen zwischen Blatt- und Stängelwachstum vor und nach Beginn des Schossens



**Abb. 13:** Allometrische Beziehung zwischen Stängel- und Schotenwachstum vom Beginn des generativen Wachstums bis Blühende

Aus Blatt-, Stängel- und Schotentrockenmasse und der dazugehörigen spezifischen Fläche werden organspezifische Blatt-, Stängel- und Schotenflächen-Indices (z.B. Blattflächenindex = m<sup>2</sup> Blattfläche je m<sup>2</sup> Bodenfläche) berechnet, die die Strahlungsaufnahme bestimmen.

Als weiteren Schritt wird neben der Trockenmassebildung und -partitionierung die N-Dynamik des Bestandes im Modell abgebildet. Zur Bestimmung der N-Aufnahme und N-Verteilung wird die N-Konzentration in den einzelnen Organen mit Verdünnungsfunktionen simuliert (vgl. Kapitel 6). Die Verdünnungsfunktionen beschreiben die Abnahme der N-Konzentration in Blättern, Stängeln, Schoten und Wurzeln bei Trockenmassezuwachs.

Unter optimalen, wasser- und N-unlimitierten Bedingungen hängt die Trockenmassebildung ausschließlich von der Strahlungsaufnahme durch die gebildete photosynthetisch-aktive Fläche ab. Wassermangel wird im Modell anhand des Verhältnisses zwischen aktueller und potentieller Transpiration ermittelt und hat einen linear reduzierenden Einfluss auf die Trockenmassebildung der Gesamtpflanze. N-Mangel und seine Effekte werden organspezifisch einzeln für Blätter, Stängel,

Schoten und Wurzeln quantifiziert. Dabei wird aus einer kritischen und einer optimalen N-Verdünnungsfunktion ein organspezifischer Stickstoff-Mangel-Faktor berechnet. Dieser limitiert zum einen die Assimilationsrate des Bestandes, beeinflusst aber auch die Trockenmassepartitionierung und N-Verteilung zwischen den Organen.

Zwei zentrale Prozesse in der Winterrapsentwicklung sind der Verlust von Trockenmasse und N-Verbindungen durch Seneszenzprozesse, sowie die Umverlagerung von Assimilaten und N-Verbindungen aus den vegetativen in die generativen Organe. Nach der Blüte werden nur noch geringe N-Mengen aufgenommen, sodass ungefähr 70% der N-Menge in den Schoten aus Blättern, Stängeln und Wurzeln transloziert werden. Auch die Umverlagerung von Assimilaten ist wichtig für die Ertragsbildung bei Winterraps, da 12-17,5% der Samentrockenmasse aus translozierten Assimilaten gebildet werden.

Seneszenz kann im Modell durch drei Prozesse initiiert werden: Frost, Selbstbeschattung und Alterung. Frostseneszenz setzt bei negativen Temperaturen unterhalb  $-20^{\circ}\text{C}$  ein und führt zu vollständigem Trockenmasse- und N-Verlust der absterbenden Blatt- und Stängelfläche. Seneszenz durch Selbstbeschattung wird auf Grundlage der Erhaltungsaerobic beschrieben. Der Energiebedarf für die Erhaltungsaerobic bestimmt, ob die über 3 Tage gemittelte aufgenommene Strahlung ausreicht, um den gebildeten Blattflächenindex zu erhalten. Bei ungenügender Strahlungsaufnahme wird der Seneszenzprozess initialisiert und Blattfläche stirbt ab, wobei zuvor Assimilate und N-Verbindungen teilweise in Speicherorgane (v.a. Stängel und Wurzeln) und später in die Schoten und Samen umverlagert werden. Altersseneszenz auf Bestandesebene tritt erst nach Beendigung des Schotenwachstums auf. Die seneszenten Blätter werden abgeworfen und die photosynthetische Aktivität der Blätter und Schoten und damit die Lichtnutzungs-Effizienz des Gesamtbestandes nimmt ab.

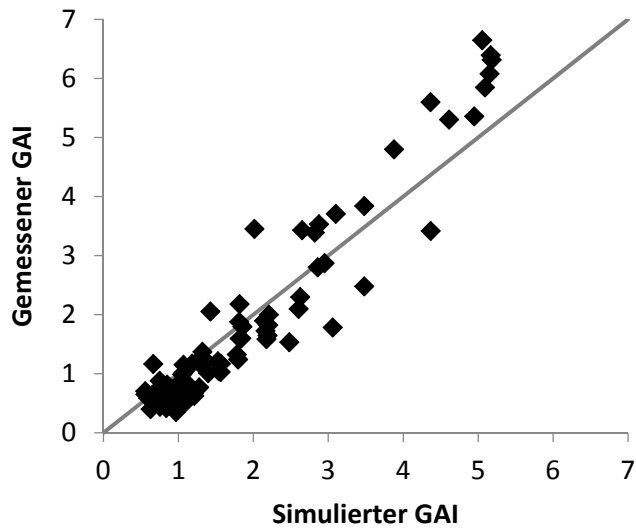
Der Samenertrag wird im Modell aus der Spross-Trockenmasse und einem Harvest-Index (HI) am Erntetermin berechnet. Des Weiteren wird der Ölgehalt in Abhängigkeit von der Dauer der Samenfüllung und der N-Versorgung der Samen simuliert.

Das Modell wurde regional mit Daten aus Hohenschulen (Ostholstein) kalibriert (Datensatz 1 und 2) und mit unabhängigen Daten validiert (Datensatz 3, 4, 5 und 6). Standorte und Messperioden der Kalibrierungs- und Validierungsdatensätze sind in Tab. 1 dargestellt.

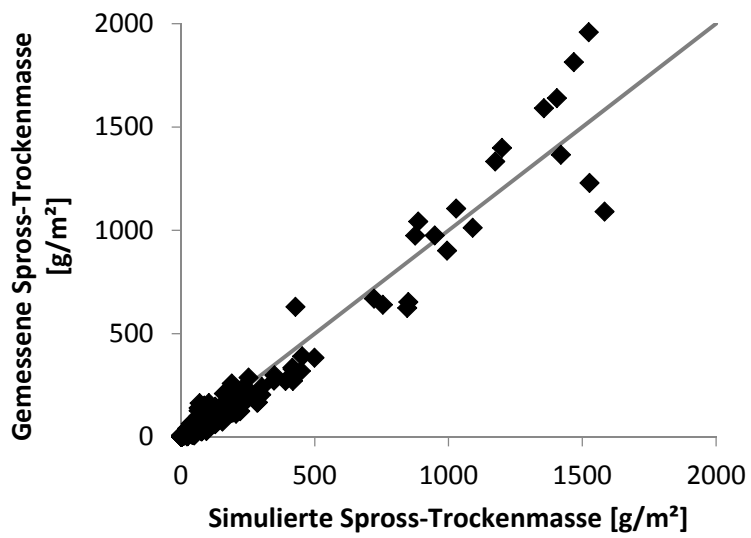
Die Daten im Kalibrierungs- und Validierungsdatensatz werden durch das Modell gut abgebildet (Abb. 14-17). Abbildungsgüte, definiert als „model efficiency“ (EF) und mittlere Abweichung (RMSE) für die Simulation der Trockenmassen, Flächen-Indices und N-Mengen, sowie Erträge und Ölgehalte im Kalibrierungsdatensatz sind in Tab. 6 dargestellt.

**Tab. 6:** Abbildungsgüte des Modells in Bezug auf den Kalibrierungsdatensatz ( $R^2$ : Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden, n: Anzahl der Datenpunkte, RMSE: mittlere Abweichung, EF: "model efficiency")

Parameter	$R^2$	n	RMSE	EF
<b>GAI</b>	0,91	84	0,56	0,88
<b>Spross-TM</b>	0,95	220	79,26 g/m <sup>2</sup>	0,94
<b>Blatt-TM</b>	0,80	212	19,70 g/m <sup>2</sup>	0,79
<b>Stängel-TM</b>	0,92	212	39,99 g/m <sup>2</sup>	0,92
<b>Schoten-TM</b>	0,88	44	152,65 g/m <sup>2</sup>	0,86
<b>Wurzel-TM</b>	0,89	128	10,34 g/m <sup>2</sup>	0,89
<b>Spross-N</b>	0,94	220	1,74 g/m <sup>2</sup>	0,92
<b>Blatt-N</b>	0,79	212	1,03 g/m <sup>2</sup>	0,79
<b>Stängel-N</b>	0,80	212	1,23 g/m <sup>2</sup>	0,49
<b>Schoten-N</b>	0,85	36	2,84 g/m <sup>2</sup>	0,83
<b>Wurzel-N</b>	0,93	101	0,24 g/m <sup>2</sup>	0,93
<b>Ertrag</b>	0,56	128	10,69 dt/ha	
<b>Ölgehalt</b>	0,95	120	1,00 %	

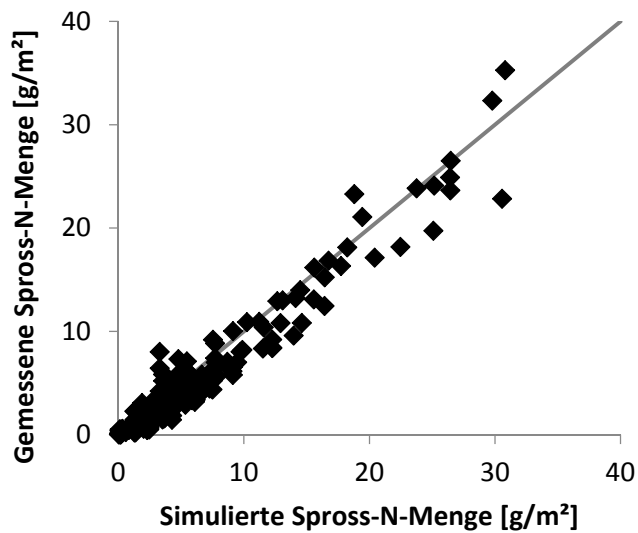


**Abb. 14:** Beziehung zwischen dem gemessenen und simulierten Grün-Flächen-Index (GAI) für den Kalibrierungsdatensatz

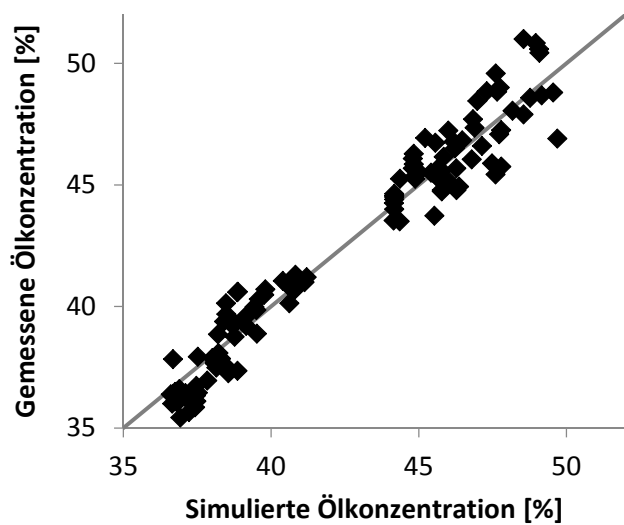


**Abb. 15:** Beziehung zwischen dem gemessener und simulierter Spross-Trockenmasse für den Kalibrierungsdatensatz





**Abb. 16:** Beziehung zwischen dem gemessener und simulierter Spross-N-Menge für den Kalibrierungsdatensatz



**Abb. 17:** Beziehung zwischen dem gemessener und simulierter Ölkonzentration für den Kalibrierungsdatensatz

Im Gegensatz zu bereits veröffentlichten Modellen (z.B. LINTUL-BRASNAP (Habekotté 1997), CERES-RAPE (Gabrielle et al. 1998), DAISY (Petersen et al. 1995), CSM-CROPGROW (Deligios et al. 2013)) ist das aktuell beschriebene Modell sowohl für optimale, als auch für wasser- bzw. N-limitierte Bedingungen parametrisiert worden. Des Weiteren sind winterrapsspezifische Prozesse wie Frost-

und Beschattungsseneszenz, sowie die Umverlagerung von Assimilaten und N-Translokation im Modell berücksichtigt.

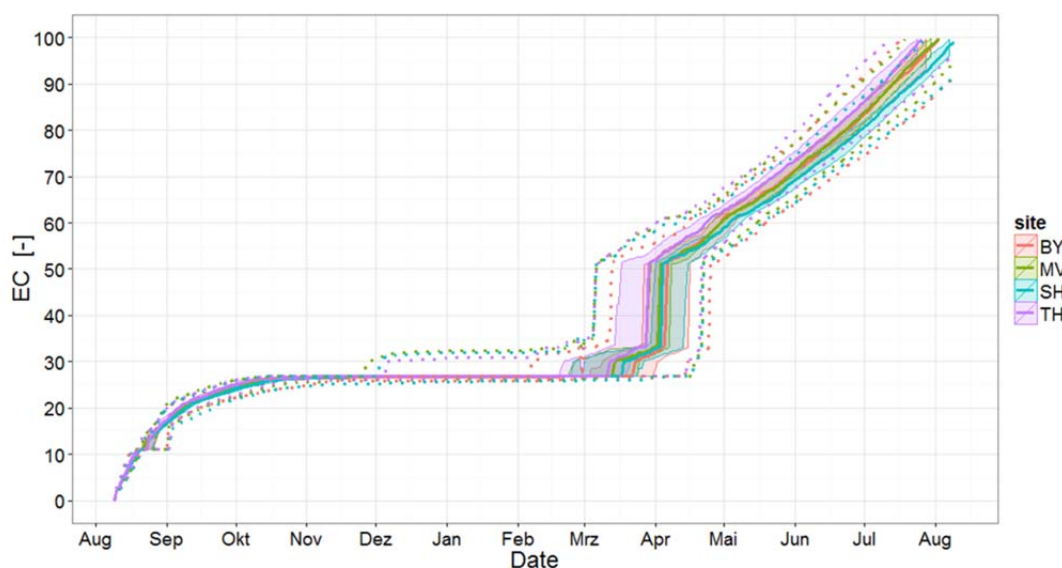
Die gute Abbildungsgüte für phänologische Entwicklung, Trockenmassebildung und -partitionierung, sowie N-Dynamik im Bestand ermöglicht die Auswertung von Szenarienanalysen, um Potenziale zur Erhöhung der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE), des Stickstoff-Harvest-Index (NHI) und des HI zu testen (Kapitel 8).

## 8. Modellanwendungen

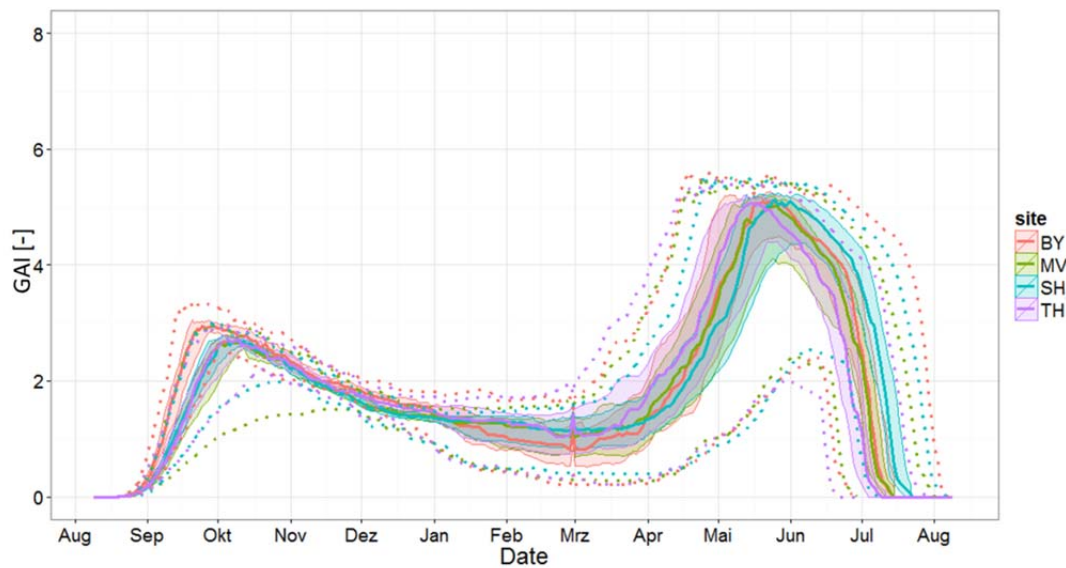
Das aktuell entwickelte Pflanzenwachstumsmodell in Kombination mit einem Phänologiemodell und einem Bodenwasserhaushaltsmodell kann für Standortvergleiche und Szenarienanalysen genutzt werden. In den folgenden Teilkapiteln werden langjährige Szenarien an einem oder mehreren ausgewählten Standorten vorgestellt. Zunächst werden Standortunterschiede dargestellt und danach werden verschiedene mögliche Modellanwendungen, die die Potenziale von Wintertraps zur Erhöhung der NUE, des NHI und des HI quantifizieren, präsentiert.

### 8.1. Phänologische Entwicklung und GAI im Standortvergleich

Das entwickelte Pflanzenwachstumsmodell kann genutzt werden, um Standortunterschiede z.B. in der Bestandesentwicklung zu quantifizieren und einzuordnen. In Abb. 18 und Abb. 19 sind langjährige Szenarien (1980-2010) der phänologischen Entwicklung und des Grün-Flächen-Index (GAI) an vier Standorten (BY: Bayern, MV: Mecklenburg-Vorpommern, SH: Schleswig-Holstein, TH: Thüringen) dargestellt. Dabei werden für jeden Datensatz Median, Interquartilsabstand, sowie Minimal- und Maximalwert wiedergegeben.



**Abb. 18:** Szenarienvläufe der phänologischen Entwicklung für die Jahre 1980-2010 an den Standorten Bayern (BY), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Schleswig-Holstein (SH), Thüringen (TH)

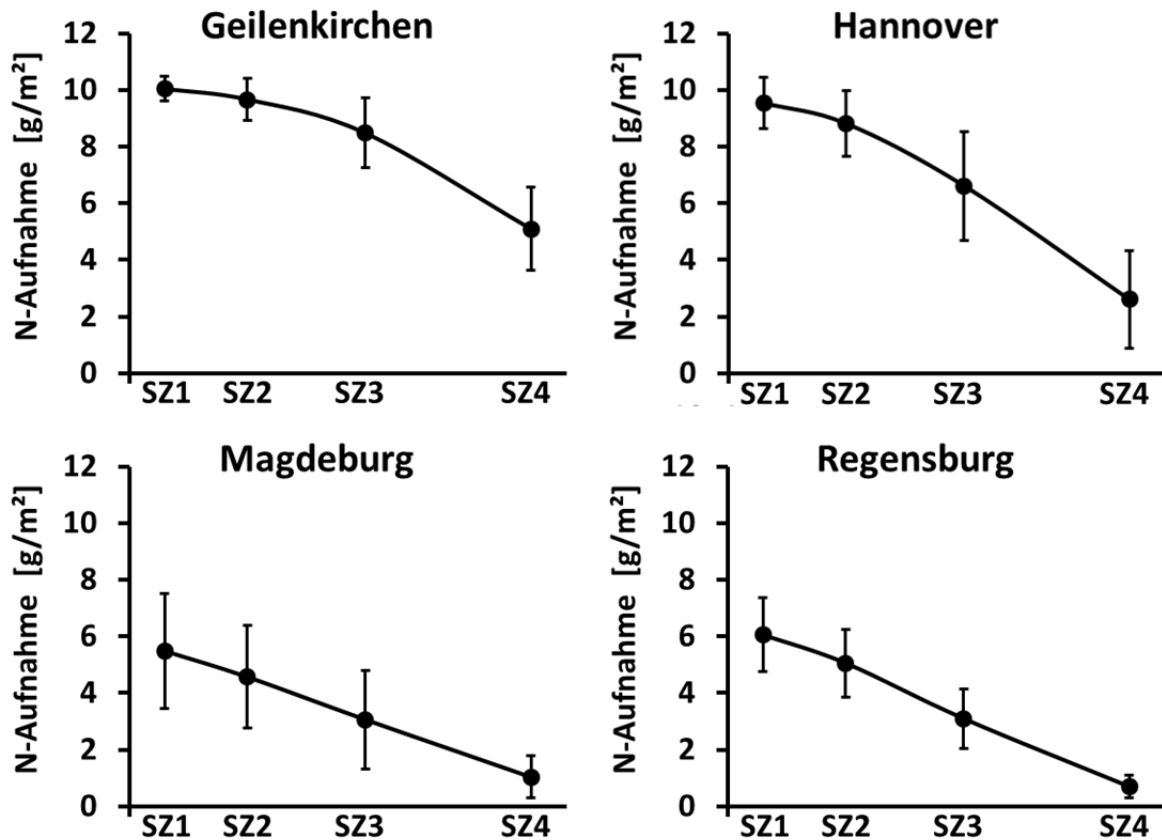


**Abb. 19:** Szenarienvläufe des Grün-Flächen-Index (GAI) für die Jahre 1980-2010 an den Standorten Bayern (BY), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Schleswig-Holstein (SH), Thüringen (TH)

Die Ergebnisse zeigen die hohe Variabilität und Standortspezifität der Winterrapsentwicklung. Die dargestellten Szenarien wurden mit gleichen Saatterminen für alle Standorte generiert. Um Standortvergleiche zu nutzen, um die Winterrapsentwicklung bestmöglich der Jahreswitterung, z.B. der einfallenden Strahlung, anzupassen, könnten Szenarien mit standortspezifischen Saatterminen durchgeführt werden.

## 8.2. N-Aufnahme vor Vegetationsende

Die N-Aufnahme bis Vegetationsende variiert zwischen verschiedenen Standorten und Jahren. Das liegt einerseits an den Bodeneigenschaften, andererseits aber auch an der von der Witterung beeinflussten Vorwinterentwicklung des Bestandes. Um das standortspezifische N-Aufnahmepotenzial vor Vegetationsende zu ermitteln, wurden langjährige Szenarien (1998-2010) an vier Standorten (Geilenkirchen, Hannover, Magdeburg, Regensburg) für vier Saattermine (15. Aug., 22. Aug., 01. Sep., 15. Sep.) durchgeführt (Abb. 20).



**Abb. 20:** Szenarien (1998-2010) der N-Aufnahme vor Vegetationsende an den Standorten Geilenkirchen, Hannover, Magdeburg und Regensburg für vier Saattermine (SZ1: 15. Aug., SZ2: 22. Aug., SZ3: 01. Sep., SZ4: 15. Sep.)

Die Szenarien zeigen eine hohe Variabilität des standortspezifischen N-Aufnahmepotenzials bis Vegetationsende. Während in Geilenkirchen und Hannover bei früher Aussaat und optimaler Vorwinterentwicklung bis zu 100 kg N/ha aufgenommen werden, liegt das Optimum in Magdeburg und Regensburg bei ca. 60 kg N/ha.

Die Abschätzung des N-Aufnahmepotenzials für verschiedene Saatzeiten an einem Standort kann genutzt werden, um den Saattermin zu optimieren, sodass der Nmin-Vorrat zur Aussaat bestmöglich ausgenutzt wird und das Risiko von N-Mangel in der Vorwinterentwicklung minimiert wird. Des Weiteren kann eine Abschätzung der N-Aufnahme für bestimmte Saattermine unter Berücksichtigung des Nmin im Boden zur Aussaat und der ungefähren Mineralisierung bis

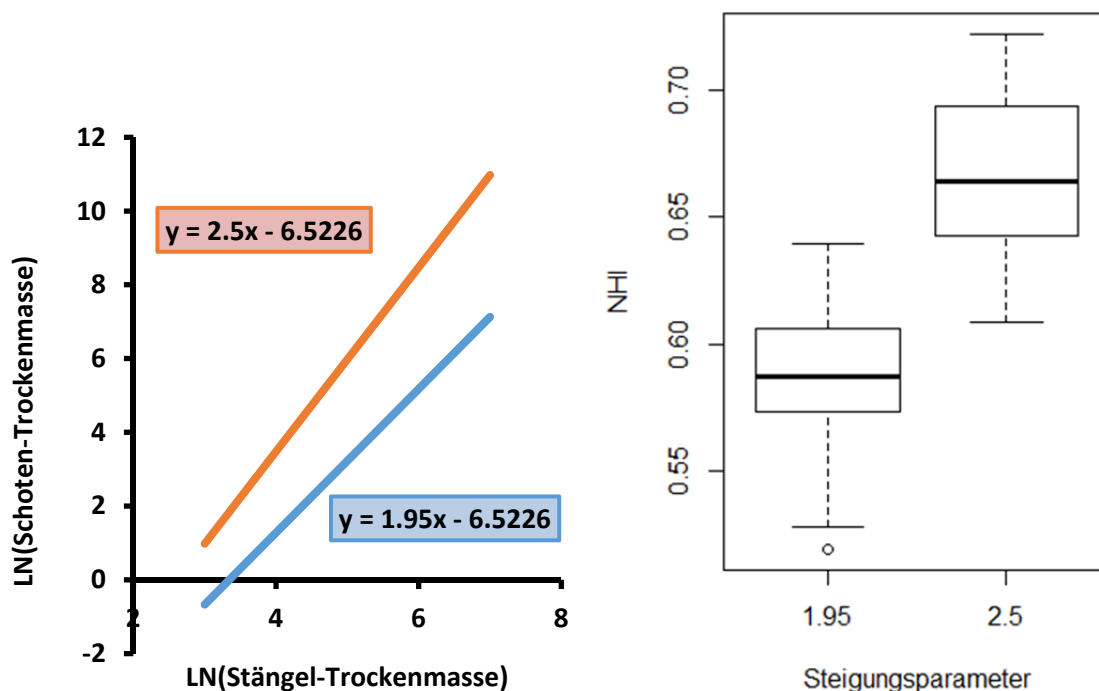
Vegetationsende als Entscheidungshilfe für oder gegen eine Herbst-N-Düngung des Bestandes dienen.

### 8.3. Allometrische Beziehungen des Blatt-, Stängel- und Schotenwachstums

Die allometrischen Beziehungen zwischen Blatt-, Stängel- und Schotenwachstum wurden auf Grundlage von mehreren unabhängigen Datensätzen nachgewiesen.

Eine Verschiebung der Wachstumsanteile könnte ein züchterischer Ansatz sein, um Sorten mit erhöhtem NHI bzw. HI zu selektieren.

In Abb. 21 ist für einen Standort in Thüringen ein Szenario mit erhöhtem Anteil an Schotenwachstum im Vergleich mit der im Modell implementierten Allometrie berechnet worden. Eine Erhöhung des Anteils von Schotenwachstum am Sprosswachstum führt dabei zu einer deutlichen Erhöhung des NHI.



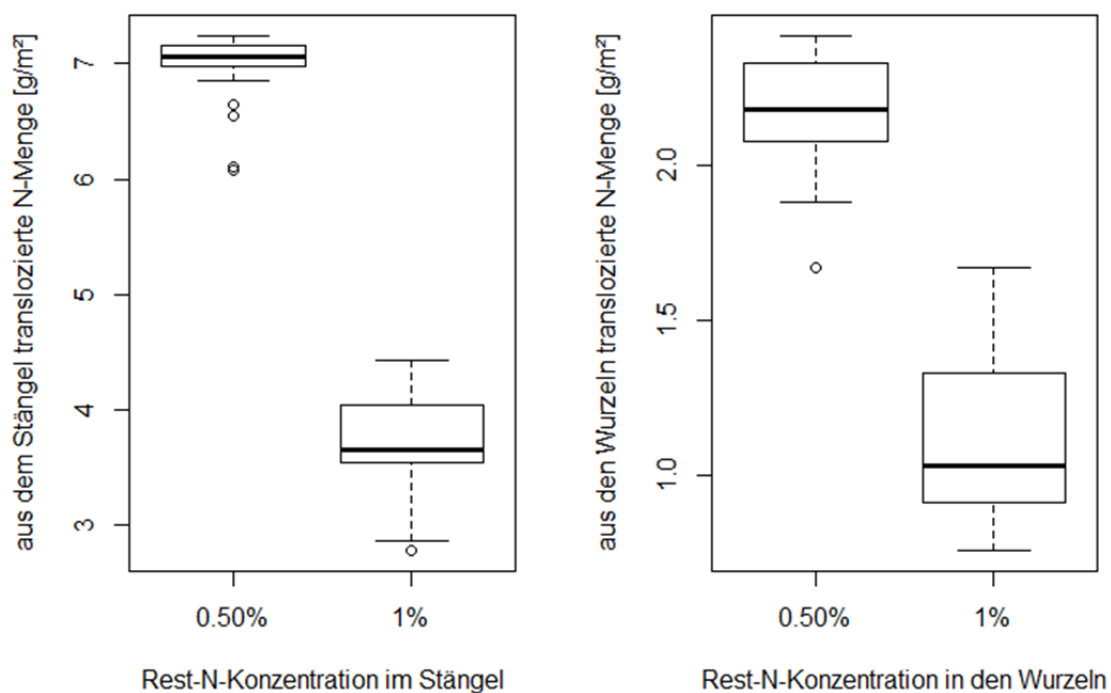
**Abb. 21:** a) Anpassung der allometrischen Beziehung zwischen Stängel- und Schotenwachstum (blau: im Modell implementierte Allometrie, rot: angepasste Allometrie mit erhöhtem Anteil an Schotenwachstum); b) NHI in Abhängigkeit zur gewählten Allometrie (Steigungsparameter = 1,95: im Modell implementierte Allometrie, Steigungsparameter = 2,5: angepasste Allometrie mit erhöhtem Anteil an Schotenwachstum)

Das daraus resultierende Potenzial zur Optimierung der N-Ausnutzung und einer eventuellen Erhöhung des HI muss jedoch unter Berücksichtigung einer möglicherweise auftretenden Reduktion der Standfestigkeit diskutiert werden.

#### 8.4. Rest-N-Menge in den Ernteresiduen

Eine auffällige Besonderheit bei Winterraps ist die hohe N-Menge in den Ernteresiduen. Eine Reduktion der Rest-N-Menge in Stängel und Wurzeln und eine Translokation der N-Menge in die Schoten könnte ein Ansatz zur Erhöhung der N-Verwertungseffizienz sein.

Ein langjähriges Szenario an einem Standort in Thüringen zeigt, dass durch eine Reduktion der N-Konzentration zur Ernte in Stängel und Wurzeln von 1% auf 0,5% eine zusätzliche N-Menge von 30-40 kg N/ha potenziell für die Translokation in die Schoten verfügbar wäre (Abb. 22).



**Abb. 22:** Translozierte N-Menge in Abhängigkeit von der Rest-N-Konzentration zur Ernte in a) Stängel und b) Wurzeln

Eine Reduktion der N-Menge in den Ernteresiduen zeigt damit ein großes Potenzial zur Erhöhung der NUE, jedoch muss in der Diskussion auch die Senkenkapazität der Schoten für N während der Samenfüllung berücksichtigt werden.

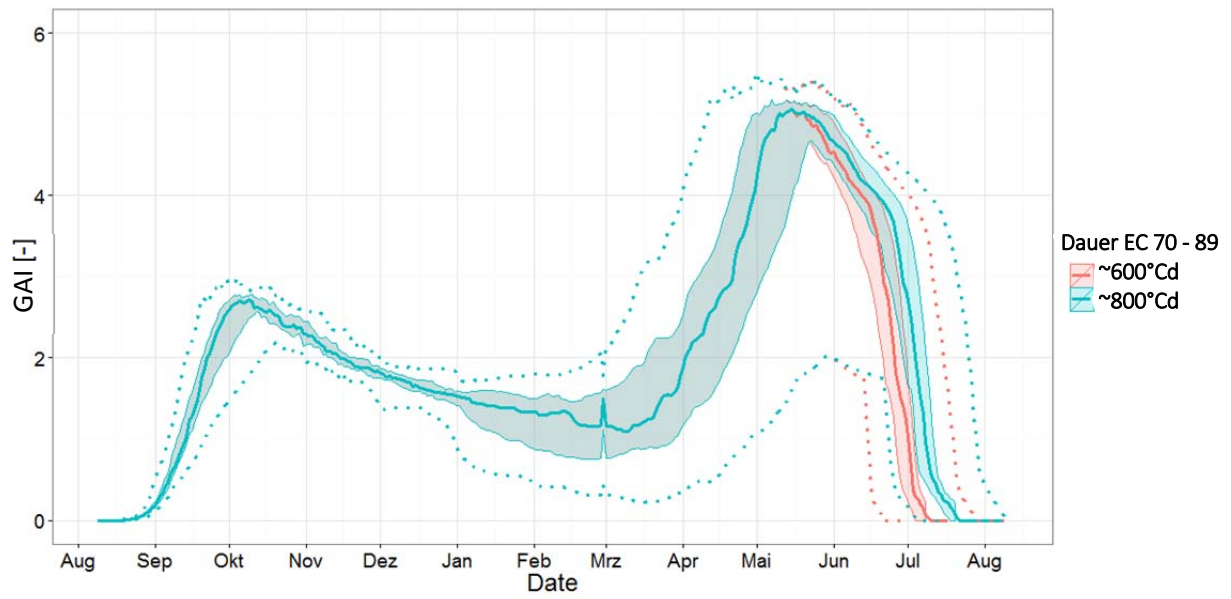
### 8.5. Verlängerung der Samenentwicklung

Die statistischen Auswertungen haben gezeigt, dass die Assimilatverfügbarkeit während der Schoten- und Samenentwicklung einen signifikanten Einfluss auf den Samenertrag hat. Die Assimilatverfügbarkeit wird dabei entscheidend durch die Phasendauer bestimmt, da die Entwicklungsrate auch Einfluss auf die Seneszenzprozesse in Blättern und Schoten hat. Zusätzlich zum Ertrag, erhöht sich auch der Ölgehalt mit verlängerter Samenentwicklung, v.a. bei verlängerter Samenfüllung.

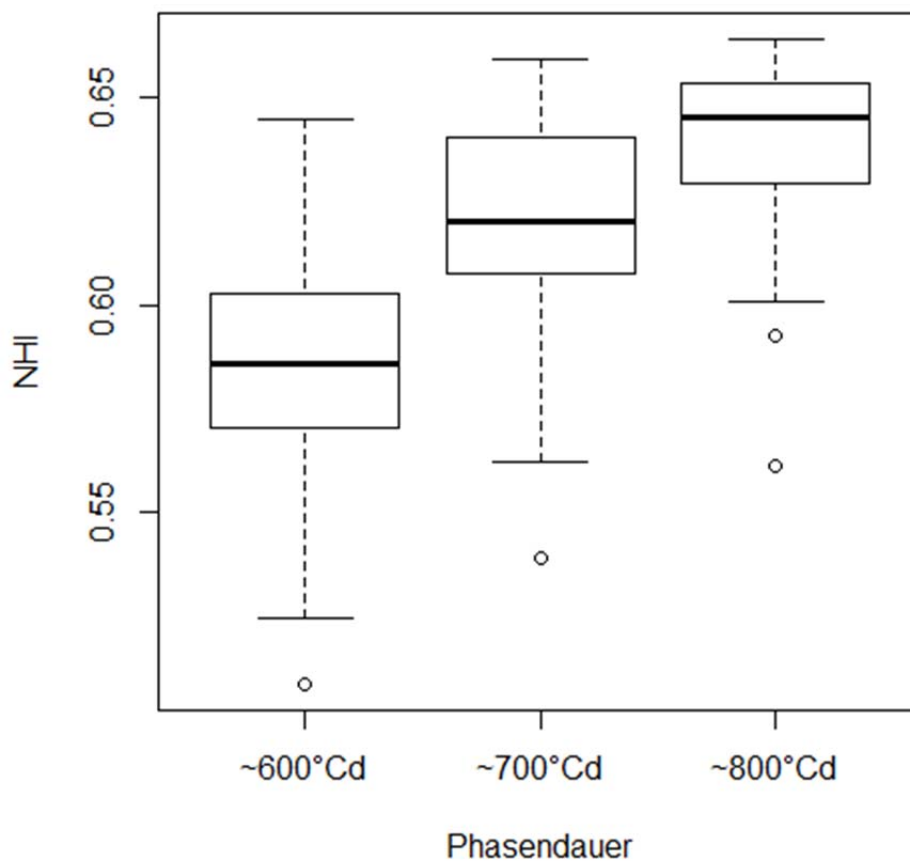
Im Phänologiemodell wird die Phasendauer der Schoten- und Samenentwicklung (EC 70-89) direkt über die Temperatursumme definiert. Dabei beträgt die Temperatursumme vom Ende der Blüte bis zur Reife ca. 600°Cd.

Szenarien, die eine Verlängerung der Samenentwicklung simulieren sind in Abb. 23 und Abb. 24 dargestellt. Abb. 23 zeigt den GAI-Verlauf an einem beliebigen Standort bei einer Erhöhung der Temperatursumme zum Erreichen der Reife von 600°Cd auf 800°Cd. Eine verzögerte Seneszenz und damit eine längere Aufrechterhaltung der photosynthetisch aktiven Fläche sind klar zu erkennen. Gleichzeitig verschiebt sich aber auch der Erntetermin nach hinten. Die verlängerte Samenentwicklung hat auch Einfluss auf den NHI, eventuell weil Seneszenzprozesse langsamer ablaufen und mehr Stickstoff in die Samen transloziert werden kann.





**Abb. 23:** GAI-Verläufe in Abhängigkeit von der Dauer der Samenentwicklung



**Abb. 24:** NHI in Abhängigkeit von der Dauer der Samenentwicklung

## 9. Fazit

Die modellgestützte Analyse der Klima-, Boden- und Managementeinflüsse auf die Ertragsbildung von Winterraps förderte das Verständnis physiologischer Prozesse und ertragslimitierender Einflussfaktoren in einem Winterrapsbestand.

Das entwickelte dynamische prozessorientierte Pflanzenwachstumsmodell zeigt eine gute Abbildungsgüte für Trockenmassebildung und -partitionierung, Blatt-, Stängel- und Schotenflächenwachstum, sowie N-Aufnahme und -verteilung. Das Modell ist sowohl für optimale, als auch für wasser- und N-limitierte Bedingungen parametrisiert worden.

Derzeitige Modellanwendungen liegen vor allem im Bereich der Quantifizierung von Potenzialen zur Erhöhung der NUE bzw. des NHI. Weiterhin können Szenarienanalysen mit angepassten physiologischen Prozessen oder Managementoptionen durchgeführt und ausgewertet werden. Mit Hilfe langjähriger Wetterdaten kann der Erwartungswert und Schwankungsbereich verschiedener Bestandesparameter unter optimalem Management abgeleitet werden. Diese könnten als „Benchmark“ genutzt werden um Schwachpunkte im Produktionssystem zu identifizieren.

## 10. Literatur

- Berry, P.M., Spink, J.H., 2006. A physiological analysis of oilseed rape yields: Past and future. *Journal of Agricultural Science* 144, 381–392.
- Blum, A., 1996. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation* 20, 135–148.
- Colnenne, C., Meynard, J.M., Reau, R., Justes, E., Merrien, A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany* 81, 311–317.
- Deligios, P.A., Farci, R., Sulas, L., Hoogenboom, G., Ledda, L., 2013. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: Model adaptation at a field scale. *Field Crops Research* 144, 100–112.
- Diepenbrock, W., Geisler, G., 1979. Compositional changes in developing pods and seeds of oilseed rape (*Brassica napus L.*) as affected by pod position on the plant. *Canadian Journal of Plant Science* 59, 819–830.
- Diepenbrock, W., Grosse, F., 1995. Rapeseed (*Brassica napus L.*) - Physiology. In: Diepenbrock, W., Becker, H.C. (Hrsg.). *Physiological potentials for yield improvement of annual oil and protein crops*. Advanced Plant Breeding. Suppl. Blackwell Wiss. Verlag, Berlin, Wien, 17, 21-53.
- Diepenbrock, W., 2000. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*): a review. *Field Crops Research* 67, 35–49.
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., Andersen, M.N., 1998. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Research* 57, 95–111.
- Gardner, B.R., Blad, B.L., Watts, D.G., 1981. Plant and air temperature in differentially-irrigated corn. *Agricultural Meteorology* 25, 207-217.
- Gomez, N.V., Miralles, D.J., 2011. Factors that modify early and late reproductive phases in oilseed rape (*Brassica napus L.*): its impact on seed yield and oil content. *Industrial Crops and Products* 34, 1277–1285.
- Habekotté, B., 1993. Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus L.*) under field conditions. *Field Crops Research* 35, 21–33.
- Habekotté, B., 1997. Description, parameterization and user guide of LINTUL-BRASNAP 1.1: a crop growth model of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*). DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility ; The C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen.
- Henke, J., Breustedt, G., Sieling, K., Kage, H., 2007. Impact of uncertainty on the optimum nitrogen fertilization rate and agronomic, ecological and economic factors in an oilseed rape based crop rotation. *Journal of Agricultural Science* 145, 455–468.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., Thelier-Huches, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74, 397–407.

- Lancashire, P.D., Bleiholder, H., Van den Boom, T., Langelüddeke, P., Stauß, R., Weber, E., Witzemberger, A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119, 561–601.
- Maes, W.H., Steppe, K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with groundbased thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* 63, 4671-4712.
- Mendham, N.J., Scott, R.K., 1975. The limiting effect of plant size at inflorescence initiation on subsequent growth and yield of oilseed rape (*Brassica napus*). *Journal of Agricultural Science* 84, 487–502.
- Mendham, N.J., Shipway, P.A., Scott, R.K., 1981. The effects of delayed sowing and weather on growth, development and yield of winter oil-seed rape (*Brassica napus*). *Journal of Agricultural Science* 96, 389-416.
- Petersen, C.T., Jorgensen, U., Svendsen, H., Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., 1995. Parameter assessment for simulation of biomass production and nitrogen uptake in winter rape. *European Journal of Agronomy* 4, 77–89.
- Salette, J., Lemaire, G., 1981. Sur la variation de la teneur en azote de graminees fourrageres pendant leur croissance; formulation d'une loi de dilution. *C.R. Acad. Sct., Paris* 292 (ser. III), 875-878.

## 11. Publikationen

<b>Titel:</b> Analysis of yield determining weather conditions at certain growth stages for winter oilseed rape
<b>Autoren:</b> W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage
<b>veröffentlicht:</b> 12 <sup>th</sup> Congress of the European Society of Agronomy, 2012, Helsinki, Finnland

<b>Titel:</b> Untersuchung ertragsbeeinflussender Witterungsbedingungen während kritischer Entwicklungsstadien von Winterraps
<b>Autoren:</b> W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage
<b>veröffentlicht:</b> Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 24, 2012, Berlin
<b>Abstract:</b> Die aufgenommene Strahlung während kritischer Entwicklungsstadien (GS) kann die Ertragsbildung von Winterraps erheblich beeinflussen. Strahlungssummen können dabei sowohl senken-, als auch quellen-limitierend wirken. In der vorliegenden Studie wurden Korrelationen zwischen dem maximalen Winterraps-Ertrag und den Strahlungssummen während verschiedener Entwicklungsstadien auf Grundlage eines Phänologie-Modells getestet. Der maximale Ertrag und die zugehörige N-Düngungsmenge wurden aus sechs N-Steigerungsversuchen (0-280 kg N ha <sup>-1</sup> ) mit quadratischen Funktionen geschätzt. Die Daten zeigten eine Korrelation zwischen dem maximalen Ertrag und der Strahlungssumme während der Blüte (GS 60-70, R <sup>2</sup> =0,21) und der Samenfüllung (GS 69-79, R <sup>2</sup> =0,24). Hohe Strahlungssummen während der Blüte können die Ertragsbildung durch gesteigerte Bestäubung und Samenanlage fördern. Demnach beeinflusst die aufgenommene Strahlung während der Blüte direkt die Anzahl der Samen pro m <sup>2</sup> und damit die Senkenkapazität von Winterraps. Dem gegenüber bestimmt die aufgenommene Strahlung während der Samenfüllung die Menge produzierter Assimilate durch die Photosynthese der Schotenwände und wirkt quellen-limitierend. Die ersten Ergebnisse zeigen einen Einfluss der aufgenommenen Strahlung während kritischer Entwicklungsphasen auf den Ertrag von Winterraps. Wechselwirkungen mit weiteren meteorologischen Parametern (z.B. Temperatur und Niederschlag), der Bodenbeschaffenheit und den produktionstechnischen Maßnahmen wurden bisher nicht berücksichtigt und sind Ansätze weiterer Untersuchungen.

<b>Titel:</b> Modellierung von N-Aufnahme, N-Verteilung und N-Translokation während der generativen Phase von Winterraps
<b>Autoren:</b> W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage
<b>veröffentlicht:</b> Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 25, 2013, Weihenstephan
<b>Abstract:</b> Winterraps weist, u.a. auf Grund einer unvollständigen N-Translokation in die Samen und einer frühen Ernte, eine geringe N-Effizienz auf.

In der Phase bis zur Blüte kann Winterraps große N-Mengen aufnehmen; die Blätter dienen dabei vorwiegend als N-Senken. Nach der Blüte sinkt die Aufnahme, jedoch wird N aus den Blättern, Stängeln, Wurzeln und Schotenwänden in die Samen transloziert. Die Translokation aus den Blättern ist vor deren Seneszenz nicht vollständig, sodass bis zu 20 kg N/ha (ca. 10% der üblichen Aufwandmenge) ungenutzt bleiben. Durch den mit der Blüte einsetzenden Blattverlust und die vergleichsweise hohe N-Menge in den Ernteresiduen besteht nach Winterraps ein hohes N-Auswaschungspotenzial.

Ziel des hier vorgestellten Projektes ist es, durch die Modellierung der N-Menge in den einzelnen Pflanzenfraktionen und der N-Translokation während der generativen Phase die N-Aufnahme und N-Effizienz bei unterschiedlichen Standortbedingungen (Wetter, Boden, Vorfrucht, N-Düngung) abzuschätzen, um daraus Rückschlüsse auf Möglichkeiten zur Optimierung des N-Managements bei Winterraps im Frühjahr ableiten zu können.

Die Simulation der N-Mengen basiert bei Stängeln, Wurzeln und Schoten auf exponentiellen Verdünnungsfunktionen, während die Blätter im Mittel eine konstante N-Konzentration während der generativen Phase aufweisen. Die N-Translokation aus den Blättern wird aus der N-Konzentration der abgeworfenen Blätter berechnet, die in Abhängigkeit von der Wachstumsphase zwischen 1% und 2,5% variiert.

**Titel:**

Einfluss von Witterungsbedingungen auf die Ertragsbildung von Winterraps

**Autoren:**

W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage

**veröffentlicht:**

Raps - Die Fachzeitschrift für Spezialisten

**Titel:**

Modelling n-dynamics of winter oilseed rape

**Autoren:**

W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage

**veröffentlicht:**

13<sup>th</sup> Congress of the European Society of Agronomy, 2014, Debrecen, Ungarn

**Titel:**

Modellierung der Bestandesentwicklung und Ertragsbildung von Winterraps

**Autoren:**

W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage

**veröffentlicht:**

Raps - Die Fachzeitschrift für Spezialisten

**Titel:**

Effects of weather conditions during different growth phases on yieldformation of winter oilseed rape

**Autoren:**

W. Weymann, U. Böttcher, K. Sieling, H. Kage

**veröffentlicht:**

Field Crops Research, 173 (2015), 41–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.01.002>

**Abstract:**

Winter oilseed rape (WOSR) is an important oil and protein crop in Europe, used in biofuel production

and as protein source in livestock farming. In contrast to cereals, WOSR seed yields are still increasing in most countries but yield stability was not improved during the last decades. In our study, we analyzed the effects of weather conditions during different growth stages on maximum seed yield, maximum oil yield, number of seeds per m<sup>2</sup> and 1000-seed weight to get further information on yield formation processes. Field trials performed at 34 environments (site × year combinations) representing different soil characteristics and climate regions in Germany were used for the analysis. About 40% of seed yield variability could be explained by weather conditions during specific growth phases. The most important phenological phases thereby were: onset of pods and seeds (BBCH 50–65) and seed development (BBCH 71–79). During onset of pods and seeds, yield was significantly influenced by temperature, radiation and drought stress. Assimilate availability during this phase determines the number of seeds per m<sup>2</sup> (sink size). After flowering, only temperature significantly affected WOSR yield. Temperature is the major parameter determining the duration of growth stages. Lower temperature elongates the time of assimilate production and translocation to the seeds. During this growth stage, seed weight is determined. In our data sets, low sink size was not yield limiting due to compensatory effects between the yield components number of seeds per m<sup>2</sup> and 1000-seed weight. Yield response pattern suggests that WOSR yield is predominantly source-limited, especially during the late reproductive phase.

**Titel:**

Model-based analysis of potentials to increase nitrogen use efficiency of winter oilseed rape

**Autoren:**

W. Weymann, U. Böttcher, H. Kage

**veröffentlicht:**

14<sup>th</sup> International Rapeseed Congress, 2015, Saskatoon, Kanada



Herausgeber:

UNION ZUR FÖRDERUNG VON  
OEL- UND PROTEINPFLANZEN E.V. (UFOP)

Claire-Waldoff-Straße 7 · 10117 Berlin

info@ufop.de · www.ufop.de