

Einfluß der Wasser- und Stickstoffversorgung auf Ertrags- und Qualitätsparameter von Krambe (*Crambe abyssinica* Hochst. ex. R. E. Fries)

Effect of Water and Nitrogen on Yield and Quality Parameters of Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst. ex. R. E. Fries)

Katrin Jakob, A. Bramm & N. Ochrimenko

Institut für Pflanzenbau, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Zusammenfassung

Die Sommerölfrucht Krambe ist aufgrund ihres Erucasäuregehaltes von >60% im Samenöl ein für die oleochemische Industrie interessanter Rohstoff und gilt im Vergleich des Wasser- und Nährstoffbedarfes. Zur Untersuchung dieser These wurde in einem dreijährigen Gefäßversuch (1994–1996) der Einfluß vier verschiedener Stickstoffstufen in Kombination mit hoher bzw. geringer Wasserverfügbarkeit vor und nach der Blüte auf Wachstum, Ertrag und Qualität des Krambegenotypes BGRC 30347 ermittelt. Mit einer speziellen Anlage zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Vegetationsgefäßen wurde die Wasserverfügbarkeit differenziert gesteuert und der wöchentliche Wasserverbrauch der Krambe (1 Pflanze je Gefäß) gemessen.

Der Einzelpflanzenkornenertrag stieg in der höchsten Düngungs- und Wasserversorgungsstufe gegenüber der Kontrollvariante (ohne Stickstoff, geringste Wasserzufuhr) auf über 700%. Die Krambepflanze kompensierte begrenzte Wasserverfügbarkeit vor der Blüte und erreichte gleiche Erucasäureerträge wie bei kontinuierlicher Wasserversorgung über die gesamte Vegetationszeit, jedoch bei signifikant höherem Wasserverbrauch nach der Blüte. Die Anzahl Triebe je Pflanze korrelierte positiv mit dem Wasserverbrauch vor der Blüte. Die Schotenzahl war signifikant positiv mit dem Wasserverbrauch nach der Blüte korreliert. Öl- und Erucasäuregehalt erreichten im Versuchsmittel 36,7% i. d. TM bzw. 60,5% am Gesamtölgehalt. Wassermangel nach der Blüte senkte den Ölgehalt mit steigender Stickstoffdüngung, bei ausreichendem Wasserangebot in dieser Entwicklungsphase jedoch nicht. Der Erucasäuregehalt verringerte sich mit zunehmendem Stickstoffangebot. Der Wasserverbrauch erhöhte sich mit steigender Stickstoffdüngung, während der Transpirationskoeffizient abnahm. Die Umsetzung einer hohen Stickstoffdüngung in Kornmehrtrag war primär abhängig von der Wasserverfügbarkeit. Ein hohes Wasserangebot ab Blüte führte zu einem Ertragsanstieg, verlängerte aber deutlich die Vegetationszeit.

Schlüsselworte: Krambe-Ertragskomponenten, Ölgehalt, Erucasäuregehalt, Wasserverbrauch, Stickstoff

Summary

Compared to all other plants grown in Europe, crambe, an annual summer oil plant, has the naturally highest erucic acid content of over 60% in the seed oil, which can be used as a raw material for numerous industrial products. The influence of four nitrogen treatments in combination with high and low water availability on growth, yield and quality parameters of the crambe genotype BGRC 30347 was investigated in a three year pot experiment. The experiment was realised with a special system for continuous supply of water to greenhouse pots.

Single crambe plant yield increased to about 700% at the highest water and nitrogen level compared to the control without nitrogen under dry growing conditions. Crambe was able to compensate limited water availability before flowering. However, these plants showed a significant higher water consumption after flowering to produce the same erucic acid yield as the plants with continuing water supply during the whole vegetation period. There was a positive correlation between the number of tiller per plant and water consumption before flowering. The number of pods per plant was significantly positive correlated with water consumption after flowering. The mean oil and erucic acid content of the experiment was 36,7% of the dry matter and 60,5% of the oil content, respectively. Water deficiency after flowering reduced the oil content with increasing nitrogen supply. Sufficient water at this time did not depress the oil content. The erucic acid content was negatively influenced by higher nitrogen supply. Water consumption increased with higher nitrogen fertilisation, but crambe plant transpiration ratio decreased. The efficient use of high nitrogen input mainly depended on the water availability, but led to a delay of ripeness.

Keywords: crambe yield parameter, oil content, erucic acid content, water consumption, nitrogen

Einleitung

Krambe (*Crambe abyssinica* Hochst. ex. R. E. Fries) ist eine annuelle Ölpflanze aus der Familie der *Brassicaceae*. Aus zurückliegenden und aktuellen Untersuchungen an Krambe ist bekannt, daß sich die Pflanze durch eine gute

Trockentoleranz und den höchsten natürlichen Erucasäuregehalt der bisher genutzten Ölpflanzen auszeichnet (SCHUSTER 1992). Erucasäurehaltiges Pflanzenöl wird von der oleo-chemischen Industrie in einem Umfang von ca. 28000 t jährlich in Deutschland nachgefragt (FOCHEM 1996) und als Rohstoff für verschiedene Anwendungen, z. B. als Weichmacher in Kunststoffen, Gleitmittel bei der PVC-Herstellung, zur Oberflächenbeschichtung in der Papierindustrie, als Additiv in der Schmierstoffindustrie, für die Herstellung von Lacken und Pharmazeutika u. a. eingesetzt (BML 1995).

Erucaraps ist derzeit in Europa Hauptrohstofflieferant für Erucasäure, weist jedoch einen geringeren Erucasäuregehalt als Krambe auf und besitzt für eine angemessene Ertragsleistung hohe Ansprüche an die Nährstoffversorgung und die Standortfaktoren Boden, Wasser und Luftfeuchtigkeit (SPERBER et al. 1988). Das Erreichen der Qualitätsanforderungen an das Öl kann für den Erucaraps bei einer möglichen Kreuzung mit 00-Raps sowie bei Durchwuchs problematisch werden. Die intensive züchterische Bearbeitung des Erucaraps zur Erhöhung des Erucasäuregehaltes zeigt mit der Erzeugung von Trierucin-Raps-Genotypen erste Erfolge, Erucasäuregehalte von 70–80% wurden bisher jedoch nicht erreicht (FRAUEN 1997). In Krambeevaluierungsversuchen erzielten verschiedene Genotypen Kornerträge von über 20 dt ha⁻¹ bei Erucasäuregehalten von 59–61% im Öl (BRAMM 1995). In Feldversuchen auf leichten Standorten in Mecklenburg-Vorpommern wurde nachgewiesen, daß Krambe bei gleicher Ertragsleistung eine höhere N-Effizienz aufweist als Sommer- und Winterraps (KLAUS & MAKOWSKI 1996). Krambe erreichte auf diesen Standorten Kornerträge zwischen 14 und 33 dt ha⁻¹ und eröffnet damit die Option als alternative Erucasäurequelle zu Raps auf entsprechenden Standorten.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen in einem mehrjährigen Gefäßversuch war es, primär die Auswirkungen differenzierter Wasserverfügbarkeit vor und nach der Blüte auf das Wachstum der Krambe, den Kornertrag und die Sameninhaltsstoffe zu prüfen. Als zweiter Versuchsfaktor wurde die Stickstoffversorgung gewählt, um Informationen über die Wechselwirkungen zwischen Nährstoff- und Wasserangebot zu erhalten.

Material und Methoden

Der Versuch wurde im Phytosolarium des Instituts für Pflanzenbau in den Jahren 1994–1996 durchgeführt. Die Mitscherlichgefäße (V = 5 l) wurden mit einem Löß-Lehm mit hohem Schluffanteil gefüllt (Tab. 1), in den der Grund- sowie der Stickstoffdünger je nach Versuchsvariante in einer Menge von 1, 2 und 3 g N pro Gefäß eingearbeitet worden waren. Die Gefäße der Stickstoffstufen N0 erhielten nur die Grunddüngung. Der lehmige Schluff garantiert den notwendigen Kontakt zwischen Boden und keramischer Kerze. Ein Sandboden ist für diese Methodik nicht geeignet. Das Bodenporenvolumen wurde auf 45 Vol.% eingestellt. Der Krambegenotyp BGRC 30347 wurde in

Tab. 1: Nährstoffgehalte des Versuchsbodens (mg 100 g⁻¹ Boden)

	Nutrient content of the experimental soil (mg 100 g ⁻¹ soil)				
	Gesamt-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	pH-Wert (CaCl ₂)
1994	0,88	30,2	11,4	3,7	6,7
1995	nicht bestimmt	20,8	8,7	4,5	6,8
1996	0,58	33,2	11,7	3,5	7,0

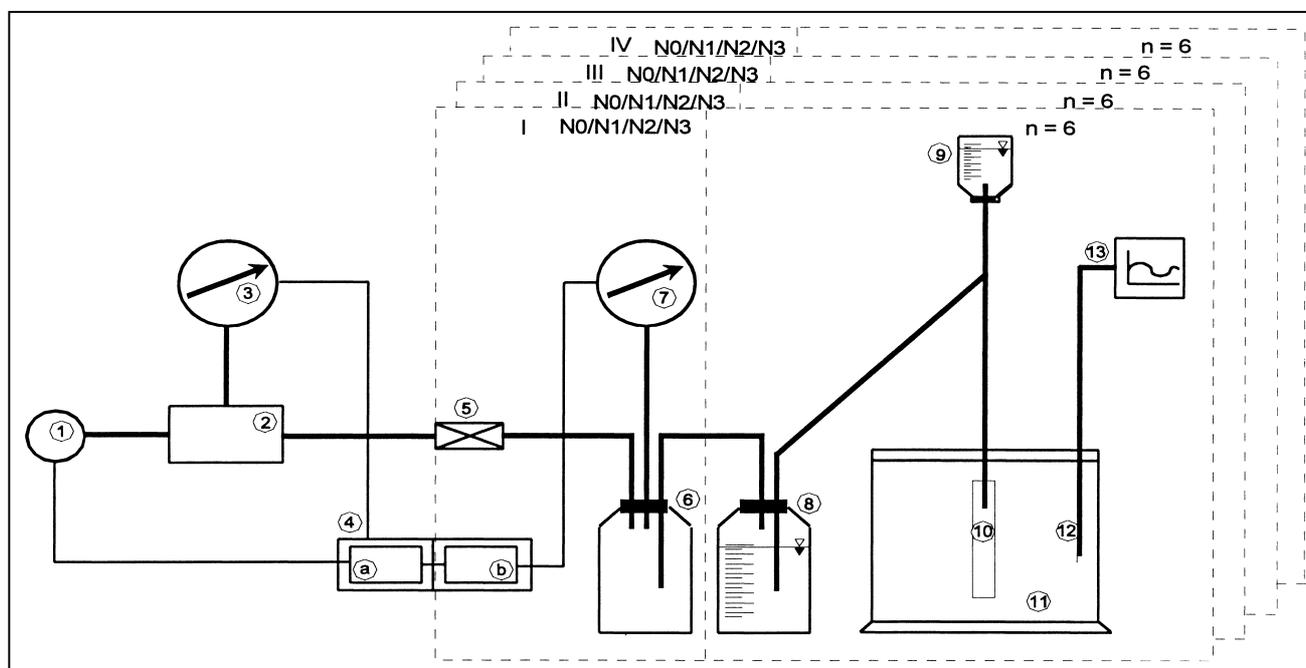


Abb. 1: Anlage zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Vegetationsgefäßen (SOMMER 1978)

1 Vakuumpumpe; 2,6 Unterdruckbehälter; 3,7 Manometer mit Grenzwertschalter; 4a Regelverstärker für 2; 4b Regelverstärker der Einheiten I–IV; 5 Elektromagnetventil; 8 Vorratsflasche; 9 Luftsammlflasche; 10 keramische Kerze; 11 Vegetationsgefäß; 12 Tensiometer; 13 Tensiograph; I–IV Varianten der Wasserversorgung; N0–N3 Düngungsvarianten; n = 6 Wiederholungen;

System for continuous supply of water greenhouse pots (SOMMER 1978)

1 vacuum pump; 2,6 vacuum-air container; 3,7 manometer with regulator switch; 4a control amplifier for 2; 4b control amplifier for units I–IV; 5 electromagnetic valve; 8 supply flask; 9 air-collecting flask; 10 ceramic cell; 11 pot with soil; 12 tensiometer; 13 tensiograph; I–IV water supply treatments; N0–N3 nitrogen treatments; n = 6 replications

Keimschalen ausgesät und 2 Wochen nach der Keimung in die Versuchsgefäße (1 Pflanze pro Gefäß) pikiert. Zur Verminderung der Evaporationsverluste wurde die Gefäßoberfläche mit einer 2 cm dicken Kieselsteinschicht abgedeckt.

Die Steuerung der Wasserzufuhr erfolgte über eine spezielle Anlage zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Gefäßen auf der Grundlage des Bodenwasserpotentials (Abb. 1) nach der Methode von SOMMER (1978). In den Boden eines jeden Versuchsgefäßes wurde senkrecht eine keramische Kerze (d = 4 cm, h = 15,5 cm) installiert, an die über mit Wasser gefüllte PVC-Schläuche ein dem Wasserversorgungsgrad entsprechender Unterdruck angelegt war. Es wurde mit 2 Bodenwasserpotentialen gearbeitet:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= -600 \text{ hPa} \cong \text{trocken} \\ \psi_2 &= -60 \text{ hPa} \cong \text{feucht} \end{aligned}$$

Das Bodenwasserpotential ψ_1 ist die versuchstechnisch maximal einstellbare Trockenvariante und bedeutet für die Pflanzen im Gefäßversuch relativ trockene Bedingungen. Im Feld tritt bei diesem Bodenwasserpotential im allgemeinen noch kein Wassermangel auf. Das Bodenwasserpotential ψ_2 entspricht sehr feuchten Bedingungen. Der Versuchsfaktor Wasser wurde wie folgt variiert:

- I trocken ψ_1 (t)
- II trocken-feucht ψ_1/ψ_2 (tf)
- III feucht-trocken ψ_2/ψ_1 (ft)
- IV feucht ψ_2 (f)

Die Wechselvarianten wurden eingerichtet, um die Reaktion der Krambe auf unterschiedliche Wasserversorgung in der vegetativen und generativen Phase zu ermitteln. Die Umstellung der Wechselvarianten erfolgte mit dem Blühbeginn. Pro Variante wurden 6 Wiederholungen angelegt, so daß für einen Versuchsdurchgang 96 Gefäße zur Verfügung standen. Die Tag-/Nachttemperaturen waren auf 20/15 °C eingestellt. Die Versuche wurden ohne Zusatzbeleuchtung ab Ende März bzw. Anfang April durchgeführt.

Die Pflanzenparameter Triebe, Schoten und Wuchshöhe wurden durch Zählung bzw. Längenmessung ermittelt. Die Trockenmasse wurde getrennt nach Stroh und Samen durch Trocknung bei 105 °C (48 h) bestimmt. Die Analyse des Ölgehaltes der ganzen Krambesamen mit Fruchtschale erfolgte durch Messung der kernmagnetischen Resonanz nach der Methode von Madsen (Oxford 4000 NMR Analyser). Der Erucasäuregehalt wurde gaschromatographisch an den gemahlene Samen bestimmt (HP 5890).

Die statistische Verrechnung der Werte erfolgte mit dem Statistikprogramm SAS. Mittelwertvergleiche zur Prüfung der Haupteffekte und Interaktionen wurden mit dem Duncan-Test durchgeführt, wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von P = 0,05 zugrunde lag.

Ergebnisse

Wachstum und Ertragskomponenten

Die Stickstoffdüngung verlängerte die Gesamtvegetationszeit der Krambe von der Pflanzung bis zur Ernte im Mittel der Wasserstufen um 18 Tage zwischen den Düngungsstufen ohne Düngung (128 Tage) und den mit Stickstoff versorgten Varianten (146 Tage). In der Vegetationsdauer der Pflanzen der Stickstoffstufen N1, N2 und N3 bestanden keine relevanten Unterschiede (143, 146 bzw. 145 Tage). Der Blühbeginn bei höchster Stickstoffversorgung (N3) setzte gleichzeitig bzw. früher ein als in N2 und N1. Eine hohe Wasserversorgung nach der Blüte bei begrenzter Wasserverfügbarkeit vor der Blüte (tf) führte zu einer Verlängerung der Reifezeit um 14 Tage gegenüber den anderen Wasserstufen, auch gegenüber der Wasserstufe feucht.

Die Varianztabelle vermittelt einen Überblick über den Einfluß der Versuchsfaktoren sowie ihrer Wechselwirkungen auf die Ertragskomponenten der Krambepflanzen für den Gesamtversuch (Tab. 2). Wasser und Stickstoff beeinflussten alle Ertragskomponenten signifikant, lediglich zwischen dem Stickstoff und dem Ölgehalt war kein Einfluß festzustellen. Die Interaktion von Wasser- und Stickstoff beeinflusste außer dem Erucasäuregehalt ebenfalls alle Ertragskomponenten signifikant. Obwohl die einzelnen Ertragskomponenten der Pflanzen bis auf die TKM in den Jahren signifikant verschieden waren, bestand für die Zielgrößen Öl- und Erucasäureertrag kein Jahreseinfluß. Die Summe der Ertragskomponenten des geprüften Genotyps erwies sich folglich als relativ stabil. In den Versuchsvarianten realisierte die Krambepflanze in den verschiedenen Jahren immer ein ähnliches Leistungsniveau trotz Abweichung der Werte für die einzelnen Ertragskomponenten wie Anzahl Triebe und Schoten oder Kornertrag.

Die Wuchshöhe (Tab. 3) verringerte sich mit steigender N-Düngung im Mittel der Wasserstufen. Dagegen bewirkte die Wasserverfügbarkeit in den Wasserstufen trocken-feucht, feucht-trocken und feucht eine signifikante Zunahme der Wuchshöhe gegenüber ‚trocken‘, im Mittel zwischen 40 und 50 cm. Die maximale Höhe erreichte die Krambepflanze in der Variante feucht N0 (Tab. 3).

Tab. 2: Varianzanalyse für ausgewählte Ertragsmerkmale der Krambe

Test of significance in analyses of variance for selected crambe yield characters

Einflußfaktor	Abhängige Variable										
	Korn-TM	TKM	Schotenanzahl	Harvest-Index	Ölgehalt	Erucasäuregehalt	Protein-gehalt	Öl-ertrag	Erucasäure-ertrag	Wasser-verbrauch	TK ¹⁾
Jahr	***	n. s.	***	***	***	*	***	n. s.	n. s.	*	***
Wasser	***	***	***	***	***	**	***	***	***	***	***
N	***	***	***	***	n. s.	**	***	***	***	***	***
Jahr × Wasser	**	***	***	***	***	*	***	***	***	***	***
Jahr × N	**	n. s.	n. s.	***	n. s.	n. s.	**	n. s.	n. s.	n. s.	*
Wasser × N	***	***	***	*	***	n. s.	***	***	***	***	*
c. v. (%)	26,2	18,3	25,1	9,2	6,0	1,5	7,3	24,4	24,6	22,8	9,2

* signifikant für p < 0,05
 ** signifikant für p < 0,01
 *** signifikant für p < 0,001

c. v. Variationskoeffizient
 n. s. nicht signifikant
¹⁾ Transpirationskoeffizient

Tab. 3: Ertragskomponenten der Krambepflanzen in Abhängigkeit von der Wasser- und Stickstoffversorgung (Mittel 1994–1996)

Crambe yield parameters as influenced by water and nitrogen supply (mean 1994–1996)

Variante	Wuchshöhe (cm)	Triebe (Anzahl Pfl. ⁻¹)	Schoten (Anzahl Pfl. ⁻¹)	Stroh-TM (g Pfl. ⁻¹)	Korn-TM (g Pfl. ⁻¹)	Harvest-Index (%)	TKM (g)	Erucasäureertrag (g Pfl. ⁻¹)
Interaktion								
trocken								
N0	118 h*)	19,3 g	577 i	7,4 h	4,7 j	0,40 ef	8,7 de	1,0 j
N1	113 i	21,4 f	673 ij	13,4 g	8,3 i	0,41 ef	13,9 a	1,7 i
N2	107 i	21,1 fg	927 hij	14,5 g	10,0 hi	0,44 cde	11,9 b	2,1 ghi
N3	99 j	19,5 fg	983 hi	12,8 g	10,0 hi	0,47 bcd	11,9 b	2,0 hi
trocken-feucht								
N0	148 de	24,0 e	1070 h	12,5 g	11,6 h	0,49 abc	11,5 b	2,7 fgh
N1	158 bc	26,4 d	2644 cd	25,4 e	27,4 d	0,52 a	11,1 bc	6,4 c
N2	147 de	25,3 ed	2874 bc	30,3 bc	30,6 c	0,50 ab	11,9 b	7,1 b
N3	142 ef	24,5 e	3432 a	34,4 a	35,7 a	0,51 a	11,4 b	8,2 a
feucht-trocken								
N0	163 ab	32,3 bc	1528 fg	18,7 f	10,6 hi	0,37 f	7,4 e	2,3 ghi
N1	148 de	33,9 ab	1870 ef	26,3 ed	15,0 fg	0,38 f	9,8 cd	3,3 ef
N2	135 fg	34,1 ab	1988 e	25,1 e	17,0 ef	0,41 ef	9,5 d	3,6 de
N3	131 g	34,3 a	2348 d	25,7 ed	19,4 e	0,44 de	9,2 d	4,0 d
feucht								
N0	167 a	30,7 c	1460 g	20,7 f	12,5 gh	0,38 f	9,4 d	2,7 fg
N1	163 ab	34,2 ab	3056 b	29,6 dc	26,4 d	0,48 abcd	9,3 d	6,4 c
N2	152 dc	33,1 ab	3577 a	33,8 ab	32,4 bc	0,49 ab	9,4 d	7,8 a
N3	143 ef	32,7 ab	3536 a	33,3 abc	33,7 ab	0,51 ab	9,9 cd	7,9 a
GD 5%	8	1,9	355	4,0	2,6	0,05	1,4	0,7
Hauptwirkung								
N0	149 a	27,8 b	1159 d	14,8 c	9,9 d	0,41 c	9,3 b	2,2 d
N1	146 a	30,4 a	2061 c	23,6 b	19,3 c	0,45 b	11,1 a	4,5 c
N2	135 b	29,7 a	2329 b	25,8 a	22,4 b	0,46 ab	10,7 a	5,1 b
N3	129 c	28,3 b	2564 a	26,4 a	24,7 a	0,48 a	10,6 a	5,5 a
trocken	109 c	21,6 d	790 d	12,0 c	8,3 c	0,43 c	11,6 a	1,7 c
trocken-feucht	149 b	25,7 c	2505 b	25,6 b	26,3 a	0,51 a	11,5 a	6,1 a
feucht-trocken	145 b	35,3 a	1927 c	23,9 b	15,4 b	0,40 d	9,0 b	3,3 b
feucht	157 a	33,7 b	2889 a	29,2 a	26,1 a	0,46 b	9,5 b	6,2 a
GD 5%	5	1,3	217	2,1	1,6	0,26	0,8	0,4

*) Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Signifikanzen getrennt nach Interaktion und Hauptwirkungen
 Means with the same letter are not significantly different, separated by interaction and main effect

Die Anzahl Triebe je Pflanze stieg im Mittel der Wasserstufen durch die N-Düngung signifikant bis N2, fiel aber in der höchsten Düngungsstufe auf das Niveau der Variante ohne N-Düngung zurück. Die Wirkung der Wasserversorgung auf die Triebzahl war wesentlich deutlicher ausgeprägt. Sowohl in den Varianten mit kontinuierlicher (f) als auch mit zeitlich begrenzter (tf, ft) hoher Wasserverfügbarkeit stieg die Triebzahl je Pflanze im Mittel signifikant gegenüber der Stufe trocken an. Bei ausreichender Wasserversorgung vor der Blüte (f, ft) entwickelte die Krambeinzelpflanze bis zu 10 Triebe mehr als die Pflanzen der Varianten mit trockenen Bedingungen in diesem Vegetationsabschnitt. Die Stickstoffdüngung führte in jeder Wasserversorgungsstufe zu einer Erhöhung der Anzahl Triebe je Pflanze von der Stufe N0 zu N1 (Tab. 3). Eine weitere Stickstoffzufuhr bewirkte keine signifikante Zunahme der Triebzahl. In der höchsten Düngungsstufe verringerte sich die Triebzahl in den Wasserstufen trocken und trocken-feucht nahezu auf das Niveau der Varianten ohne Stickstoffzufuhr. In der Stufe feucht verringerte sich die Triebzahl ebenfalls, lag jedoch noch über der Triebzahl der Kontrollvariante. In der Wasserstufe feucht-trocken blieb die Anzahl der Triebe in den Düngungsstufen N1, N2 und N3 konstant.

Die Anzahl Schoten je Pflanze wurde durch die Stickstoffdüngung wesentlich stärker positiv beeinflusst als die Anzahl Triebe je Pflanze. Die Schotenanzahl stieg signifikant von N0 bis N3 an (Tab. 3). Die Wasserversorgung zeigte ebenfalls einen positiven Einfluß auf die Schotenanzahl, wobei die Wasserverfügbarkeit nach der Blüte entscheidend war für eine hohe Schotenanzahl. Im Mittel der Düngungsstufen nahm die Schotenanzahl je Pflanze von 790 in der Wasserstufe trocken signifikant über feucht-trocken und trocken-feucht auf 2889 Schoten je Pflanze in der Stufe feucht zu. Die maximale Schotenanzahl bildete die Pflanze in feucht N2. In der höchsten Düngungsstufe fiel die Schotenanzahl gegenüber N2 in der Variante feucht, während in allen anderen Wasserversorgungsstufen die Schotenanzahl kontinuierlich bis N3 anstieg. In der Wasserstufe trocken waren die Differenzen zwischen den mit Stickstoff gedüngten Varianten nicht signifikant.

Der Korn-Trockenmasseertrag der Krambepflanzen variierte in den 3 Versuchsjahren zwischen 3,6 und 39,4 g Pflanze⁻¹ (Tab. 3). Bei Trockenheit über die gesamte Vegetationsperiode lag der Korn-Trockenmasseertrag im Mittel über die Düngungsstufen zwischen 6,5 und 9,2 g Pflanze⁻¹. Dagegen erreichte die Einzelpflanze bei ausreichender Wasserverfügbarkeit einen dreifach höheren Korn-

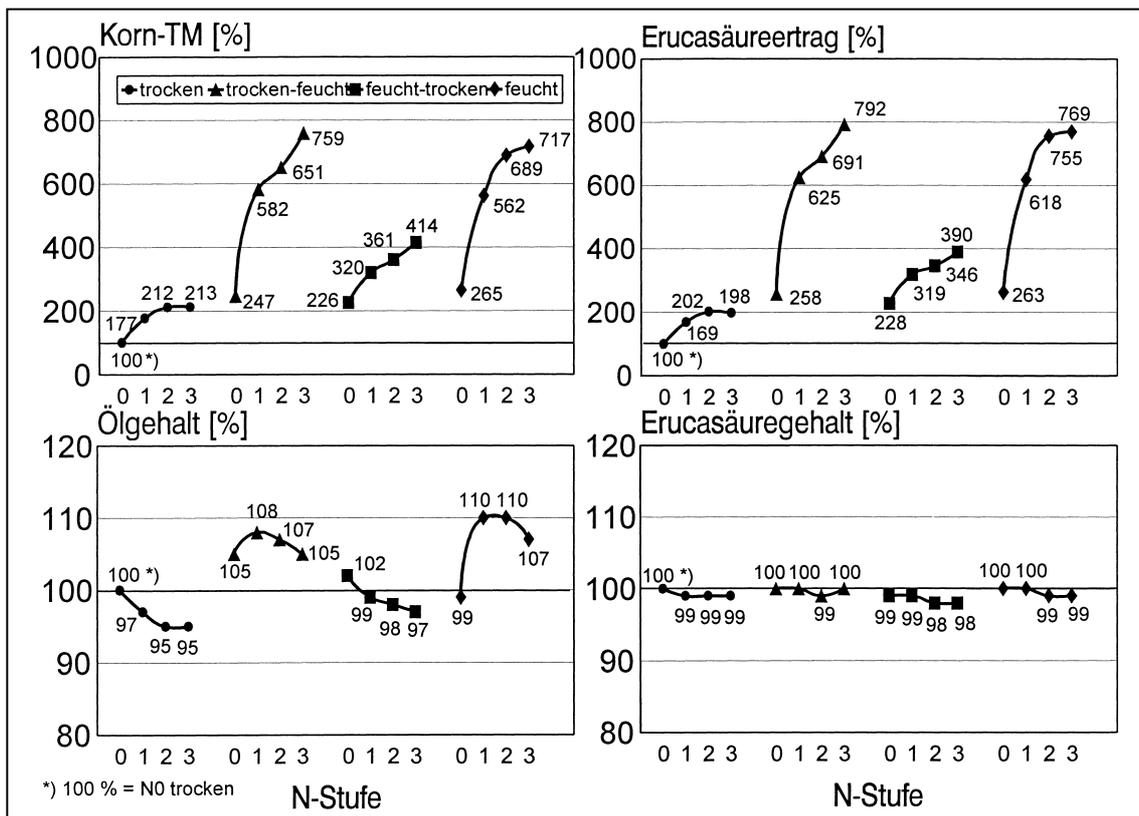


Abb. 2: Prozentuale Variation ausgewählter Ertragskomponenten und des Erucasäureertrages der Krambe in Abhängigkeit von der Wasser- und Stickstoffversorgung im Vergleich zur Variante trocken N0 (Mittel 1994–1996)

Percentage variation of crambe yield parameters and erucic acid yield based on water and nitrogen supply compared to the control treatment dry without nitrogen (mean 1994–1996)

ertrag, der im Mittel zwischen 24,8 und 27,1 g Pflanze⁻¹ in den Versuchsjahren lag. War nach einer Periode Trockenheit vor der Blüte ausreichend Wasser nach der Blüte verfügbar (tf), erzielte die Krambe mit Einzelpflanzenerträgen zwischen 24,5 und 28,6 g Pflanze⁻¹ gleich hohe Erträge wie in der Wasserstufe feucht. Nur im Versuchsjahr 1995 war der Kornertrag der Wasserstufe trocken-feucht signifikant niedriger als in der Stufe feucht.

Im Mittel der drei Versuchsjahre war der Kornertrag in den Wasserstufen trocken-feucht und feucht mit 26,3 bzw. 26,1 g Pflanze⁻¹ am höchsten. Die Erträge unterschieden sich nicht signifikant (Tab. 3). Dagegen war der Ertrag in feucht-trocken deutlich niedriger als in den Wasserstufen kontinuierlich feucht und trocken-feucht, jedoch noch doppelt so hoch wie in der Stufe trocken. Die Stickstoffdüngung bewirkte im Mittel der Wasserstufen einen signifikanten Anstieg des Kornertrages von N0 bis N3 (Tab. 3). Der höchste Kornertrag wurde in trocken-feucht N3 erreicht und übertraf damit den Ertrag der Variante feucht N3. Die Differenz war jedoch nicht signifikant. Bei Trockenheit über die gesamte Vegetationsperiode konnte die Krambepflanze die Stickstoffdüngung über N1 hinaus nicht mehr in signifikanten Mehrertrag umsetzen.

Setzt man den Kornertrag der Variante trocken N0 gleich 100%, stieg der Ertrag allein durch die bessere Wasserverfügbarkeit in der Variante trocken-feucht N0 auf 247%, in feucht-trocken N0 auf 226% und in feucht N0 auf 265% (Abb. 2). Die höchste Düngungsstufe N3 der Wasserstufe trocken erreichte nicht den Ertragszuwachs der Varianten ohne Stickstoffdüngung mit höherer Wasserversorgung. Die Krambepflanze bildete in den Varianten der Wasserstufe feucht-trocken trotz Trockenheit ab Blüte annähernd doppelt so hohe Erträge wie in der Wasserstufe trocken. Die Kornertragssteigerung durch Wasser- und

Stickstoffzufuhr betrug in der Variante mit dem höchsten Kornertrag (trocken-feucht N3) 659%. Der Ertragszuwachs von N0 zu N1 war mit 335 bzw. 297% in den Wasserstufen trocken-feucht und feucht besonders ausgeprägt.

Die Stroh-TM stieg ebenfalls mit der N-Düngung, jedoch unterschieden sich die Stroh-Erträge in N2 und N3 nicht mehr signifikant (Tab. 3). Der höchste Strohertrag im Mittel der N-Düngung wurde in der Wasserstufe feucht gebildet. Die Stroherträge der Wechselvarianten unterschieden sich nicht signifikant. Der Strohertrag erhöhte sich in allen Wasserstufen signifikant von N0 zu N1. Eine weitere Stickstoffzufuhr bewirkte in trocken-feucht und feucht eine signifikante Zunahme des Strohertrages bis N3 bzw. N2, während in trocken und feucht-trocken keine signifikanten Differenzen zwischen den Düngungsstufen N1 bis N3 auftraten.

Der Harvest-Index (HI), das Verhältnis von Korn-Trockenmasse zu Gesamt-Trockenmasse, stieg mit der N-Düngung an und erreichte in der höchsten Düngungsstufe den maximalen Wert (Tab. 3). Der höchste HI in Abhängigkeit von der Wasserversorgung wurde in der Stufe trocken-feucht erreicht. Trockenheit nach der Blüte verringerte den HI deutlich, wobei dieser in feucht-trocken noch abfiel gegenüber durchgehend trocken. In trocken-feucht bewirkte die N-Düngung sowohl signifikante Zu- als auch Abnahmen des HI. In den übrigen Wasserstufen stieg der HI kontinuierlich bis N3. Trockenheit nach der Blüte bei vorausgegangenen feuchten Wachstumsbedingungen beeinflusste das Verhältnis Korn-TM zur Gesamt-TM besonders ungünstig.

Die Tausendkörnmass (TKM) variierte im Gesamtversuch zwischen 5,9 und 18,3 g. Für die Jahresmittelwerte ergaben sich für die TKM keine signifikanten Unterschiede zwischen den 3 Versuchsjahren (Tab. 2). Die Stick-

Tab. 4: Korn-Trockenmasseertrag der Krambeinzelpflanze (g Pflanze⁻¹) (Mittel 1994–1996)

Crambe dry matter seed yield (g plant⁻¹) (mean 1994–1996)

Korn-TM (g Pfl. ⁻¹)		N0	N1	N2	N3	Mittel
1994	trocken	4,8	8,8	12,2	10,6	9,1 c
	trocken-feucht	11,8	28,0	30,0	33,5	25,8 a
	feucht-trocken	11,6	19,8	18,5	19,3	17,1 b
	feucht	13,8	25,2	31,5	29,8	24,8 a
	Mittel	10,5 c*)	20,4 b	22,9 a	23,5 a	GD 5% = 2,1
1995	trocken	3,6	7,2	8,0	7,2	6,5 d
	trocken-feucht	10,3	26,0	27,5	34,4	24,5 b
	feucht-trocken	8,5	14,7	14,5	18,1	13,9 c
	feucht	10,5	27,1	31,2	39,4	27,1 a
	Mittel	8,2 c	18,7 b	20,3 b	24,8 a	GD 5% = 2,4
1996	trocken	5,7	9,1	9,8	12,1	9,2 c
	trocken-feucht	12,8	28,1	34,3	39,1	28,6 a
	feucht-trocken	11,8	10,8	18,1	21,0	15,4 b
	feucht	13,1	26,9	34,4	31,5	26,2 a
	Mittel	10,9 c	18,7 b	24,1 a	25,7 a	GD 5% = 3,1

*) Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterschieden sich nicht signifikant
 Means with the same letter are not significantly different

Tab. 5: Öl-, Erucasäure- und Proteingehalt der Krambesamen (%) (Mittel 1994–1996)

Oil, erucic acid and protein content of crambe seeds (%) (mean 1994–1996)

Hauptwirkung	Ölgehalt (% i. d. TM)	Erucasäuregehalt (% i. Öl)	Rohproteingehalt (% i. d. TM)	Σ Öl + Rohproteingehalt (% i. d. TM)
N0	36,5 a*)	60,8 a	16,0 c	52,6 c
N1	37,1 a	60,7 a	21,1 b	58,2 b
N2	36,8 a	60,4 b	23,5 a	60,3 a
N3	36,3 a	60,2 b	23,6 a	59,9 a
trocken	34,7 b	60,5 a	22,8 a	57,5 ab
trocken-feucht	38,1 a	60,7 a	20,0 b	58,1 a
feucht-trocken	35,5 b	60,1 b	22,6 a	58,2 a
feucht	38,3 a	60,7 a	18,7 c	57,0 b
GD 5%	1,0	0,3	0,5	0,8

*) Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant
 Means with the same letter are not significantly different

stoffdüngung bewirkte im Mittel der Wasserstufen einen Anstieg der TKM von N0 zu N1 (Tab. 3). Eine weitere N-Zufuhr beeinflusste die TKM nicht mehr. Bei Trockenheit vor der Blüte (t, tf), bildete die Krambepflanze mit 11,6 bzw. 11,5 g eine höhere TKM als bei ausreichender Wasserversorgung (f, ft) in dieser Entwicklungsphase. Selbst in der Wasserstufe feucht erreichte die TKM nur 9,5 g und fiel damit deutlich niedriger aus als in der Wasserstufe trocken.

Die Stickstoffdüngung wirkte in Kombination mit der Wasserversorgung verschieden auf die TKM. In trocken-feucht und feucht blieb die TKM von der N-Düngung völlig unbeeinflusst. Dagegen stieg die TKM in den Wasserstufen mit begrenzter Wasserverfügbarkeit nach der Blüte (t, ft) von N0 zu N1, verringerte sich jedoch bei höherer Stickstoffzufuhr wieder. Trotz des höheren Wasserangebotes in feucht-trocken und feucht war die TKM dieser Wasserstufen in allen 4 Düngungsstufen so niedrig wie in der Kontrollvariante (trocken, N0).

Einfluß der Wasser- und Stickstoffversorgung auf die Samen-inhaltsstoffe der Krambe

Der Ölgehalt variierte im Mittel der Varianten des Gesamtversuches zwischen 30,3 und 42,7% i. d. TM. Eine Stickstoffzufuhr zeigte im Mittel über alle Wasserstufen keinen

signifikanten Einfluß auf den Ölgehalt (Tab. 2, 5). In den Stufen feucht und trocken-feucht erreichten die Samen im Mittel 1994–1996 einen Ölgehalt von 38,3 und 38,1% i. d. TM. Signifikant niedriger waren die Ölgehalte in den Wasserstufen feucht-trocken und trocken mit 35,5 bzw. 34,7% i. d. TM. Für die Wechselwirkungen zwischen Wasserverfügbarkeit und Stickstoffsteigerung zeigte sich die Tendenz, daß der Ölgehalt in trocken und feucht-trocken mit steigender Stickstoffdüngung abnahm (Abb. 2). Dagegen bildete die Krambe in feucht und trocken-feucht bei Stickstoffdüngung immer Samen mit einem höheren Ölgehalt als in den Varianten ohne Stickstoff. Eine Stickstoffzufuhr über N1 hinaus führte zu einer Abnahme des Ölgehaltes. Dieser lag jedoch noch über dem Ölgehalt der Varianten ohne Stickstoffdüngung.

Der Erucasäuregehalt variierte im Mittel über alle Versuchsvarianten und Jahre zwischen 59,4 und 61,6% im Öl. Durch die Stickstoffdüngung verringerte sich der Erucasäuregehalt geringfügig aber kontinuierlich bis hin zu signifikanten Differenzen bei N2 und N3 im Vergleich zu N1 und N0 (Tab. 5). Der Einfluß der Wasserversorgung zeigte sich ähnlich wie beim Ölgehalt. Trockenheit nach der Blüte bewirkte eine Abnahme des Erucasäuregehaltes, die jedoch nur in der Wasserstufe feucht-trocken signifikant war (Abb. 2, Tab. 5).

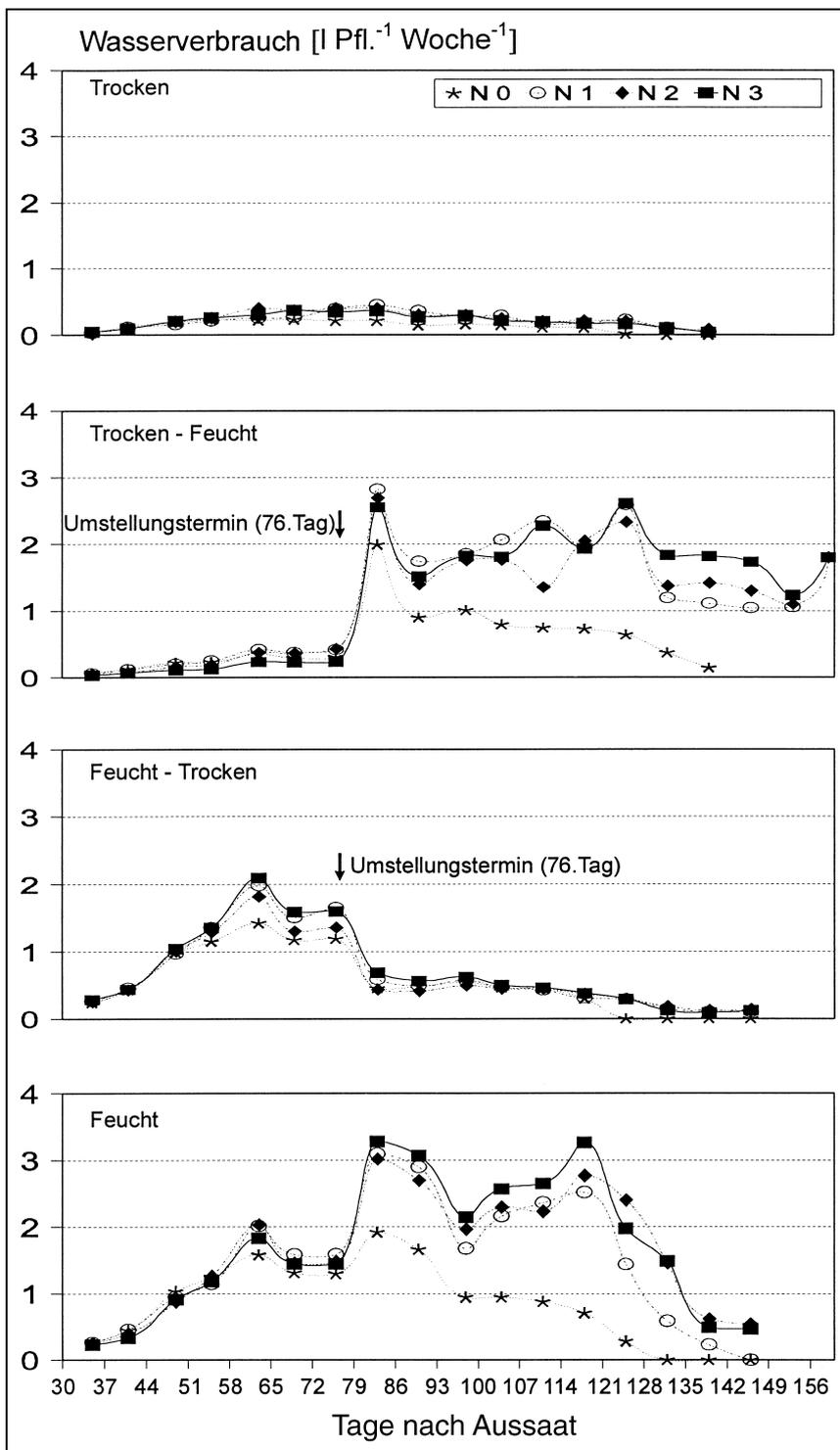


Abb. 3: Wöchentliche Wasserverbrauchsrate von Krambe in Abhängigkeit von der Wasser- und Stickstoffversorgung 1995

Weekly water consumption of crabs depending on water and nitrogen supply 1995

Der Rohproteingehalt stieg signifikant mit der N-Düngung (Tab. 5). Ausreichende Wasserverfügbarkeit nach der Blüte führte zu geringeren Proteingehalten als in trocken und feucht-trocken. In der Wasserstufe trocken lag der Proteingehalt der Samen um 4,1% über dem der Variante feucht. Der Proteingehalt spielt eine Rolle bei der Beurteilung der Futterqualität des bei der Ölpressung anfallenden Krambeschrottes. Für eine optimale Samenausbeute ist deshalb die Summe aus Öl- und Rohproteingehalt sowie ihre Beeinflussung durch die N-Düngung und die Wasserversorgung interessant. Da der Ölgehalt von der N-Düngung nicht beeinflusst wurde, der Proteingehalt jedoch anstieg, erhöhte sich auch die Summe aus Öl- und Proteingehalt mit der N-Düngung. Differenzierte Wasserversor-

gung zeigte keine Wirkung auf die Summe der beiden Sameninhaltsstoffe.

Der Erucasäureertrag nahm insbesondere in den Stufen mit hoher Wasserversorgung nach der Blüte mit steigender Stickstoffdüngung zu (Abb. 2). Im Vergleich zur Kontrollvariante (t, N0) war die Zunahme aufgrund des steigenden Ölgehaltes stärker als beim Kornertrag. In den Wasserstufen trocken und feucht-trocken kam es ebenfalls zu einem Ertragsanstieg mit steigender Stickstoffdüngung gegenüber N0. Der Ertragsanstieg war jedoch durch die Verringerung des Öl- und Erucasäuregehaltes in diesen Varianten geringer. Die Krambepflanze erreichte mit etwa gleich hohen Werten in den Wasserstufen feucht und trocken-feucht den höchsten Erucasäureertrag (Tab. 3). Die Diffe-

renzen zwischen diesen beiden Stufen, gemittelt über alle N-Stufen, waren nicht signifikant. Für die Varianten im Einzelnen betrachtet, trat jedoch eine signifikante Differenz in der Düngungsstufe N2 auf. Die Erucasäureerträge in der Wasserstufe feucht-trocken waren niedriger, jedoch noch signifikant höher als in trocken. Die Steigerung der Stickstoffdüngung führte zu einem signifikanten Erucasäureertrag bis zur höchsten Düngungsstufe (Tab. 3). Die Differenzen der Erucasäureerträge der Varianten feucht N2, N3 und trocken-feucht N3 waren nicht signifikant.

Wasserhaushalt

Die N-Düngung bewirkte eine Zunahme des Wasserverbrauches der Krambe, die nach der Blüte stärker ausgeprägt war als während der Jugendentwicklung (Tab. 6). Die Wasserverfügbarkeit beeinflusste den Wasserverbrauch deutlicher als die N-Düngung. In der vegetativen Phase stieg der Wasserverbrauch um das dreifache bei hoher Wasserverfügbarkeit (f, ft) gegenüber den Wasserstufen trocken und trocken-feucht. Nach der Blüte erhöhte sich der Wasserverbrauch der ausreichend mit Wasser versorgten Varianten um das 3- bis 6-fache gegenüber trocken und feucht-trocken.

In den 3 Versuchsdurchgängen traten ein Maximum des Wasserverbrauches vor der Blüte und zwei Maxima während der Blüte und der Kornausbildung in allen Wasser- und Stickstoffstufen auf. Abb. 3 zeigt den wöchentlichen Wasserverbrauch beispielhaft für das Jahr 1995. In den Vegetationsabschnitten mit Trockenheit waren die Maxima weniger deutlich ausgeprägt. Die Kontrollvariante (t, N0) verbrauchte durchgehend weniger Wasser als die mit Stickstoff gedüngten Varianten. In der Jugendentwicklung der Krambepflanzen unterschieden sich der Wasserverbrauch der Düngungsstufen in den verschiedenen Wasserstufen nur unwesentlich. Eine Differenzierung des Wasserver-

Tab. 6: Kumulierter Wasserverbrauch der Krambe vor und nach der Blüte in Abhängigkeit von der Wasser- und Stickstoffversorgung (Mittel 1994–1996)

Cumulative water consumption of crambe before and after flowering as influenced by water and nitrogen supply (mean 1994–1996)

N	Wasserverbrauch (l Pfl. ⁻¹)	
	bis Blüte	nach Blüte
N0	3,5 b ¹	5,6 c
N1	4,3 a	10,7 b
N2	4,3 a	12,2 a
N3	4,3 a	12,0 a
trocken	2,0 c	2,9 d
trocken-feucht	2,0 c	17,6 a
feucht-trocken	6,4 a	5,0 c
feucht	6,1 b	14,8 b
GD 5%	0,3	1,0

¹Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant

Means with the same letter are not significantly different

brauches zwischen den Düngungsstufen sowohl bei Trockenheit als auch bei hoher Wasserverfügbarkeit trat erst kurz vor der Blüte auf. Nach der Blüte zeigte sich bei hoher Wasserversorgung eine deutliche Differenzierung zwischen den Düngungsstufen, die insbesondere zu einem Anstieg des Wasserverbrauches von N0 zu den mit N gedüngten Varianten führte. Bei Trockenheit nach der Blüte waren die Differenzen im Wasserverbrauch zwischen den Düngungsstufen wiederum nur gering.

Über die Vegetationsperioden betrachtet war der Gesamtwasserverbrauch der Krambeinzelpflanze in der Wasserstufe feucht mit 20,9 l Pflanze⁻¹ am höchsten (Tab. 7) und

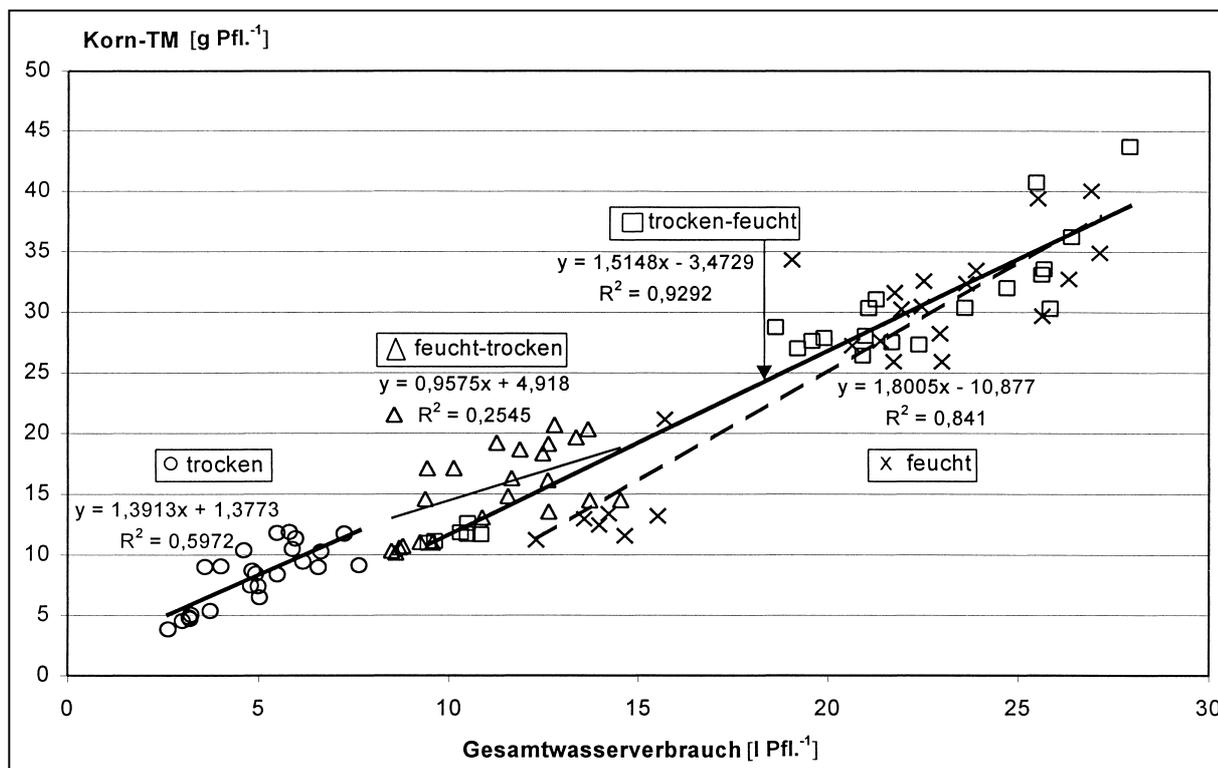


Abb. 4: Korn-TM der Krambe in Abhängigkeit vom Gesamtwasserverbrauch bei differenzierter Wasserversorgung (Mittel 1994–1996)
Crambe seed dry matter yield as influenced by total water consumption at different water supply levels (mean 1994–1996)

Tab. 7: Gesamtwasserverbrauch, Wassernutzungseffizienz und Transpirationskoeffizienten der Krambe in Abhängigkeit von der Wasser- und Stickstoffversorgung (Mittel 1994–1996)

Total water consumption of crambe plant, water use efficiency and transpiration ratio as influenced by water and nitrogen supply (mean 1994–1996)

Variante		Gesamtwasserverbrauch (l Pfl. ⁻¹)	Wassernutzungseffizienz Korn (g Korn-TM l ⁻¹)	Wassernutzungseffizienz Pflanze (g Gesamt-TM l ⁻¹)	Transpirationskoeffizient (l kg Gesamt-TM ⁻¹)
Interaktion					
trocken	N0	3,2 i*)	1,52 cde	3,88 b	269,7 e
	N1	5,3 h	1,70 bc	4,16 a	241,7 f
	N2	6,0 h	1,88 ab	4,19 a	241,4 f
	N3	5,4 h	2,00 a	4,29 a	236,0 f
trocken-feucht	N0	10,2 fg	1,15 h	2,37 h	426,4 a
	N1	20,5 c	1,35 efg	2,60 gh	391,2 b
	N2	23,5 ab	1,31 fgh	2,61 gh	384,6 b
	N3	24,5 a	1,49 def	2,90 f	348,1 c
feucht-trocken	N0	8,9 g	1,21 gh	3,33 de	313,0 d
	N1	12,8 de	1,20 gh	3,22 e	315,0 d
	N2	11,9 ef	1,44 def	3,56 cd	285,3 e
	N3	12,1 def	1,62 cd	3,74 bc	270,2 e
feucht	N0	14,0 d	0,89 i	2,37 h	428,5 a
	N1	21,7 bc	1,26 gh	2,64 g	386,3 b
	N2	24,8 a	1,32 fgh	2,71 fg	377,0 b
	N3	23,3 ab	1,47 def	2,93 f	345,2 c
GD 5%		2,1	0,2	0,3	25,2
Hauptwirkung					
	N0	9,1 c	1,19 d	2,98 d	359,4 a
	N1	15,1 b	1,38 c	3,15 c	333,6 b
	N2	16,5 a	1,49 b	3,27 b	321,8 c
	N3	16,3 a	1,65 a	3,47 a	299,7 d
	trocken	4,9 d	1,78 a	4,13 a	247,2 c
	trocken-feucht	19,7 b	1,32 b	2,62 c	387,6 a
	feucht-trocken	11,4 c	1,37 b	3,45 b	296,4 b
	feucht	20,9 a	1,23 c	2,66 c	384,9 a
GD 5%		1,2	0,1	0,1	10,9

*) Mittelwerte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant, Signifikanzen getrennt nach Interaktion und Hauptwirkungen

Means with the same letter are not significantly different, separated by interaction and main effect

verringerte sich signifikant in den Stufen trocken-feucht (19,7 l Pflanze⁻¹), feucht-trocken und trocken (11,4 bzw. 4,9 l Pflanze⁻¹). Der Wasserverbrauch stieg mit der Stickstoffdüngung an, jedoch bestanden in den Wasserstufen trocken und feucht-trocken keine signifikanten Unterschiede zwischen den mit Stickstoff gedüngten Varianten.

Der Transpirationskoeffizient (TK), die pro Kilogramm oberirdisch gebildete Biomasse verbrauchte Wassermenge, nahm in allen Wasserversorgungsstufen mit steigender Stickstoffzufuhr ab (Tab. 7). Mit zunehmender Wasserverfügbarkeit erhöhte sich der Transpirationskoeffizient. In den Wasserstufen trocken-feucht und feucht war der Transpirationskoeffizient mit durchschnittlich 388 bzw. 385 l kg⁻¹ TM signifikant höher als in feucht-trocken (296 l kg⁻¹ TM) und trocken (247 l kg⁻¹ TM). Bei Trockenheit über die gesamte Vegetationsperiode verringerte sich der Transpirationskoeffizient von N0 zu N1, blieb aber bei steigender N-Düngung nahezu unverändert. Bei hoher Wasserverfügbarkeit nach der Blüte verringerte sich der TK kontinuierlich von N0 bis N3.

Die Wassernutzungseffizienz (WNE) des Korns und der Gesamtpflanze als Quotient aus Ertrag und Gesamtwasserverbrauch erhöhte sich mit der N-Düngung und abnehmender Wasserverfügbarkeit. In der Variante trocken N3 erreichte die Krambe die höchste WNE (Tab. 7).

Der Transpirationskoeffizient war positiv korreliert mit dem Gesamtwasserverbrauch (Tab. 8), d. h. mit steigendem Wasserverbrauch verringerte sich die Effektivität des Faktoreinsatzes Wasser bezogen auf die TM-Bildung. Zwischen dem Wasserverbrauch nach der Blüte bzw. dem Gesamtwasserverbrauch und der Korn-TM bestand ein sehr enger Zusammenhang ($r = 0,91^{***}$ bzw. $0,93^{***}$). In den Wasserstufen feucht und trocken-feucht war dieser stärker ausgeprägt als in trocken und feucht-trocken (Abb. 4). Zwischen dem Erucasäuregehalt und den Wasserhaushaltsparametern waren keine Zusammenhänge nachweisbar, während der Ölgehalt positiv mit dem Gesamtwasserverbrauch und dem Transpirationskoeffizienten korreliert war (Tab. 8). Die Triebzahl zeigte eine positive Korrelation zum Wasserverbrauch vor der Blüte. Der Wasserverbrauch nach der Blüte war positiv korreliert mit der Schotenzahl.

Tab. 8: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Ertragsmerkmale der Krambepflanzen (n = 284)

Coefficients of correlation for selected crambe yield characters (n = 284)

	TKM (g)	Triebe (Anzahl Pfl. ⁻¹)	Schoten (Anzahl Pfl. ⁻¹)	Ölgehalt (% i. d. TM)	Erucasäure- gehalt (% i. Öl)	Wasser- verbrauch vor Blüte (l Pfl. ⁻¹)	Wasser- verbrauch nach Blüte (l Pfl. ⁻¹)	Wasser- verbrauch gesamt (l Pfl. ⁻¹)	Trans- pirations- koeffizient (l kg TM ⁻¹)
Korn-TM	-0,03 n. s.	0,29***	0,92***	0,45***	0,02 n. s.	0,23***	0,91***	0,93***	0,39***
TKM	-	-0,29***	-0,34***	-0,30***	0,03 n. s.	-0,34***	0,14 n. s.	0,03 n. s.	-0,26***
Triebe		-	0,41***	0,08 n. s.	-0,14 n. s.	0,74***	0,16**	0,38***	-0,23***
Schoten			-	0,43***	-0,01 n. s.	0,36***	0,77***	0,84***	0,35***
Ölgehalt				-	0,30***	0,19*	0,40***	0,44***	0,50***
Erucasäuregehalt					-	-0,20**	0,13 n. s.	0,06 n. s.	0,17*
WV vor Blüte						-	0,02 n. s.	0,33***	0,20**
WV nach Blüte							-	0,95***	0,56***
WV gesamt								-	0,60***

* signifikant für p < 0,05

** signifikant für p < 0,01

*** signifikant für p < 0,001

n. s. nicht signifikant

Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse des Gefäßversuches mit Einzelpflanzen können nicht unmittelbar auf die Verhältnisse einer Pflanze im Feldbestand übertragen werden. Andererseits sind Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Pflanzen im Feld besonders schwierig durchzuführen. Der Boden im Feld ist inhomogen und unterliegt ebenso wie die Pflanze vielfältigen Einflüssen, die im Gefäßversuch weitestgehend ausgeschlossen werden können. Im Gegensatz zum Feldversuch konnte im dargestellten Gefäßversuch die Wasserzufuhr räumlich und zeitlich konstant geregelt werden. Die gewonnenen Ergebnisse sind entsprechend zu bewerten und sollen zu Hypothesen und Ergebnisgrundlagen führen, die in Feldversuchen weiter zu untersuchen sind. Das Auftreten von Jahreseffekten im vorliegenden Versuch kann teilweise zurückgeführt werden auf die nicht vollständig zu eliminierenden Umwelteffekte im Phytosolarium. Durch den Verzicht auf die Steuerung der Beleuchtung konnte beispielsweise die Strahlungsdauer die Ausbildung der einzelnen Ertragsparameter der Krambe in den Jahren unterschiedlich beeinflussen. Die Zielgröße Erucasäureertrag als Kombination aller Ertragsfaktoren wurde jedoch nicht von den Jahreseffekten beeinflusst (Tab. 2).

Der Kornertrag der Krambepflanze zeigte sich primär abhängig von der Wasserverfügbarkeit. Die Umsetzung des verfügbaren Stickstoffs war nur möglich, wenn das Wasserangebot höher war als in der Wasserstufe trocken. Dabei realisierte die Krambe auch in der Stufe feucht-trocken bei Trockenheit nach der Blüte noch einen Ertragsanstieg bis zur Düngungsstufe N2. In der Wasserstufe trocken-feucht bildete die Krambe ähnlich hohe Kornerträge wie in der Wasserstufe feucht (Tab. 3). Der Vergleich des Wasserverbrauches der Stufen trocken-feucht und feucht in den verschiedenen Vegetationsphasen sowie des Gesamtwasserverbrauches zeigt, daß die Krambe bei vorausgegangener Trockenheit 19% mehr Wasser von der Blüte bis zur Reife benötigte als die Krambepflanze, deren Wasserversorgung kontinuierlich über die Vegetationsperiode gesichert war (Tab. 4). Die Krambepflanze war in der Lage, trockene Bedingungen vor der Blüte zu kompensieren. Voraussetzung für die Realisierung eines hohen Kornertrages war dann jedoch eine ausreichende Wasserverfügbarkeit nach der Blüte. Überträgt man diese Ergebnisse theoretisch auf das Feld, ließe sich schlußfolgern,

daß die Krambe eine Vorsommertrockenheit kompensieren kann, wenn nach der Blüte ausreichend Niederschläge vorhanden sind. KÜCHLER (1963) ermittelte in Untersuchungen an Krambe einen erhöhten Wasserbedarf zur Keimung und während der Samenbildung und stellte fest, daß Krambe in ihren Anforderungen an optimale Wachstumsbedingungen denen anderer Sommeröfrüchte entspricht.

Die Tausendkornmasse der Krambepflanzen war bei Trockenheit in der vegetativen Entwicklung höher als bei hohem Wasserangebot in dieser Entwicklungsphase. Die Krambefrucht ist eine zweigliedrige Schote, die nur einen Samen ausbildet, so daß sie zur Reife einer einsamigen Nuß gleicht und die Samen- der Schotenzahl entspricht (ZIMMERMANN & RAGALLER 1961). Ertragsanalytische Untersuchungen an Raps zeigen eine negative Korrelation zwischen Samenzahl je Schote und der TKM, während für die Korrelation zwischen Schotenzahl je Pflanze und TKM sowohl positive als auch negative Werte ermittelt wurden (DIEPENBROCK & GEISLER 1985, LÉON et al. 1989). Im Versuch ist die Korrelation zwischen TKM und Anzahl Schoten negativ (Tab. 8). Eine geringe Schotenzahl kompensierte die Krambe mit der Ausbildung größerer Samen. Dies erklärt die hohe TKM bei geringer Schotenzahl in der Wasserstufe trocken sowie die geringe TKM bei hoher Schotenzahl in der Wasserstufe feucht. In feucht-trocken wurde in der vegetativen Phase eine hohe Schotenzahl angelegt, die aufgrund der Trockenheit nach der Blüte zur Ausbildung kleiner Samen und damit zu einer geringen TKM führten. Bleibt die Frage offen nach dem Zusammenhang zwischen der dreifach höheren Schotenanzahl in der Wasserstufe trocken-feucht im Vergleich zur Stufe trocken und der ebenso hohen TKM wie in dieser Wasserstufe. Möglicherweise förderte die Umstellung der Wasserversorgung von trocken auf feucht nach Blühbeginn noch die Blütenentwicklung, so daß die Schotenzahl anstieg.

Der Gesamtwasserverbrauch hatte keinen Einfluß auf die TKM (Tab. 8). In Gefäßversuchen mit Koriander zeigte sich tendenziell ein positiver Einfluß der Wasserversorgung auf die TKM, während die N-Düngung zu einer signifikanten Verringerung der TKM führte (HELMKE 1993).

Zwischen dem Gesamtpflanzen- bzw. Kornertrag und dem Wasserverbrauch existiert ein enger linearer Zusammenhang (SCHWARZ 1987, HÖPPNER 1991, HELMKE 1993), wie er auch im vorliegenden Versuch nachgewiesen wurde (Abb. 4). Die Differenzierung nach den Wasserversor-

gungsstufen ergibt vier Regressionsgeraden mit ähnlichem Anstieg, jedoch unterschiedlichen Schnittpunkten der y-Achse. In den Wasserstufen trocken und feucht-trocken liegt dieser Schnittpunkt über 0. In den Stufen feucht und trocken-feucht liegt der Schnittpunkt im negativen Bereich der y-Achse. Der positive x-Achsenabschnitt wird als Evaporationsanteil am Gesamtwasserverbrauch betrachtet (HANKS 1974). Die Messung der Evaporation läßt sich versuchstechnisch nur schwer realisieren und wurde im vorliegenden Versuch nicht ermittelt. Da in allen Versuchsvarianten Evaporation auftritt, läßt der positive Schnittpunkt mit der x-Achse in den Wasserstufen feucht und trocken-feucht vermuten, daß hier die Evaporation deutlich höher war als in trocken und feucht-trocken. Möglicherweise spielt die zunehmende Strahlungsdauer mit steigender Tageslänge eine Rolle, die nach der Blüte zu einer Differenzierung der Evaporation zwischen den Wasserstufen trocken und feucht geführt haben könnte. Das würde auch erklären, warum der Schnittpunkt mit der y-Achse in der Wasserstufe feucht-trocken wie in trocken positiv ist, obwohl das höhere Wasserangebot in der Stufe feucht-trocken ebenfalls eine erhöhte Evaporation gegenüber der Wasserstufe trocken erwarten ließe.

Stickstoffdüngung und Wasserversorgung wirken gegensätzlich auf den Transpirationskoeffizienten. Mit der Höhe der Stickstoffdüngung verringerte sich der TK. Mit steigender Wasserverfügbarkeit in den Varianten erhöhte sich der Transpirationskoeffizient (Tab. 7), d. h. bei Wassermangel ist der TK geringer als bei hohem Wasserangebot. Gesamt- und Korn-Trockenmasse sowie Wasserverbrauch nehmen mit der Stickstoffdüngung zu. Folglich müßte aufgrund der positiven Korrelation zwischen Wasserverbrauch und Transpirationskoeffizient auch dieser mit der Stickstoffdüngung zunehmen. Der Transpirationskoeffizient verringert sich jedoch, besonders deutlich in den Varianten mit ausreichender Wasserverfügbarkeit nach der Blüte (tf, f). Im durchgeführten Versuch wurde die Transpiration auf der Basis des Wasserverbrauches ermittelt. EHLERS (1997) sieht bei Anwendung dieser Methode in Feldversuchen eher eine ungenaue Erfassung der Transpiration, da diese nicht direkt gemessen wird. Unkontrollierte Evaporation führe dann zu einer Fehlkalkulation des Transpirationskoeffizienten. Der Autor schlußfolgert daraus, daß zwar der Wasserverbrauch pro kg Trockenmasse verringert wird, nicht aber unbedingt der Transpirationskoeffizient (EHLERS 1997). Unter den gegebenen Versuchsbedingungen im Phytosolarium ist die Evaporation des Bodens durch Abdeckung mit Kies vermindert, kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es ist zudem davon auszugehen, daß die Evaporation bei unterschiedlicher Bodenfeuchte, wie sie in den Versuchsvarianten vorliegt, in den Varianten verschieden hoch ist. Jedoch ist die Stickstoffwirkung auf den TK unabhängig von der Wasserversorgung in allen vier Wasserstufen gleichgerichtet. Möglicherweise verursacht die N-Düngung durch die höhere Substanzbildung auch eine Änderung der Evaporation und entsprechende Effekte überlagern die Wirkung der N-Düngung auf den TK. Zur Klärung der Problematik, ob und wie die Nährstoffversorgung den Transpirationskoeffizienten tatsächlich beeinflusst, sind weitere Versuche notwendig.

Über den Einfluß der Stickstoffdüngung auf den Ölgehalt von Krambe liegen unterschiedliche Ergebnisse aus der Literatur vor. Bei Raps und anderen Pflanzenarten aus der Familie der *Brassicaceae* wurden negative Korrelationen zwischen Ölgehalt und Stickstoffdüngung ermittelt (DIEPENBROCK 1979, GEISLER 1980, JAKOB 1995). Bei Anbauversuchen mit Krambe konnte kein eindeutiger

Einfluß der Stickstoffdüngung auf den Öl- und Erucasäuregehalt der Samen nachgewiesen werden (KLAUS & MAKOWSKI 1996). In Versuchen von ZIMMERMANN & RAGALLER (1961) wurde beobachtet, daß die Stickstoffdüngung ab der Menge, bei der keine Kornertragssteigerung mehr stattfand, den Ölgehalt der Krambesamen nicht mehr beeinflusste. Bis zu einer Stickstoffdüngung von 40 kg ha^{-1} konnte eine positive Korrelation zwischen Kornertrag und Ölgehalt ermittelt werden. In dem durchgeführten Gefäßversuch wurde ein negativer Einfluß der Stickstoffdüngung auf den Ölgehalt in den Wasserstufen feucht-trocken und trocken ermittelt. Ausreichende Wasserverfügbarkeit nach der Blüte (trocken-feucht, feucht) sicherte auch bei steigender Stickstoffdüngung einen hohen Ölgehalt, während der Proteingehalt sank. Hohe Wasserverfügbarkeit nach der Blüte fördert offensichtlich die als Folgeprozeß der Proteinsynthese ablaufende Ölsynthese, während bei Wassermangel die Ölsynthese nicht mehr im potentiellen Umfang ausgeführt werden kann (GEISLER 1980). Zwischen dem Ölgehalt und dem Gesamtwasserverbrauch errechnete sich ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,44^{***}$ (Tab. 8). Durch die Verringerung des Ölgehaltes in den Varianten mit begrenzter Wasserverfügbarkeit ab Blüte verringerte sich der Effekt der Kornertragssteigerung durch die Stickstoffdüngung. Die Erucasäuregehalte der Samen erreichten im Versuchsmittel 60,5% im Krambeöl. Für den Erucasäuregehalt bestanden außer zum Ölgehalt und Transpirationskoeffizienten keine signifikanten Korrelationen (Tab. 8).

Krambe reagiert wie andere Sommerölpflanzen positiv auf Stickstoff und Wasser. Wasser ist die primäre Voraussetzung für eine hohe Ertragsleistung. Steht ausreichend Wasser während der gesamten Vegetationszeit zur Verfügung, kann Krambe eine hohe Stickstoffdüngung effektiv in hohen Kornertrag umsetzen. Bei ausreichendem Wasserangebot wird der Ölgehalt nicht, der Erucasäuregehalt nur geringfügig negativ von der Stickstoffdüngung beeinflusst. Der ausgeprägte Ertragsanstieg von der Düngungsstufe N0 zur Stufe N1 zeigt, daß Krambe ein Grundniveau an Stickstoff für hohe Erträge benötigt. Die Reaktion der Krambe auf eine weitere Stickstoffzufuhr ist dann abhängig von den gegebenen Standortfaktoren, insbesondere vom Nährstoffgehalt des Bodens und der Wasserverfügbarkeit. Bei Erträgen bis zu 30 dt ha^{-1} empfehlen KLAUS & MAKOWSKI (1996) auf leichteren Standorten eine N-Düngung zwischen $90\text{--}120 \text{ kg ha}^{-1}$. Auf Lößböden war bei dieser Düngermenge keine Ertragssteigerung mehr zu verzeichnen (ZIMMERMANN & RAGALLER 1961). Die Ergebnisse des Gefäßversuches haben gezeigt, daß Krambe trotz Wassermangel vor der Blüte bei hohem Wasserangebot nach der Blüte gleiche Erucasäurerträge erreichen konnte wie bei durchgehend hoher Wasserverfügbarkeit. Für den maximalen Ertrag war dafür jedoch eine höhere Stickstoffzufuhr notwendig (Tab. 3). Die Kompensation einer Vorsommertrockenheit erscheint folglich möglich, wenn nach der Blüte im Juli und August entsprechend hohe Niederschläge zur Verfügung stehen bzw. eine Beregnung zu diesem Zeitpunkt realisiert werden kann. Zu beachten ist dann aber auch die deutliche Verzögerung der Abreife durch die späte Wasserverfügbarkeit und Stickstoffumsetzung, die den Erntetermin in die Winterweizendruschzeit verlagern kann (TROEGEL 1997).

Begrenzte Wasserverfügbarkeit während der gesamten Vegetationsperiode bzw. ab Blüte führt zu deutlicher Kornertragsminderung gegenüber ausreichender Wasserversorgung. Ein steigendes Stickstoffangebot kann unter Trockenbedingungen nicht in hohen Kornertrag umgesetzt

werden. Zudem verringern sich bei Wassermangel Öl- und Erucasäuregehalt mit steigender Stickstoffdüngung.

Im Feldbestand unterliegt die Krambepflanze zahlreichen anderen Einflüssen und kann auf ertragsbeeinflussende Faktoren anders reagieren als im Gefäßversuch. So beeinflusst die Bestandesdichte ganz wesentlich die Ausbildung der Ertragskomponenten der Einzelpflanze im Bestand. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse des Gefäßversuches aber, daß Krambe im Unterschied zu anderen im Gefäßversuch geprüften Pflanzen Wassermangel vor der Blüte kompensieren kann, wenn die Nährstoffversorgung ausgeglichen und die Wasserversorgung nach der Blüte ausreichend hoch ist.

Literatur

- BML, 1995: Bericht des Bundes und der Länder über nachwachsende Rohstoffe, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster – Hilstrup.
- BRAMM, A., 1995: Untersuchungen zur Produktionstechnik von Krambe (*Crambe abyssinica*) mit dem Ziel einer Erucasäureproduktion für die chemische Industrie. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **8**, 157–160.
- DIEPENBROCK, W., 1979: Einfluß der Stickstoffernährung auf qualitative und quantitative Sameneigenschaften von Raps (*Brassica napus* L.). Z. Acker- und Pflanzenbau **142**, 740–750.
- DIEPENBROCK, W. & G. GEISLER, 1985: Die Ertragsstruktur von Raps. I. Ertragsbildungsprozesse. II. Ertragskomponenten. Kali-Briefe (Büntehof) **17**, 585–618.
- EHLERS, W., 1997: Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Pflanzenbauwiss. **1**, 97–108.
- FOCHEM, H., 1996: Einsatz von Pflanzenölen in der Oleochemie. Raps **14**, 143–145.
- FRAUEN, M., 1997: Stand und Entwicklung der deutschen Ölpflanzenzüchtung, In: 5. Symposium Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie, Schriftenreihe BML, Reihe A: Angewandte Wissenschaften Sonderheft, Bonn, 50–55.
- GEISLER, G., 1980: Pflanzenbau: Ein Lehrbuch – Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion, Parey, Berlin und Hamburg, 2. Aufl.
- HANKS, R. J., 1974: Model of predicting plant yield as influenced by water use. Agron. J. **66**, 660–665.
- HELMKE, H. H., 1993: Pflanzenbauliche und ertragsanalytische Untersuchungen an Koriander und Fenchel als Basis für die Erzeugung des Chemierohstoffes Petroselinensäure. Diss. Gießen, FB Agrarwissenschaften.
- HÖPPNER, F., 1991: Fruktanspeicherung in Sproß und Knolle von Topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) sowie Einfluß der Wasserversorgung auf Wachstum und Ertrag. Diss. Gießen, FB Agrarwissenschaften.
- JAKOB, K., 1995: Pflanzenbauliche Untersuchungen bei verschiedenen *Brassicaceae* mit dem Ziel der Erucasäureproduktion für die oleo-chemische Industrie. Diss. Gießen, FB Agrarwissenschaften.
- KLAUS, M. & N. MAKOWSKI, 1996: Untersuchungen zur N-Düngung bei Krambe (*Crambe abyssinica* Hochst. ex R. E. Fries). Arch. Acker-Pfl.bau Bodenkunde **40**, 197–204.
- KÜCHLER, M., 1963: Der Einfluß klimatischer Faktoren auf den Entwicklungsverlauf von Krambe (*Crambe abyssinica* Hochst.), Albrecht-Thaer-Archiv **7**, 355–365.
- LÉON, J., F. GROSSE & G. GEISLER, 1989: Genetische Korrelation zwischen vegetativen und generativen Merkmalen bei zwei Winterraps-sorten (*Brassica napus* L.). Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. **2**, 190–195.
- SCHUSTER, W., 1992: Ölpflanzen in Europa. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt a. M.
- SCHWARZ, M., 1987: Ein Beitrag zur Bestimmung von physiologischen Kriterien für die genotypisch bedingte Variabilität des Wasserbedarfes von Kulturpflanzen. Diss. Göttingen, FB Agrarwissenschaften.
- SOMMER, C., 1978: Eine Methode zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Vegetationsgefäßen nach dem Bodenwasserpotential. Landbauforsch. Völkenrode **28**, 17–20.
- SPERBER, J., R. BERISCH, E. EDINGER & W. WEIGEL, 1988: Öl- und Eiweißpflanzen – Anbau – Kultur – Ernte. Österreichischer Agrarverlag, Wien.
- TROEGEL, T., 1997: Modellbau Krambe. In: Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, H. 15, 102–108.
- ZIMMERMANN, H. G. & F. RAGALLER, 1961: Die neue Sommerölfrucht *Crambe abyssinica* Hochst. und ihr Ertragspotential sowieso dessen Beeinflussung durch einige Ertragsfaktoren. Albrecht-Thaer-Archiv **5**, 438–467.

Eingegangen am 30. April 1998;
angenommen am 14. September 1998

Anschriften der Verfasser:
Dr. Katrin Jakob, Dr. A. Bramm, Dr. N. Ochrimenko, Institut für Pflanzenbau, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig