

Einfluss von Klima und anbautechnischen Maßnahmen auf Gehalt und Verteilung von Nitrat in Möhren

Von dem Fachbereich Gartenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Gartenbauwissenschaften

- Dr. rer. hort. -

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. agr. Maria-Theresia Bernhold
geboren am 4.1.1965, in Oldenburg

2003

Referent: Prof. Dr. H.-J. Wiebe
Korreferent: Prof. Dr. H.-C. Scharpf
Tag der Promotion: 20.12.2002

Kurzfassung

Einfluss von Klima und anbautechnischen Maßnahmen auf Gehalt und Verteilung von Nitrat in Möhren

Schlagwörter: Möhre, Nitrat, Klima

Die Verwendung der Möhre für Diät- und Babynahrung erfordert in Deutschland die Einhaltung des Grenzwertes für Nitrat von 250 mg NO₃⁻/kg FS. Hohe Nitratgehalte treten in erster Linie bei einem hohen Stickstoffangebot auf, sind jedoch nicht immer nur über dieses zu erklären. Deshalb wurden in Versuchen in Klimakammern, im Gewächshaus, Freiland und mit einer modifizierten Druckmesssondentechnik weitere die Nitratakkumulation beeinflussende Faktoren geprüft, wie z.B. das Klima und anbautechnische Maßnahmen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Nitratgehalt in der Möhre ist in den Blattstielen besonders hoch, gefolgt von der Blattspreite. In der Rübe ist er wesentlich geringer, und im Mark sehr viel höher als in der Rinde. Für die Nitratkonzentration in den Vakuolen der einzelnen Zellen ist vor allem die Distanz der Zelle zu den Xylemgefäßen ausschlaggebend. Strahlung und Nitratgehalt sind negativ, Temperatur und Nitratgehalt positiv korreliert. Das Sättigungsdefizit der Luft hat keinen Einfluss auf den Nitratgehalt. Abnehmende Bodenfeuchte verzögert das Wachstum und erhöht den Nitratgehalt. Das Auswaschen des Stickstoffes durch eine starke Beregnung vor der Ernte senkt den Nitratgehalt nicht sicher und ist nicht zu empfehlen. Maßnahmen wie Unterschneiden der Pflanzen oder Laubentfernen verringern den Nitratgehalt nicht. Alle Faktoren, die die Assimilationsfläche negativ beeinflussen, erhöhen den Nitratgehalt, denn die Nitratreduktion erfolgt in der Möhre überwiegend im Blatt. Die zwei geprüften Sorten unterscheiden sich im Nitratgehalt. Es ergaben sich Hinweise auf einen sortenspezifischen Zusammenhang zwischen morphologischen Merkmalen und Nitratgehalt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Kulturführung Klima- und Bodeneigenschaften des Standortes berücksichtigt werden müssen und bei optimaler Wachstumsförderung und einem geringen Stickstoffangebot ein Überschreiten des Nitratgrenzwertes bei Möhren unwahrscheinlich ist.

Abstract

Influence of climate and growing methods on the content and distribution of nitrate in carrots.

Keywords: carrot, nitrate, climate

In Germany the industrial use of carrots for diet and baby food requires a limit for nitrate content of 250 mg NO₃⁻/kg fresh weight. High nitrate content is mostly the result of high nitrogen supply, but is not fully explained by this. Therefore other factors affecting the nitrate content especially climatic factors and growing methods were examined in experiments within climate controlled chambers, a greenhouse, outdoor cultivation and with a modified pressure probe technique.

The results can be summarized as follows:

The nitrate content in carrots is highest in the leaf stalk, followed by the leaf blade. It is considerably lower in the turnip. Within the turnip it is much higher in the pith than in the cortex. The concentration of nitrate in the vacuole of each single cell depends on her distance to the xylem vessels.

Radiation and nitrate content are negative, temperature and nitrate content are positive correlated. The saturation deficit of the atmosphere has no influence on the nitrate content. Decreasing soil humidity slows down the growth and increases the nitrate content. Washing out the nitrogen by a single high irrigation before harvest will not reliable lower the nitrate content and is therefore not recommended. Also methods like undercutting the plant or removing the leaves do not reduce the nitrate content.

All factors with negative influence on the assimilation surface increase the nitrate content, because nitrate reduction is mainly located in the leaves.

The two examined cultivars are different in nitrate content. There are indications of cultivar specific relations between morphological characteristics and nitrate content.

For cultivation local characteristics of climate and soil have to be taken into consideration. By optimal support of growth and low nitrogen supply an exceed of the nitrate limit in carrots is unlikely.

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

d	Tag
FAD	Flavin-adenin-dinucleotid
FS	Frischsubstanz
GD	Grenzdifferenz
KK	Klimakammer
n	Anzahl der Messwerte
NADP	Nikotinamid-adenin-dinucleotidphosphat
N _{min}	mineralischer Stickstoff
NR	Nitratreduktase
n.s.	nicht signifikant
PAR	Photosynthetisch wirksame Strahlung (400-700 nm)
red KH	reduzierende Kohlenhydrate
RLF	relative Luftfeuchte
SD	Sättigungsdefizit der Luft
TS	Trockensubstanz
UV	ultraviolett
α	Signifikanzniveau
*	signifikant ($\alpha = 0.05 \%$)

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
2 EINFLUSS VON KLIMAFAKTOREN UND ANBAU- TECHNISCHEN MASSNAHMEN	9
2.1 Strahlung, Sättigungsdefizit und Temperatur.....	10
2.1.1 Material und Methoden	10
2.1.2 Ergebnisse	18
2.2 Bodenfeuchte: Gefäßversuch.....	30
2.2.1 Material und Methoden	30
2.2.2 Ergebnisse	33
2.3 Bodenfeuchte: Freilandversuch	37
2.3.1 Material und Methoden	37
2.3.2 Ergebnisse	40
2.4 Anbautechnische Maßnahmen	47
2.4.1 Material und Methoden	48
2.4.2 Ergebnisse	49
3 VERGLEICH VON SORTENEIGENSCHAFTEN	51
3.1 Wurzelmorphologie	51
3.1.1 Material und Methoden	51
3.1.2 Ergebnisse	53
3.2 Morphologie von Laub und Rübe.....	58
3.2.1 Material und Methoden	59
3.2.2 Ergebnisse	61

4 NITRATKONZENTRATION IN VAKUOLEN VON EINZELZELLEN.....	64
4.1 Material und Methoden.....	64
4.1.1 Sorten	64
4.1.2 Pflanzenanzucht	64
4.1.3 Analytik und Modifizierung der Methode zur Messung von Nitrat in Vakuolen von Einzelzellen.....	65
4.1.4 Analytik der Gewebeproben.....	75
4.1.5 Statistische Auswertung.....	76
4.2 Ergebnisse	77
4.2.1 Nitratkonzentration in Vakuolen von Einzelzellen	77
4.2.2 Gewebeproben	79
5 DISKUSSION	84
5.1 Verteilung von Nitrat in der Pflanze	84
5.2 Nitratreduktion	86
5.3 Nitratakkumulation	88
5.4 Zusammensetzung des osmotischen Potentials in Rübenzellen.....	91
5.5 Einfluss von Klimafaktoren auf den Nitratgehalt.....	93
5.5.1 Strahlung.....	93
5.5.2 Temperatur	95
5.5.3 Wasser.....	96
5.6 Einfluss von Morphologie und Wachstum auf den Nitratgehalt.....	101

5.7 Anbautechnische Maßnahmen zur Verringerung des Nitratgehaltes.....	108
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	110
7 ZUSAMMENFASSUNG	114
8 LITERATURVERZEICHNIS.....	116

1 EINLEITUNG

Die Speisemöhre (*Daucus carota* L. ssp. *sativus*), Familie der Apiaceae, gehört mit einer Anbaufläche von 584000 ha weltweit zu den bedeutendsten Gemüsearten (KRUG 1991). In der Bundesrepublik Deutschland ist die Anbaufläche mit 9375 ha Möhren und Karotten (ZMP 2001) im Vergleich eher gering.

Die Möhre ist zweijährig. Die zwei- bis dreifach fiederteiligen Laubblätter mit verbreitertem Blattgrund bilden eine Rosette. Die Primärwurzel wächst zunächst als Pfahlwurzel bis in Tiefen über 1 m. Danach entwickelt sich aus dem oberen Wurzelteil und dem Hypokotyl durch sekundäres Dickenwachstum die Rübe als Speicherorgan. Dabei schließt sich das Kambium ringförmig zusammen und bildet nach außen sekundäres Phloem (Rinde) und nach innen sekundäres Xylem (Mark). Im sekundären Xylem liegen die Xylemgefäße und entspringen die in vier Rhizostichen angeordneten Seitenwurzeln. Nach außen bildet sich als Abschlussgewebe der Rübe ein dünnes Periderm (FRANKE 1997; KRUG 1991).

Der ernährungsphysiologische Wert der Möhre liegt vor allem in ihrem hohen Karotinhalt und den nennenswerten Gehalten an Vitamin C, Pektin, Zucker und Kalium. Ätherische Öle, besonders Terpene, bedingen den charakteristischen Möhrengeschmack (FRANKE 1997). Aufgrund dieser Inhaltsstoffe hat die Möhre eine große Bedeutung bei der Herstellung von Diät- und Babynahrung. Hier müssen jedoch die in der Diätverordnung (DIÄTVERORDNUNG 1996) festgelegten Grenzwerte für unerwünschte Inhaltsstoffe, wie z.B. Nitrat, eingehalten werden.

Im Vergleich zu anderen Gemüsearten ist bei Möhren der Nitratgehalt in der Regel gering (Tabelle 1), die Streubreite zeigt jedoch, dass in der Praxis der geltende Nitratgrenzwert von 250 mg NO₃⁻ /kg Frischsubstanz (DIÄTVERORDNUNG 1996) auch erheblich überschritten werden kann.

Tabelle 1: Typische Schwankungsbreite der Nitratgehalte verschiedener Pflanzenarten und -organe (verändert nach MARSCHNER 1985)

Pflanzenart / -organ	mg NO ₃ ⁻ / kg FS
<u>Früchte:</u>	
Tomaten	20 - 100
Gurken	20 - 300
Bohnen	80 - 822
<u>Sprossknollen, Wurzeln:</u>	
Kartoffeln	10 - 150
Möhren	30 - 800
Kohlrabi	205 - 1685
Rettich	261 - 2300
<u>Blätter:</u>	
Möhren	96 - 4739
Tomaten	115 - 6689
Kohlrabi	232 - 4430
Spinat	349 - 3890
Kopfsalat	383 - 3520

Nitrat selbst ist toxikologisch unbedenklich. Die Festlegung eines gesetzlichen Grenzwertes für Nitrat in Diät- und Babynahrung erfolgte jedoch, da mit der Nahrung aufgenommenes Nitrat in der Mundhöhle unter bestimmten Bedingungen zu Nitrit reduziert wird. Nitrit gilt als Verursacher der Methämoglobinämie bei Säuglingen (COMLY 1945) und kann im Magen mit sekundären Aminen kanzerogene Nitrosamine bilden, die wiederum Auslöser für Magenkrebs sein können (TANNENBAUM et al. 1974).

Bis heute konnte der Zusammenhang zwischen der Aufnahme von Nitrat mit der Nahrung und einem erhöhten Risiko für Magenkrebs in epidemiologischen und ernährungswissenschaftlichen Studien jedoch nicht nachgewiesen werden. Teilweise wurde bei erhöhter Nitrataufnahme durch Gemüse, wie z.B. bei Vegetariern, sogar ein sinkendes Risiko für Magenkrebs festgestellt (BOEING 1991; THOROGOOD 1995; KEY et al. 1996; GOLDEN und LEIFERT 1997; WALKER 1997; LEIFERT und GOLDEN 2000). Positive Korrelationen bestanden dagegen zwischen Magenkrebs und der Art der Zubereitung der Nahrung sowie schlechten Hygienestandards (HWANG et al. 1994;

DUNCAN et al. 1997). Mittlerweile wird auch die orale Nitrataufnahme nicht mehr als alleinige Ursache für die Methämoglobinämie bei Säuglingen gesehen, sondern vor allem Infektionen des Magen-Darm-Traktes, die zu einer verstärkten Produktion von Nitrit führen – auch dann, wenn wenig oder kein Nitrat mit der Nahrung aufgenommen wurde (WALKER 1997; AVERY 1999; MCKNIGHT et al. 1999; LEIFERT und GOLDEN 2000).

Einige Veröffentlichungen weisen sogar auf mögliche positive Wirkungen von Nitrat auf die menschliche Gesundheit hin. So besitzt das vom Körper nach der Aufnahme von Nitrat gebildete Nitrit eine hohe antimikrobielle Aktivität gegenüber Pathogenen des Magen-Darm-Traktes, wie z.B. *Salmonella* ssp., *E. coli* oder *Helicobacter pylori*, dem Auslöser der Gastritis (BENJAMIN und MCKNIGHT 1997; DYKHUIZEN et al. 1996+1997+1998). Auch Erreger von Infektionen der Mundhöhle, z.B. *Streptococcus* ssp. und *Lactobacillus* ssp. (Karies) oder *Candida albicans*, wurden durch die Produktion von Nitrit in der Mundhöhle gehemmt (MARSH und MARTIN 1992; DUNCAN et al. 1997; BENJAMIN und MCKNIGHT 1997). MCKNIGHT et al. (1999) berichtet auch von möglichen positiven Wirkungen des mit dem Gemüse aufgenommenen Nitrats auf das Herz-Kreislaufsystem, da Nitrit in Tierversuchen einen blutdrucksenkenden Effekt hatte. Dies könnte eine Ursache für die geringere Häufigkeit von Bluthochdruck und Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems bei Vegetariern sein (KEY et al. 1996).

Diese Ergebnisse könnten das negative Image, das Nitrat in der öffentlichen Diskussion hat, ändern. Die Aufnahme zumindest geringer Nitratmengen scheint nicht nur unschädlich, sondern möglicherweise sogar gesundheitsfördernd zu sein.

Eine Änderung der gesetzlich festgelegten Grenzwerte in Nahrungsmitteln und im Trinkwasser sollte aus mehreren Gründen nicht übereilt erfolgen. Zum einen sollte den Hinweisen auf die positive Wirkung von Nitrat im Gemüse in epidemiologischen und ernährungswissenschaftlichen Studien weiter nachgegangen werden. Zum anderen wurde von MCKINNEY et al. 1997 auf eine mögliche Verbindung zwischen dem Auftreten von Diabetes mellitus bei Kindern und der Aufnahme von Nitrat hingewiesen. Und auch im Hinblick auf die Nitratbelastung des Grundwassers und der Eutrophierung

der Gewässer als Folge von erhöhten Stickstoffeinträgen erscheint eine Änderung der Grenzwerte zur Zeit nicht sinnvoll.

Die industrielle Verwendung der Möhre für Diät- und Babynahrung erfordert in der Bundesrepublik Deutschland die Einhaltung des Grenzwertes für Nitrat. Deshalb ist es für denjenigen, der für den Anbau der Möhren verantwortlich ist, notwendig, die Einflussfaktoren auf den Nitratgehalt zu kennen und zu beurteilen, damit ohne wesentliche Ertragseinbußen der Grenzwert eingehalten und Spitzenwerte vermieden werden können.

Einen großen Einfluss auf den Nitratgehalt von Gemüse hat das Stickstoffangebot (NICOLAISEN und HAAR 1964; SCHUPHAN 1965; NICOLAISEN und ZIMMERMANN 1968; PIMPINI et al. 1971; VENTER 1978; VENTER und FRITZ 1978; VENTER 1979b; WEDLER 1980; RÄBER und KOCHER 1982; PIETERS und van der BOON 1983; HÄHNDEL 1984; GREENWOOD und HUNT 1986; HUNDT et al. 1986a; PASCHOLD und HUNDT 1986; EVERS 1989; PASCHOLD 1989a; NIEUWHOF und JANSEN 1993; MOJE 1997). Nach BRÜCKNER und HARTMANN (1985) sind jedoch bei Möhren Unterschiede in der Nitratakkumulation nicht nur über das Stickstoffangebot zu erklären, da die Beziehung zwischen dem Stickstoffgehalt im Boden und dem Nitratgehalt in der Möhre zur Ernte hin immer geringer wird. Auch in der Praxis treten besonders im Herbst immer wieder Schwierigkeiten bei der Einhaltung des Nitratgrenzwertes auf (HUNDT et al. 1986a; WIEBE, mündl. Mitteilung).

Neben dem Stickstoffangebot des Bodens wirken andere Faktoren wie Klima, Anbau-maßnahmen, Sorteneigenschaften oder der Gesundheitszustand der Pflanzen auf den Nitratgehalt ein. Diese Faktoren liegen teilweise außerhalb des Einflusses des Anbauers. Sie alle beeinflussen die Nitratkonzentration der einzelnen Pflanzenorgane über die Höhe der Nitrataufnahme, die Verteilung innerhalb der Pflanze und die Speicherung und Reduktion des aufgenommenen Nitrats.

Der Nitratgehalt kann also nicht nur über das Stickstoffangebot, sondern auch über kulturtechnische Maßnahmen beeinflusst werden. Eine Produktion nitratarmer Möhren

ist deshalb nur bei exakter Kulturführung und bedarfsgerechter Stickstoffdüngung unter Berücksichtigung von Standort und Klima möglich.

Problemstellung

Um in der Praxis beim Anbau von Möhren größere Sicherheit zur Einhaltung des Grenzwertes von 250 mg NO₃⁻/kg FS zu erhalten, wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens aufeinander abgestimmte Versuche an drei Orten durchgeführt. Ziel war, die Wirkung möglichst vieler verschiedener Faktoren auf die Höhe des Nitratgehaltes bei Möhren zu prüfen und daraus Grundlagen für ein Produktionssystem abzuleiten, das dem Anbauer größtmögliche Sicherheit bei der Produktion von Möhren mit niedrigem Nitratgehalt bietet. Das Forschungsvorhaben gliederte sich nach Standorten unterteilt in drei Teilbereiche, Hannover-Ahlem, Großbeeren und Hannover, mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten.

Am Standort Hannover-Ahlem fanden Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf des Stickstoffbedarfes von Möhren, standortabhängiger Stickstoffnachlieferung von Böden und dem Nitratgehalt im Erntegut statt. Außerdem sollten Prognoseverfahren für die Stickstoffmineralisierung überprüft werden. Die Ergebnisse wurden bei MOJE (1997) veröffentlicht.

Am Standort Großbeeren wurden Versuche zum Einfluss der Stickstoffdüngung und Beregnung auf Inhaltsstoffe und den Nitratreintrag ins Grundwasser durchgeführt, sowie geprüft, ob wesentliche Sortenunterschiede im Hinblick auf den Nitratgehalt bestehen und für die Züchtung neuer Sorten geeignete genetisch bedingte Unterschiede vorhanden sind. Die Ergebnisse dieses Teilbereiches sind bei GUTEZEIT und SCHEUNEMANN (1995) publiziert worden.

Im vorliegenden dritten Teilbereich, wurde der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Nitratakkumulation von Möhren geprüft. Der Schwerpunkt lag hier bei Faktoren, die von außen nicht oder nur begrenzt verändert werden können. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum Speicherverhalten von Nitrat in der Rübe und zum Zusammenhang zwischen Morphologie, Wachstum und Nitratgehalt durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit war es,

- Aufnahme, Verteilung und Akkumulation von Nitrat in der Möhre, insbesondere der Rübe, zu beschreiben;
- Faktoren neben dem Stickstoffangebot zu prüfen, die die Nitratakkumulation beeinflussen;
- Wachstum und Morphologie der Möhre darzustellen und zu prüfen, ob Zusammenhänge zwischen morphologischen Merkmalen und dem Nitratgehalt bestehen.

Versuchsprogramm

Basierend auf dieser Zielsetzung wurden Versuche durchgeführt, die drei Komplexen zugeordnet werden können:

1. Der Einfluss des Klimas und einiger anbautechnischer Maßnahmen auf den Nitratgehalt, die Nitratverteilung und das Wachstum von Möhren.
2. Der Vergleich von Sortenunterschieden und ihr Einfluss auf den Nitratgehalt der Rübe.
3. Die Untersuchung der Nitratkonzentration in den Vakuolen von Zellen der Rübe.

Der Einfluss von Klimafaktoren, d.h. Strahlung, Sättigungsdefizit, Temperatur und Bodenfeuchte, wurde in Gefäßversuchen in Klimakammern, im Gewächshaus und im Freiland geprüft. Die Untersuchungen der anbautechnischen Maßnahmen fanden zum Teil im Rahmen der Versuche zum Einfluss der Klimafaktoren statt, außerdem wurde ein Feldversuch angelegt. Geprüft wurde die Möglichkeit der Senkung des Nitratgehaltes durch das Auswaschen von Nitrat mit Hilfe einer einmaligen starken Beregnung vor der Ernte sowie das Unterschneiden der Wurzeln und das Entfernen des Laubes.

Im zweiten Versuchskomplex wurde das Wachstum der Industriesorte *'Karotan'* und der Frischmarktsorte *'Ingot'* verglichen. Der erste Versuch wurde in durchsichtigen Kunststoffröhren durchgeführt und sollte die zeitliche und räumliche Verteilung des Wurzelsystems der Möhre zeigen. Der zweite Versuch, ein Feldversuch, wurde durchgeführt, um exemplarisch zu untersuchen, ob Sortenunterschiede bestehen und inwieweit diese

durch unterschiedliche Anbaumaßnahmen wie Aussattermin, Bestandesdichte oder Erntetermin beeinflusst werden können.

Im dritten Komplex wurde das Speicherverhalten für Nitrat in der Rübe untersucht. Dazu wurde die Rübe der Möhre in zwei Bereiche, Mark und Rinde, unterteilt und mit einer modifizierten Druckmess-Sondentechnik die Veränderung der Nitratkonzentration in den Vakuolen der Zellen in beiden Bereichen der Rübe bei steigendem Stickstoffangebot gemessen.

Eine Übersicht über alle Versuche und ihre Fragestellungen gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Versuchsübersicht

Versuchskomplex	Fragestellung	Abk.*
1 Klima und Anbau	Einfluss von Strahlung und Stickstoffangebot	K1
	Einfluss von Sättigungsdefizit und Strahlung	K2
	Einfluss von Temperatur	K3
	Einfluss von Bodenwasserpotential	G1
	Einfluss von Beregnung (nach Bodenwasserpotential-Sollwerten), Auswaschung vor der Ernte, Stickstoffangebot und Sorte	F1
	Anbaumaßnahmen zur Veränderung des Nitratgehaltes	F2
2 Morphologie	Vergleich des Wurzelwachstums zweier Sorten	G2
	Vergleich des Laub- und Rübenwachstums zweier Sorten	F3
3 Vakuolenkonzentration	Nitratkonzentration in Zellen von Mark und Rinde bei steigendem Stickstoffangebot	K4

* (F = Freiland, K = Klimakammer, G = Gewächshaus)

Benennung der Pflanzenteile

Im weiteren Text werden für die einzelnen Teile der Pflanze folgende Begriffe verwendet:

Die gesamte Pflanze wird als **Möhre** bezeichnet, die weiter in **Laub** und **Rübe** unterteilt wird. Das Laub umfasst den gesamten Blattapparat, der sich wiederum in **Blattspreite** und **Blattstiel** aufteilt. Bei der Rübe wird zwischen dem inneren **Mark** und der äußeren **Rinde** unterschieden.

Bei den Einzelzellanalysen wurden Proben aus vier Bereichen in der Rübe entnommen. Der Bereich des Marks, der dem Kambium direkt benachbart ist, wird als **kambiales Mark** und der im Zentrum der Rübe liegende als **inneres Mark** bezeichnet. Analog dazu befindet sich auf der Rindenseite des Kambiums die **kambiale Rinde** sowie am äußeren Rand der Rübe die **äußere Rinde**.

2 EINFLUSS VON KLIMAFAKTOREN UND ANBAU- TECHNISCHEN MASSNAHMEN

Neben dem Stickstoffangebot haben insbesondere die Klimafaktoren einen großen Einfluss auf den Nitratgehalt von Möhren. Der Möhrenanbauer hat jedoch wenig Möglichkeiten, sie zu beeinflussen, und wenn, dann nur über indirekte Maßnahmen, wie z.B. die Auswahl des Erntezeitpunkts oder das Einsetzen einer Beregnung. Für die Produktion von nitratarmen Möhren ist es deshalb wichtig, die Wirkung der Klimafaktoren auf den Nitratgehalt abschätzen zu können.

Im Gegensatz zu anderen Gemüsearten, wie z.B. Spinat oder Salat, liegen für Möhren wesentlich weniger Versuche vor, in denen der Einfluss des Klimas auf den Nitratgehalt untersucht wurde. Außerdem wurden die wenigen Versuche mit Möhren im Freiland durchgeführt. Dort treten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren, wie z.B. Temperatur und Strahlung, auf. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Versuche in Klimakammern durchgeführt, die es ermöglichten, die Wirkung von Strahlung, Temperatur und Luftfeuchte auf den Nitratgehalt in der Möhre zu bestimmen. Zum Einfluss von Bodenfeuchte und Beregnung wurden Versuche im Gewächshaus und im Freiland durchgeführt.

Anbautechnische Maßnahmen sind für den Anbauer eine Möglichkeit, den Nitratgehalt aktiv zu beeinflussen, haben jedoch nur einen Sinn, wenn sie zuverlässig wirken. In dieser Arbeit wurde deshalb die Wirkung einer einmaligen Bewässerung vor der Ernte zur Auswaschung von Stickstoff aus dem Boden, das Unterschneiden der Rübe und das Entfernen des Laubes in Feldversuchen überprüft.

2.1 Strahlung, Sättigungsdefizit und Temperatur

2.1.1 Material und Methoden

2.1.1.1 Sorten

Für die Versuche zum Einfluss von Strahlung, Sättigungsdefizit und Temperatur auf den Nitratgehalt von Möhren wurde die Sorte 'Ingot' (Sperling), eine mittelfrühen Frischmarktsorte, verwendet.

2.1.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in Klimakammern (1.8 m x 2.2 m \approx 4 m², Höhe 2.2 m) durchgeführt, in denen Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte und CO₂-Gehalt geregelt werden konnten (Versuchseinstellungen siehe Tabelle 3 und Tabelle 5). Zur Belichtung wurden Leuchtstofflampen „Cool White“ (215 W) und Glühlampenzusatzlicht (18 %) eingesetzt. In jeder Kammer befanden sich drei Gitterrosttische, auf denen je sechs Kulturgefäße (Inhalt 8 l) nach System Kick-Brauckmann standen (KICK und GROSSE-BRAUCKMANN 1961, Abbildung 1).

Als Substrat diente zunächst Blähton (\varnothing 4-6 mm). Da Blähton die Form der Rübe ungünstig beeinflusste, und außerdem durch seine hohe Speicherkapazität für Wasser und das darin gelöste Nährstoffe eine kurzfristige Änderung der Nährlösungszusammensetzung nicht möglich war, wurde in allen weiteren Versuchen gewaschener Quarzsand (\varnothing 0.1-0.4 mm) verwendet.

Die Kulturgefäße je eines Tisches waren am Wasserablauf über Schläuche mit einem Nährlösungsbehälter verbunden, so dass die Nährlösung für jeden Tisch (= 6 Kulturgefäße) einzeln variiert werden konnte (Abbildung 2). Die Bewässerung erfolgte über eine zeitgesteuerte Anstauautomatik, die die Nährlösung in den Töpfen viermal pro Tag auf eine Höhe von 15 cm anstaute.

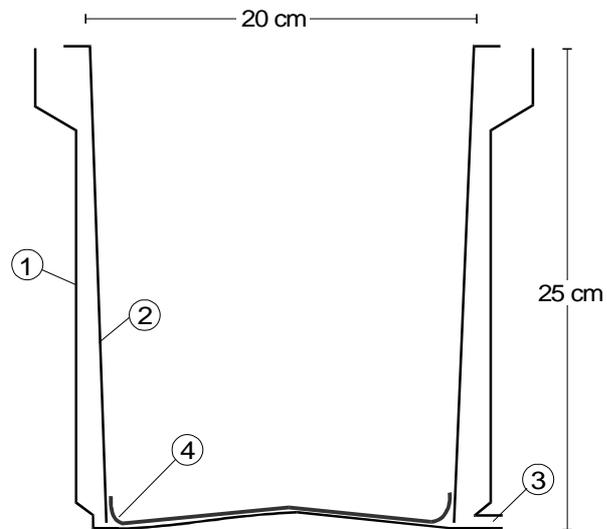


Abbildung 1: Kulturgefäß nach Kick-Brauckmann. • Außengefäß, , Innengefäß ohne Boden, *f* Anschluss zum Anstausystem, Wasserablauf ,,, Vlies (nach KICK und GROSSE-BRAUCKMANN 1961)

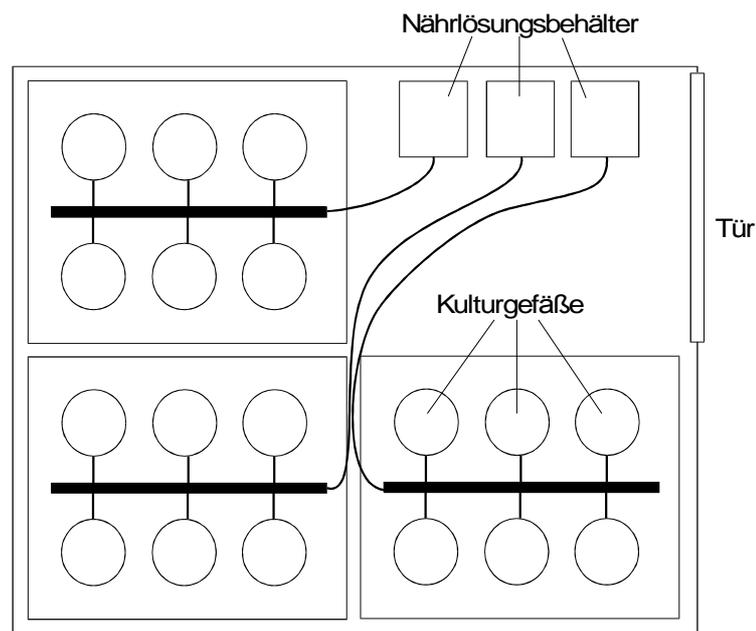


Abbildung 2: Anstauautomatik und Gefäßaufstellung in den Klimakammern

Pro Gefäß wurden 36 Samen ausgelegt. Die Töpfe wurden sofort nach der Aussaat in den Klimakammern aufgestellt, mit Wasser angegossen und bis zum Auflaufen mit Folie abgedeckt. Nach dem Auflaufen wurde die Anzahl der Pflanzen pro Gefäß auf 18 reduziert und die Gefäße an das Anstausystem angeschlossen.

Die Klimabedingungen während der Vorkultur zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Klimabedingungen während der Vorkultur in der Klimakammer

	vor dem Auflaufen	nach dem Auflaufen
Temperatur (Tag/Nacht)	20/20 °C	18/14 °C
Sättigungsdefizit (Tag/Nacht)	0.47/0.47 kPa	0.62/0.48 kPa
rel. Luftfeuchte	80 %	70 %
Strahlung (PAR)	225· $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	225· $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Länge der Tagphase	12 h	12 h
CO ₂ -Gehalt	400 ppm	400 ppm

Als Dünger wurde ein wasserlöslicher Volldünger (FLORY 9 Hydro, Euflo) verwendet (Tabelle 4). Bis zum Fünf-Blatt-Stadium wurde die Nährlösung im Verhältnis 1:2 verdünnt. In den Versuchen zum Einfluss der Strahlung (K1) und des Sättigungsdefizites (K2) wurde zusätzlich eine Stickstoffmangellösung eingesetzt (Tabelle 4).

Da innerhalb der Klimakammern die Strahlung (PAR, gemessen in 1.2 m Höhe) nicht gleichmäßig verteilt war (KRUG und WIEBE 1972), wurde die Strahlungsverteilung bei der Versuchsanordnung berücksichtigt, um den Versuchsfehler zu minimieren. Dazu wurde jede Kammer nach der Strahlungsverteilung in drei Zonen aufgeteilt und der Standort des Gefäßes in die Auswertung mit einbezogen.

Für die Ernte wurden die Möhren gezogen, gewaschen, abgetrocknet und in einzelne Teile aufgeteilt (Tabelle 5). Die Pflanzen eines Gefäßes wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst. Pro Probe gingen 18 Pflanzen in die Analyse ein.

Die Varianten und Auswertungstermine der Klimakammerversuche zeigt Tabelle 5.

Tabelle 4: Elementzusammensetzung der Nährlösungen

	Standardlösung	N-Mangellösung
NO ₃ ⁻ -N	7.0 mol·m ⁻³	-
NH ₄ ⁺ -N	3.5 mol·m ⁻³	-
P	1.0 mol·m ⁻³	4.6 mol·m ⁻³
K	4.5 mol·m ⁻³	4.5 mol·m ⁻³
Mg	1.5 mol·m ⁻³	1.5 mol·m ⁻³
B	0.0085 mol·m ⁻³	0.010 mol·m ⁻³
Cu	0.0003 mol·m ⁻³	0.003 mol·m ⁻³
Fe	0.0214 mol·m ⁻³	0.010 mol·m ⁻³
Mn	0.0091 mol·m ⁻³	0.010 mol·m ⁻³
Zn	0.0015 mol·m ⁻³	0.003 mol·m ⁻³
Mo	0.0005 mol·m ⁻³	0.003 mol·m ⁻³

Tabelle 5: Versuchsvarianten und Auswertungstermine der Klimakammerversuche

Versuch	K 1	K 2	K 3
Variierter Faktor	Strahlung	Strahlung u. Sättigungsdefizit	Temperatur
Strahlung (PAR)	150, 225, 300 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	30, 300 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	225 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹
Temperatur (Tag/Nacht)	18/14 °C	18/14 °C	10/6 °C 14/10 °C 18/14 °C
Sättigungsdefizit (RLF)	0.62/0.48 kPa (70 % RLF)	1.24/0,96 kPa 0.21/0.16 kPa (40, 90 % RLF)	0.62/0.48 kPa (70 % RLF)
CO ₂ -Gehalt	400 ppm	400 ppm	400 ppm
N-Angebot	unverändert	N-Mangellösung	unverändert
1. Ernte	67. Tag	80. Tag	76. Tag
letzte Ernte	114. Tag	88. Tag	147. Tag
Erntetermine	7	5	5
Analysierte Pflanzenteile	Laub Mark Rinde	Blattspreite Blattstiel Möhre	Blattspreite Blattstiel Mark Rinde

2.1.1.3 Analytik

a) Nitrat

Die Nitratanalyse erfolgte mit einer ionensensitiven Elektrode, die sowohl für die Nitratbestimmung in getrocknetem Pflanzenmaterial als auch im Frischsaft eingesetzt werden kann (PAUL und CARLSON 1968; BAKER und SMITH 1969; DRESSEL 1976; KÜNSCH et al. 1981; TEMPERLI 1983; KOLBE und MÜLLER 1984; ANONYM 1994a). Sie ermöglicht auch bei einer großen Anzahl von Proben eine zuverlässige, schnelle und preiswerte Nitratbestimmung (KÜNSCH et al. 1981; LANGE 1981).

Prinzip

Die Nitratbestimmung mit der ionensensitiven Elektrode ist ein direktpotentiometrisches Verfahren, bei dem das Elektrodenpotential gemessen wird, das sich zwischen der ionensensitiven Elektrode und der Referenzelektrode einstellt. Wenn keine äußeren Störeinflüsse vorliegen, verläuft die entstehende Mess-Spannung umgekehrt proportional dem Logarithmus der Nitratkonzentration.

Ausschaltung von Störionen

Die für die ionensensitive Elektrode relevanten Störionen bei der Bestimmung von Nitrat in Pflanzenproben sind fast ausschließlich organische Ionen und Chloride (BAKER und SMITH 1969).

Um organische Störionen auszuschalten wurde der Messlösung Aluminiumsulfat (ISA) zugegeben. Durch die Zugabe von Aluminiumsulfat werden der pH-Wert der Messlösung gesenkt, die Dissoziation vieler Säuren verhindert und außerdem stabile Komplexe zwischen Aluminiumionen und organischen Anionen gebildet, so dass Wechselwirkungen zwischen organischen Anionen und der Elektrode vermieden werden (PAUL und CARLSON 1968; BAKER und SMITH 1969; MILHAM et al. 1970; KOLBE und MÜLLER 1984).

Chloride können besonders bei geringen Nitratkonzentrationen zu überhöhten Messwerten führen. Um Chloride auszufällen, wird in der Regel die Zugabe von Silbersulfat empfohlen (PAUL und CARLSON 1968; BAKER und SMITH 1969; KOLBE und MÜLLER

1984; KOLBE et al. 1993). Auf eine Verwendung von Silbersulfat wurde in dieser Arbeit jedoch verzichtet, da vergleichende Untersuchungen mit Möhrenextrakten (Ergebnisse nicht dargestellt) durchgeführt wurden, in denen nur geringe und tolerierbare Abweichungen gemessen wurden. Auch bei Untersuchungen von KOLBE et al.(1993) wurde der Nitratgehalt in Trockensubstanzproben aus der Rübe von Möhren nur um ca. 2 % überschätzt, wenn kein Silbersulfat verwendet wurde. LANGE (1981) fand ebenfalls nur in gesalzenen Halbfertigprodukten aus Möhren ausreichend hohe Chloridgehalte, um die Elektrode zu stören und Nitratgehalte zu überschätzen.

Probenaufbereitung

Das Möhrenlaub wurde im Trockenschrank einen Tag bei 50 °C und anschließend bei 100 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Trocknung wurden die Proben mit einer Labor-Schneidemühle (Siebweite 1 mm) gemahlen und bis zur Analyse in Gläsern kühl und dunkel gelagert.

Für die Bestimmung des Nitratgehaltes in Mark und Rinde wurde je Probe eine Teilprobe von ca. 300 g Frischsubstanz eingewogen und im Anschluss daran gefriergetrocknet (Beta I, Christ). Der Trockensubstanzgehalt der Frischsubstanz (% TS i.d. FS) wurde durch Auswiegen des gefriergetrockneten Materials bestimmt. Da bei den gefriergetrockneten Proben aufgrund von Restfeuchte der so bestimmte Trockensubstanzgehalt um ca. 5 % höher lag als bei Proben, die im Trockenschrank bei 100 °C getrocknet wurden, wurde parallel dazu von diesen Proben je eine Teilprobe im Trockenschrank bei 100 °C nachgetrocknet. Alle Analysenwerte wurden auf die bei 100 °C ermittelte Trockensubstanz bezogen. Im Anschluss an die Trocknung wurde das Material mit einer Labormörsermühle gemahlen und bis zur Analyse in Gläsern kühl und dunkel gelagert.

Die Bestimmung des Nitratgehaltes in der ganzen Rübe erfolgte im Frischsaft. Dazu wurden die Rüben mit einem Haushaltsensafter entsaftet. Die Nitratanalyse erfolgte unmittelbar anschließend.

Messung

Als Reagenzien wurden verwendet:

- Ionenstärkeausgleichslösung (ISA): 0.9 m $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$
- Extraktionslösung: 1 % $\text{KAl}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
- Eichlösung: KNO_3
- für die Elektrode: gesättigte KCl-Lösung
0.04 m $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Bestimmung aus der Trockensubstanz:

Pro Analyse wurden 150-250 mg Trockensubstanz eingewogen, mit 50 ml Extraktionslösung versetzt, 20 min geschüttelt und anschließend filtriert. Dem Filtrat wurde vor der Messung als Ionenstärkeausgleichslösung eine 0.9 m Aluminiumsulfatlösung im Verhältnis 1:10 zugegeben.

Zur Nitratanalyse wurde eine ionensensitive Elektrode (gebrauchsfertig) und eine Doppelkammer-Referenzelektrode sowie das Messgerät verwendet. Die innere Kammer der Referenzelektrode enthielt gesättigte KCl-Lösung, die wöchentlich erneuert wurde. Die äußere Kammer musste täglich mit 0.04 m Ammoniumsulfatlösung als Brückenelektrolyt gefüllt werden.

Nach Eichung des Gerätes mit KNO_3 -Standards, denen ebenfalls ISA im Verhältnis 1:10 zugefügt wurde, wurden die Messwerte bestimmt.

Bestimmung im Frischsaft:

Der Frischsaft wurde filtriert. 5 ml des so entstandenen Filtrats wurden mit 4 ml 1% Kaliumaluminiumsulfatlösung sowie 1 ml ISA gemischt. Die Messung erfolgte wie bei der Bestimmung des Nitratgehaltes aus der Trockensubstanz.

Reproduzierbarkeit

Ein Vergleich zwischen den Nitratgehalten aus gefriergetrockneten Proben und den im Frischsaft ermittelten ergab ein hohes Maß an Übereinstimmung (Tabelle 6). Auch nach Lagerung der Proben traten zwischen den gleichen Proben nur geringe Differenzen auf. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse als Voraussetzung zur Verwendung eines

Analyseverfahrens war bei Verwendung der elektronensensitiven Elektrode also ausreichend gegeben.

Tabelle 6: Einfluss von Probenaufbereitung und Lagerung gefriergetrockneter Proben auf den Nitratgehalt in der Rübe von Möhren

Probe	Frischsaft	Gefriertrocknung frisch	Gefriertrocknung gelagert*
1	458	464	481
2	491	473	479
3	435	477	493
4	531	485	546
5	570	528	601
6	602	569	502
7	606	576	581
8	686	667	659
9	620	680	714
10	744	751	801
Mittelwert	574	567	589
Stdabw.	98.2	101.3	109.5
%	100	98.7	102

* 2 Monate in Gläsern, dunkel, 12 °C

Auch der Vergleich der Nitratbestimmung mittels ionensensitiver Elektrode mit anderen Methoden ergab in der Literatur gute Übereinstimmungen, z.B. mit der Wasserdampfdestillation (BEHR 1988), der Hochdruck-Chromatographie (KNIEL et al. 1992; MOJE 1997), der Cd-Reduktions-Methode (KOLBE et al. 1993), der mikrobiologischen Reduktion (BAKER und SMITH 1969; KOLBE und MÜLLER 1984; KNIEL et al. 1992; KOLBE et al. 1993) sowie der Xylenolmethode (DRESSEL 1976; LANGE 1981; KOLBE und MÜLLER 1984).

b) Gesamtstickstoff

Der Gesamtstickstoffgehalt wurde im gefriergetrockneten Pflanzenmaterial nach Kjeldahl bestimmt. Die Aufbereitung des Pflanzenmaterials erfolgte wie in Kapitel 2.1.1.3a) für die Bestimmung von Nitrat aus der Trockensubstanz beschrieben. Der

Aufschluss wurde mit Salizylsäure und konzentrierter Schwefelsäure durchgeführt (NELSON und SOMMERS 1973).

c) Saccharose, Glucose, Fructose

Der Saccharose-, Glucose- und Fructosegehalt wurde im gefriergetrockneten Pflanzenmaterial mittels des enzymatischen Tests von Boehringer Mannheim (ANONYM 1994b) bestimmt. Die Aufbereitung des Pflanzenmaterials erfolgte wie in Kapitel 2.1.1.3a) für die Bestimmung von Nitrat aus der Trockensubstanz beschrieben. Vor der Messung wurde eine Carrez-Klärung durchgeführt (ANONYM 1994b).

2.1.1.4 Statistische Auswertung

Die Messdaten der Versuche zum Einfluss von Strahlung, Sättigungsdefizit und Temperatur auf den Nitratgehalt von Möhren wurden varianzanalytisch ausgewertet. Dazu wurden mehrfaktorielle Varianzanalysen mit einfacher Besetzung gerechnet. Die Streuung wurde in die Hauptkomponenten zerlegt, der Streuungsanteil der Wechselwirkungen im Fehler zusammengefasst und die Hauptwirkungen gegen diesen Term getestet (KÖHLER et al. 1984). Nach den Varianzanalysen wurden Mittelwertvergleiche mit dem t-Test durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 5 %.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

2.1.2 Ergebnisse

a) Strahlung (K1)

Durch den engen Zusammenhang von Photosynthese und Nitratreduktion hat die Strahlung großen Einfluss auf den Nitratgehalt. Für viele Gemüsearten, insbesondere Blattgemüse, belegen zahlreiche Veröffentlichungen die negative Korrelation zwischen Strahlung und Nitratgehalt. Wichtig bei der Möhre ist jedoch der Nitratgehalt in der Rübe, in der keine Photosynthese stattfindet.

Im folgenden Versuch sollte deshalb die Reaktion des Nitratgehaltes und einiger anderer Inhaltsstoffen auf unterschiedliche Strahlung untersucht werden.

Ertrag

Die unterschiedlichen Strahlungsstufen beeinflussten sowohl den Laub- als auch den Rübenenertrag nicht signifikant (Abbildung 3). Der Laubertrag nahm bis zum Versuchsende fast linear zu. Der Rübenenertrag lag zu Versuchsbeginn geringfügig unter dem Laubertrag, stieg dann exponentiell an und lag am Versuchende über dem Laubertrag. Nach einer über 50 Tage andauernden Behandlung mit unterschiedlicher Strahlung wäre ein signifikanter Einfluss zu erwarten gewesen. Tendenziell ist ein Einfluss der Strahlung erkennbar, der aber wahrscheinlich aufgrund nicht optimaler Versuchsbedingungen nicht statistisch abgesichert werden konnte. Darauf deutet auch der relativ schwache Zuwachs während der Versuchszeit hin. Zum Zeitpunkt der Ernte waren die Rüben insgesamt noch sehr klein und hatten das für eine marktfähige Frischmarktmöhre zur Ernte übliche Mindestgewicht von 50 g (KRUG 1991) noch nicht erreicht.

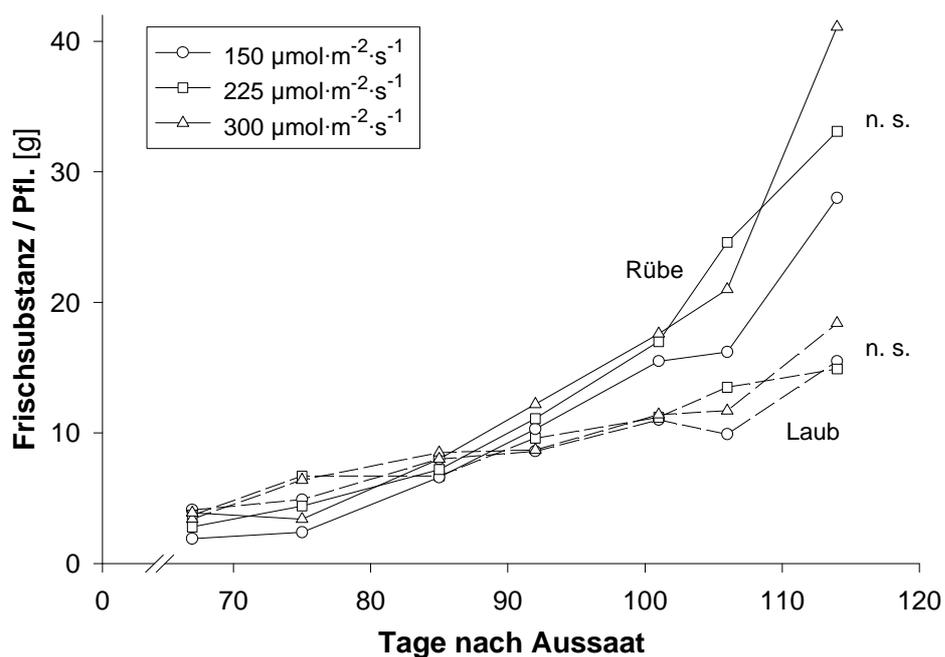


Abbildung 3: Einfluss der Strahlung (PAR) auf den auf den Ertragsverlauf von Laub und Rübe (K1)

Nitratgehalt

Im Gegensatz zum Ertrag hatte die Variation der Strahlung Auswirkungen auf den Nitratgehalt. Zunehmende Strahlung von 150 auf 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR verringerte den Nitratgehalt sowohl im Laub als auch in der Rübe signifikant (Abbildung 4). Der Nitratgehalt in der Rübe nahm während des Versuchszeitraumes in allen drei Strahlungsstufen ab (Abbildung 4).

An allen Auswertungsterminen lagen die Nitratgehalte in der Rübe weit über dem für Diät- und Babynahrung festgelegten Grenzwert von 250 mg NO_3^-/kg FS.

Gesamtstickstoffgehalt

Der Gesamtstickstoffgehalt nahm sowohl im Laub als auch in der Rübe in allen drei Strahlungsstufen ab (Abbildung 5). Der Einfluss der Strahlung war nicht signifikant.

Saccharose-, Fructose- und Glucosegehalt

Der Gehalt an Zuckern wurde nur am letzten Auswertungstermin und nur in der Rübe im Mark und der Rinde bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Rinde im Vergleich zum Mark einen höheren Gehalt an Zuckern, besonders an Monosacchariden (Abbildung 6). Insgesamt nahm der Zuckergehalt mit steigender Strahlung zu. Dabei reagierte vor allem der Saccharoseanteil auf die veränderten Strahlungsbedingungen, während sich der Glucose- und Fructoseanteil in Abhängigkeit von der Strahlung nicht signifikant veränderte.

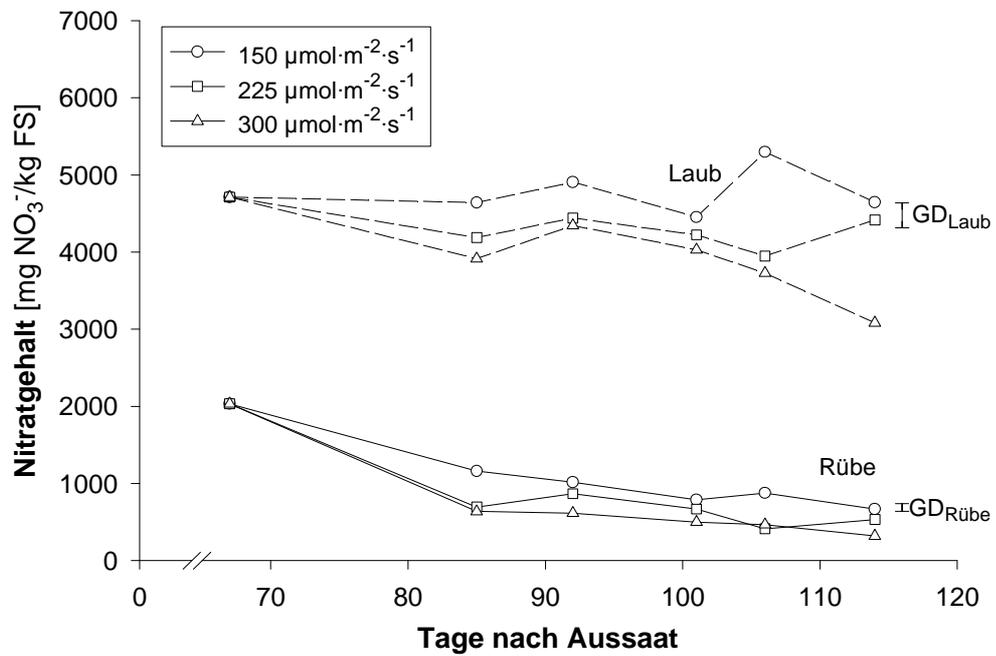


Abbildung 4: Einfluss der Strahlung (PAR) auf den Verlauf des Nitratgehaltes in Laub und Rübe (K1)

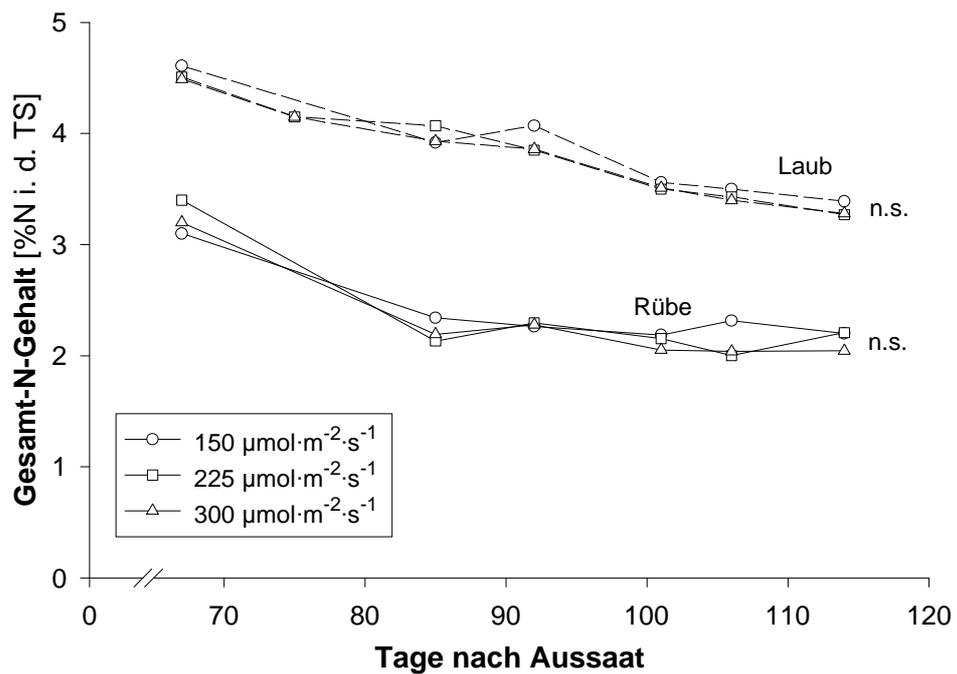


Abbildung 5: Einfluss der Strahlung (PAR) auf den Verlauf des Gesamtstickstoffgehaltes von Laub und Rübe (K1)

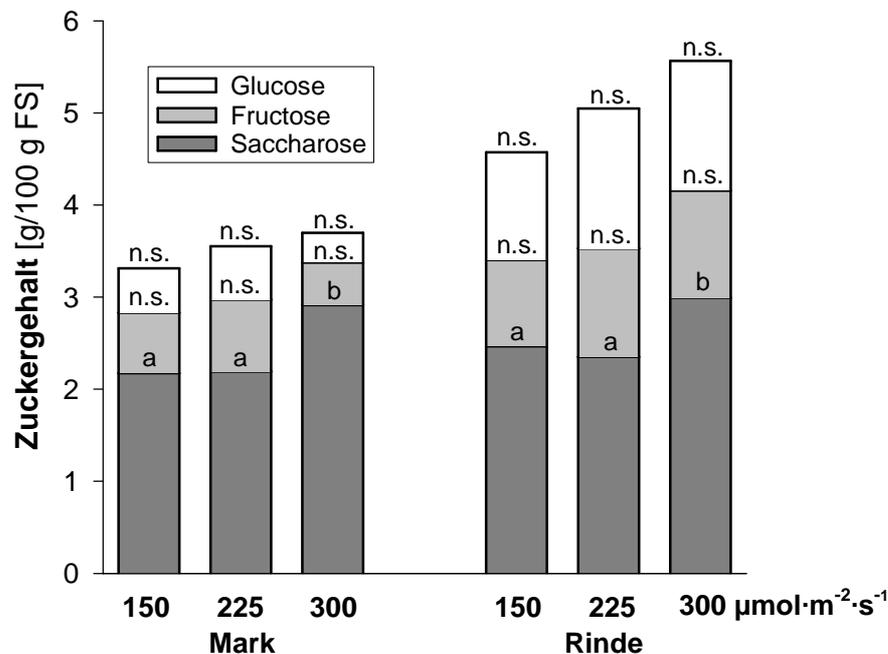


Abbildung 6: Zuckergehalt in der Rübe am letzten Auswertungstermin in Abhängigkeit von der Strahlung (PAR) (K1, 114. Tag)

b) Sättigungsdefizit und Strahlung (K2)

Nitrat wird im Transpirationsstrom transportiert. Die Transpiration ist die Folge des bestehenden Dampfdruckgefälles zwischen Pflanze und Atmosphäre und ist von der Pflanze über die Öffnung der Schließzellen regulierbar. Die Öffnungsweite der Spaltöffnungen und damit die Höhe der Transpiration ist von Außenfaktoren, besonders von der Strahlung und der Luftfeuchtigkeit abhängig. Der Einfluss des Sättigungsdefizites auf den Nitratgehalt wurde deshalb bei zwei Strahlungstufen (30, 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR) geprüft. Während des Versuchszeitraumes veränderte sich das Frischgewicht der Pflanzen nicht signifikant. Das Laubfrischgewicht betrug 6.3 g, das Frischgewicht der Rübe 16.5 g. Zu Beginn des Versuches wurde auf eine stickstofffreie Nährlösung umgestellt (siehe Tabelle 5). Nach der Umstellung wurde erwartet, dass der Nitratgehalt bei hohem Sättigungsdefizit schneller sinkt, da dann bei erhöhter Transpiration im Transpirationsstrom kein Nitrat mehr nachgeliefert wird. Diese Annahme wurde durch die Ergebnisse nicht bestätigt (Abbildung 7).

Eine Differenzierung des Sättigungsdefizit hatte keinen signifikanten Einfluss auf den

Nitratgehalt in der Rübe und im Laub. Die Erhöhung der Strahlung und die Reduzierung des Stickstoffangebotes hatte jedoch in allen Pflanzenteilen eine Abnahme des Nitratgehaltes zur Folge. Wie schon im vorherigen Versuch (K1) wurde der Nitratgehalt in allen drei Pflanzenteilen in der höheren Strahlungsstufe und bei Stickstoffmangel signifikant verringert. Bei der geringeren Strahlung von $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR blieb der Nitratgehalt trotz Umstellung auf eine N-Mangellösung unverändert.

Durch den Zusammenhang zwischen Photosynthese und Nitratreduktion war anzunehmen, dass in den untersuchten Pflanzenteilen die durch die höhere Strahlung bewirkte Nitratabnahme nicht zeitgleich einsetzt, sondern im Laub zuerst beginnt. Anhand der Variante $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR / 0.2 kPa, die am stärksten auf die Behandlung reagierte, wurde die prozentuale Abnahme des Nitratgehaltes in der Rübe, der Blattspreite und dem Blattstiel berechnet (Abbildung 8). In allen drei Pflanzenteilen sank der Nitratgehalt während des Versuches innerhalb von 8 Tagen auf ungefähr 30 % des ursprünglichen Wertes. In der Blattspreite wurde dieser Wert schon am 4., im Blattstiel und in der Rübe erst am 6. Tag nach Versuchsbeginn erreicht. Die Blattspreite reagierte also am schnellsten auf die erhöhte Strahlung und das herabgesetzte Nitratangebot. In der Rübe erfolgte wie erwartet die langsamste Abnahme.

Obwohl im Blattstiel die Xylemgefäße liegen, in denen die Konzentrationsänderung schnell deutlich werden müsste, reagierte er langsamer als die Blattspreite. Der Blattstiel hat einen sehr hohen Nitratgehalt (Abbildung 7), denn er besteht zum größten Teil aus Xylemgefäßen und dem umgebenden Xylemparenchym. Das in den Vakuolen des Xylemparenchyms gespeicherte Nitrat wird jedoch nur langsam mobilisiert (SHANER und BOYER 1976a).

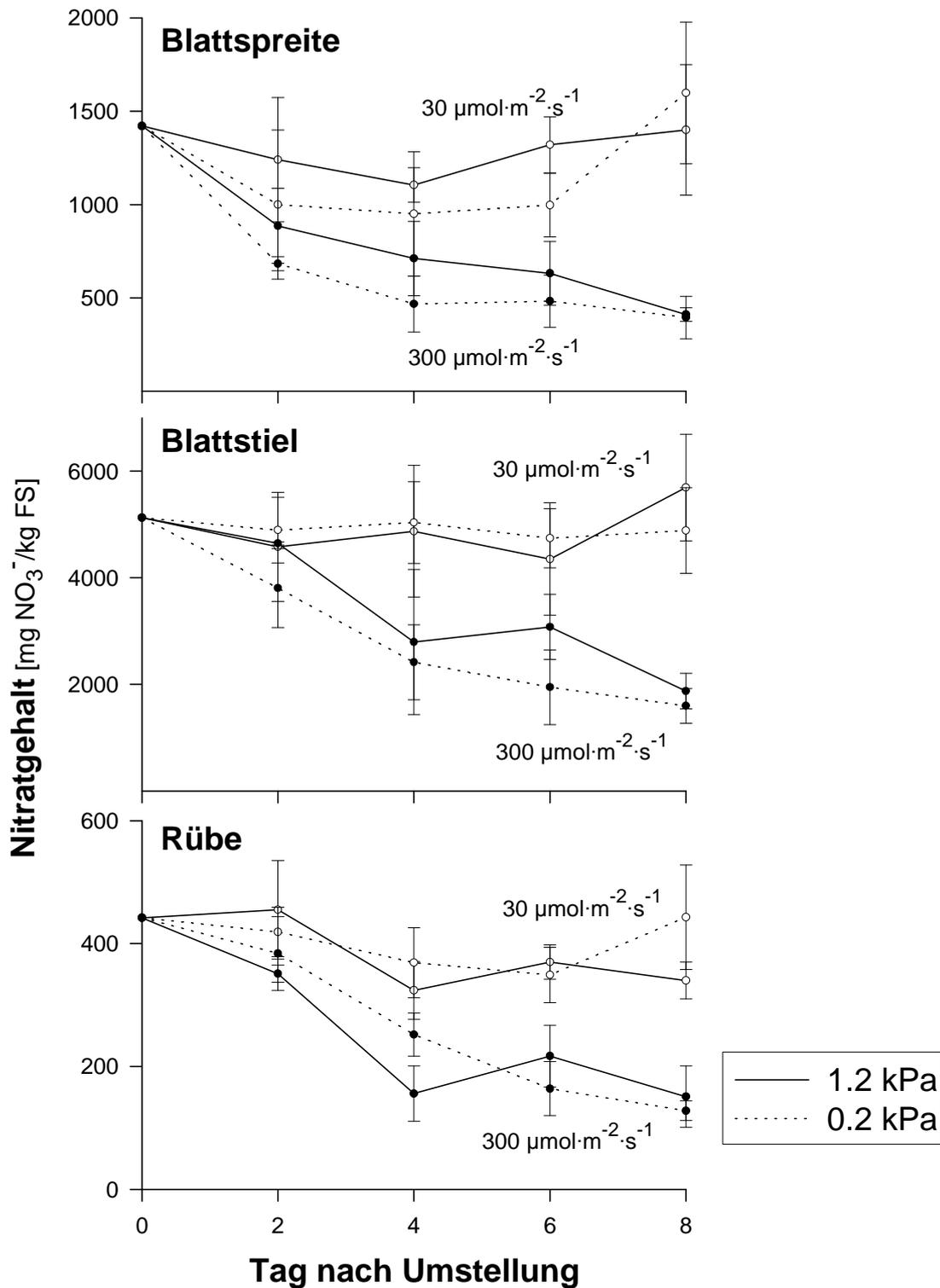


Abbildung 7: Einfluss des Sättigungsdefizits und der Strahlung (PAR) auf den Nitratgehalt in Blattspreite, Blattstiel und Rübe nach Umstellung auf eine stickstofffreie Nährlösung (K2)

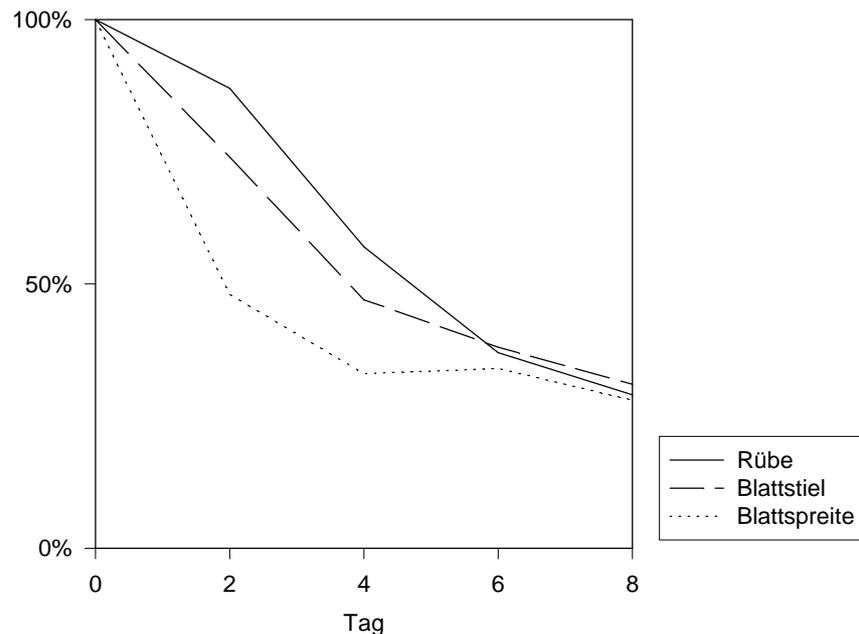


Abbildung 8: Prozentuale Abnahme des Nitratgehaltes nach Umstellung auf eine stickstofffreie Nährlösung (K2, Variante $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR, 0.2 kPa)

c) Temperatur (K3)

Die Temperatur ist derjenige Klimafaktor, der in Feldversuchen oft nicht eindeutig von der Strahlung abgegrenzt werden kann. Im folgenden Versuch wurde deshalb in der Klimakammer bei konstanter Strahlung der Einfluss verschiedener Temperaturstufen auf den Nitratgehalt geprüft.

Bis zu Versuchsbeginn lag die Temperatur bei 18/14°C.

Frischgewicht

Zwischen 10 und 18°C hatte die Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf das Frischgewicht von Laub und Rübe. Während des Versuchszeitraumes stieg in allen Temperaturstufen das Gewicht der Rübe nahezu linear an, das Laubgewicht veränderte sich nicht (Abbildung 9).

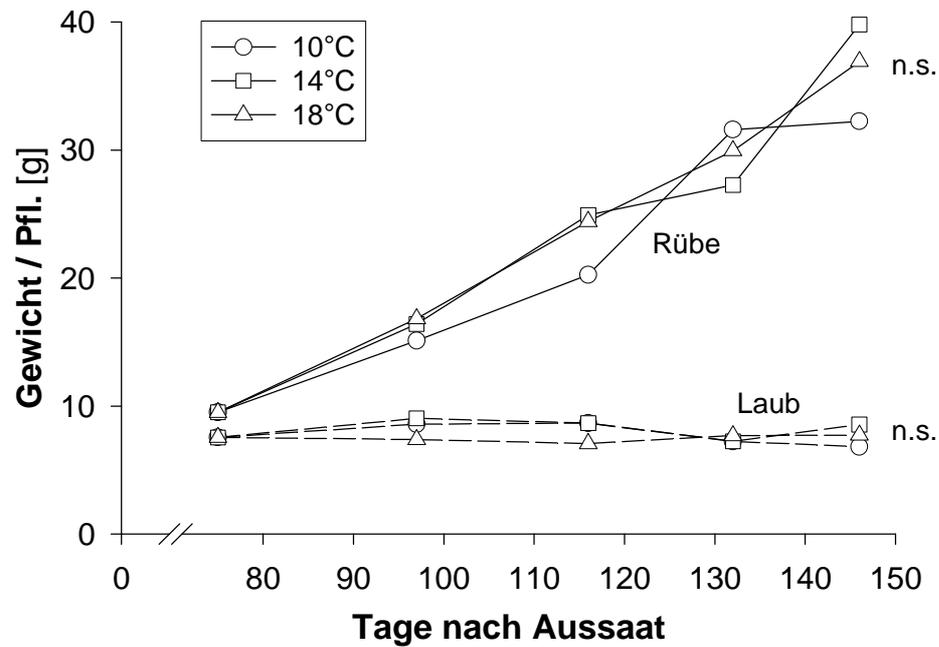


Abbildung 9: Verlauf des Frischgewichts von Möhren in Abhängigkeit von der Temperatur (K3)

Nitratgehalt

In allen untersuchten Teilen der Möhre gab es eine signifikante Änderung des Nitratgehaltes in Abhängigkeit von der Temperatur. Nach Beginn der Temperaturabsenkung verringerte sich der Nitratgehalt bei 10 °C und 14 °C in allen Pflanzenteilen (Abbildung 10). Temperatur und Nitratgehalt waren positiv korreliert, je höher die Temperatur, desto höher auch der Nitratgehalt.

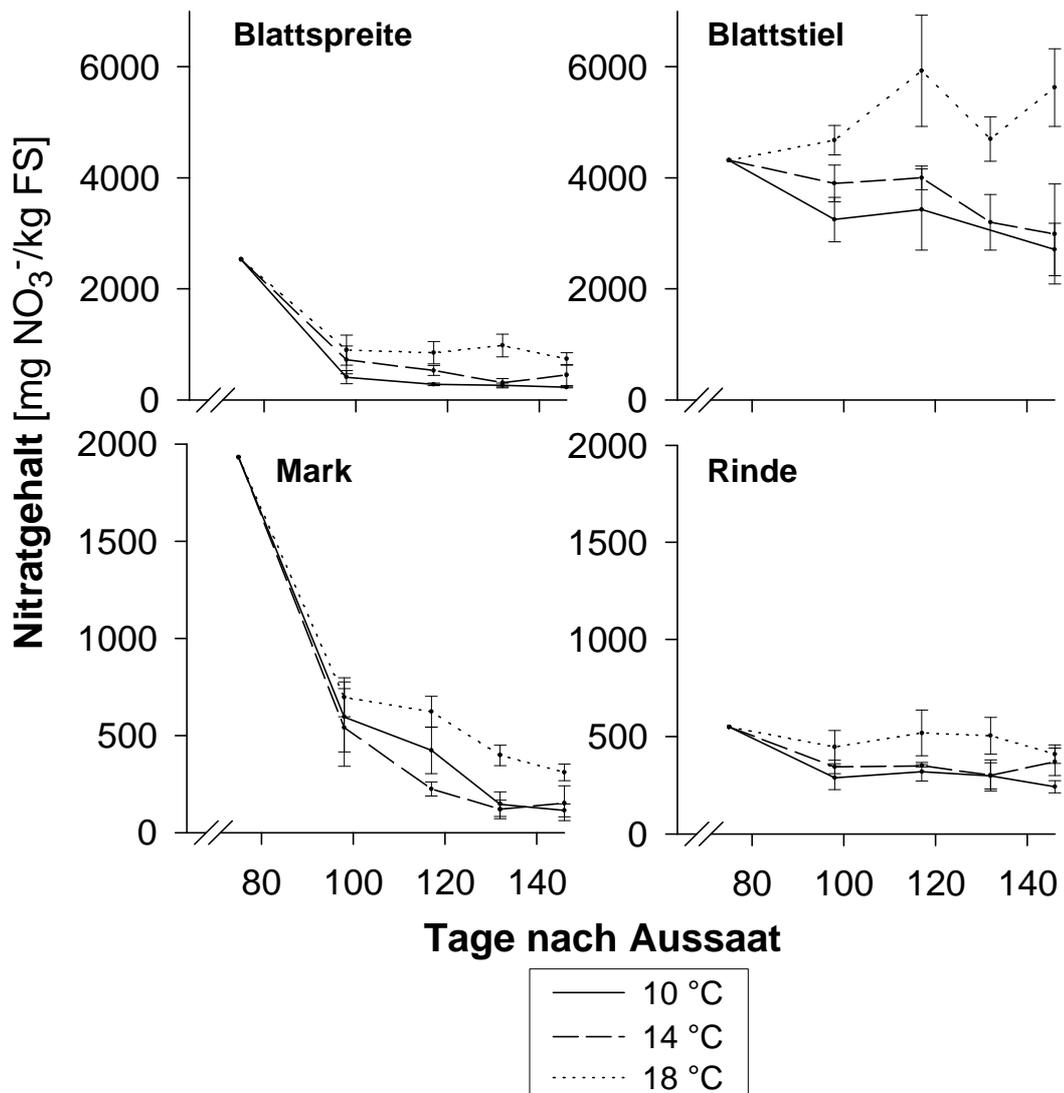


Abbildung 10: Verlauf des Nitratgehaltes von Möhren in Abhängigkeit von der Temperatur (K3)

Gesamtstickstoffgehalt

Der Gesamtstickstoffgehalt lag in der Rübe zwischen 1.5 und 2.3 % N i.d. TS (Abbildung 11). Während des Versuchszeitraumes fiel er in allen untersuchten Teilen der Möhre (Abbildung 11). Einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtstickstoffgehalt hatte die Temperatur jedoch nur im Blattstiel und im Mark. Temperatur und Gesamtstickstoffgehalt waren hier, wie auch schon beim Nitratgehalt, positiv korreliert.

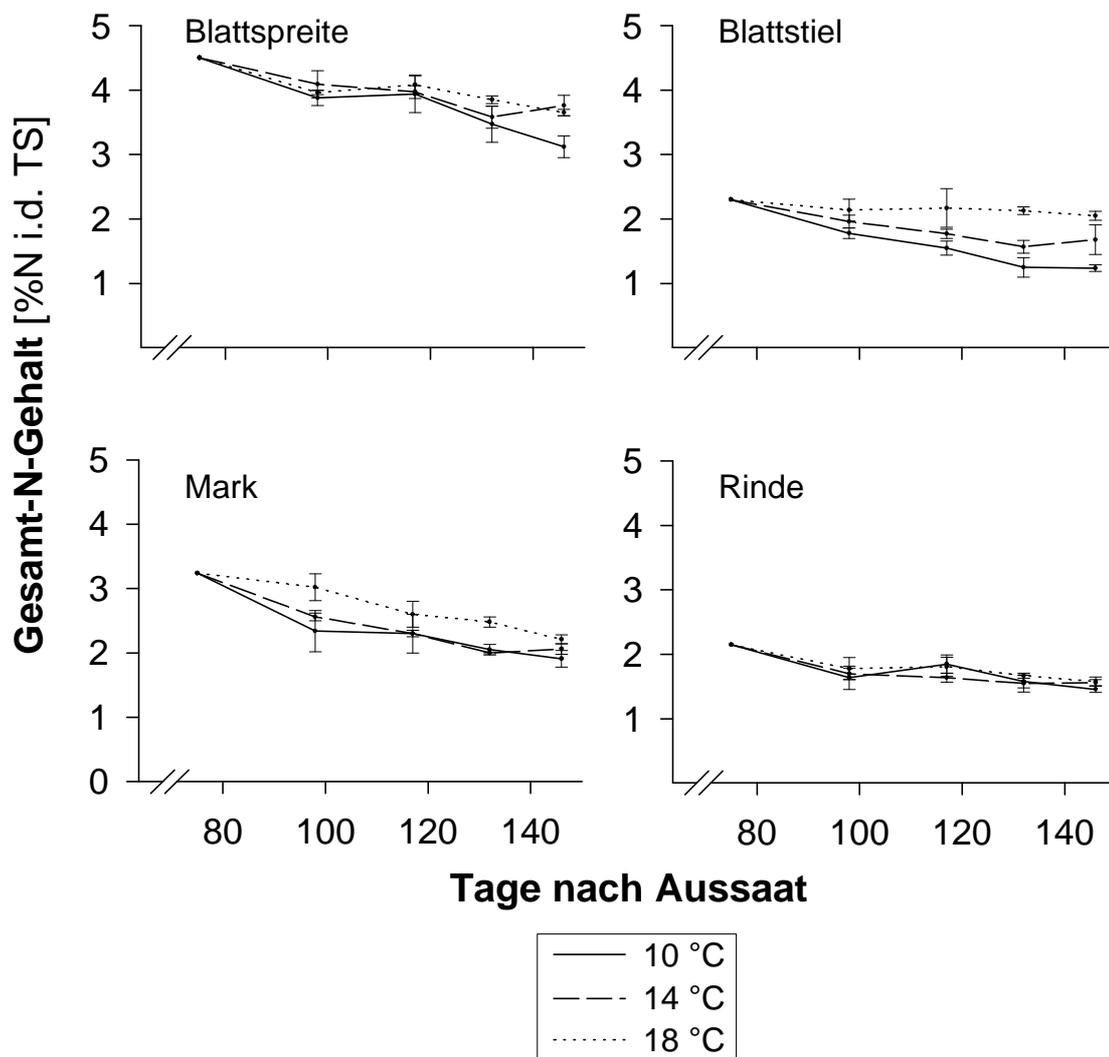


Abbildung 11: Verlauf des Gesamtstickstoffgehaltes von Möhren in Abhängigkeit von der Temperatur (K3)

Saccharose-, Fructose- und Glucosegehalt

Gegenläufig zum Nitratgehalt nahm der Gesamtzuckergehalt mit steigender Temperatur in der Rinde und besonders im Mark signifikant ab (Abbildung 12). Wie schon im ersten Klimakammerversuch (K1, Strahlung) reagierte nur der Saccharosegehalt, der Gehalt an Fructose und Glucose änderte sich während der Versuchsdauer weder im Mark noch in der Rinde signifikant. In der Rinde war durch einen deutlich höheren Gehalt an Glucose und Fructose der Gesamtzuckergehalt höher als im Mark. Der Saccharoseanteil lag im Mark und in der Rinde in etwa auf gleichem Niveau und hat in

beiden Organen den größten Anteil am Gesamtzuckeranteil. Während des Versuchszeitraumes stieg der Gesamtzuckeranteil in beiden analysierten Organen insgesamt leicht an (Abbildung 12).

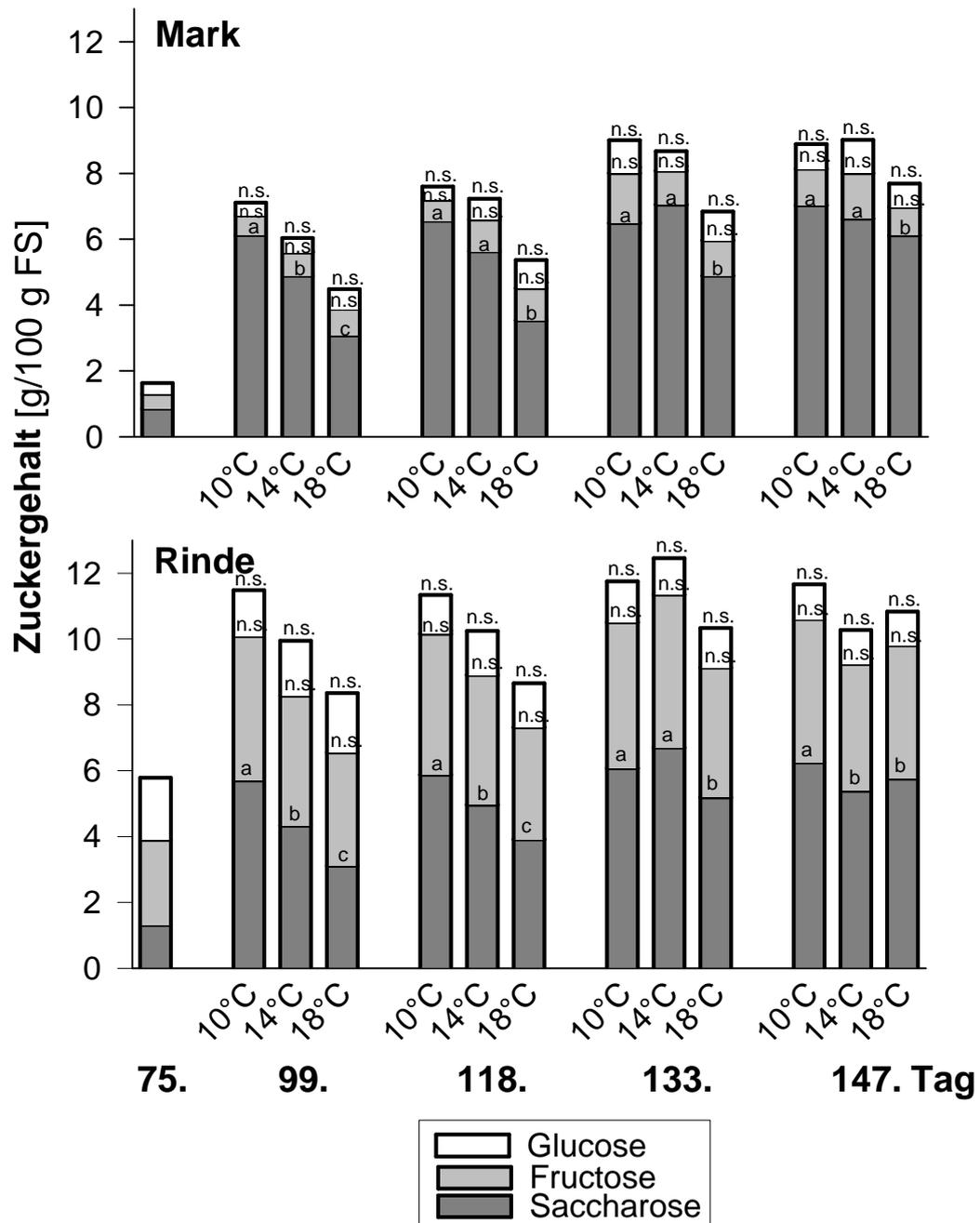


Abbildung 12: Einfluss der Temperatur auf den Zuckergehalt in der Rübe (K3)

2.2 Bodenfeuchte: Gefäßversuch

Zur Überprüfung des Einflusses der Bodenfeuchte auf den Nitratgehalt von Möhren wurde im Gewächshaus ein Versuch in einer von SOMMER (1978), SOMMER und BRAMM (1978) und SOMMER und TANANESCU (1981) beschriebenen Anlage durchgeführt, die Versuchsgefäße nach dem Bodenwasserpotential kontinuierlich bewässern und eine verbrauchsabhängige Bewässerung der Pflanzen bei konstantem Wasserpotential gewährleisten soll.

2.2.1 Material und Methoden

2.2.1.1 Versuchsdurchführung

Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Vakuumpumpe • erzeugt im Luftraum der Wasservorratsflasche † einen Unterdruck. Über eine geschlossene Wassersäule und drei in den Boden eingebaute wassergefüllte keramische Kerzen ^ stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem unter Unterdruck stehenden Wasser in der Vorratsflasche und dem Bodenwasser im Versuchsgefäß ‰ ein.

Zur Kontrolle der Bodenfeuchtigkeit wurden in jedem Gefäß zwei Einstichtensiometer Š in 15 und 30 cm Tiefe eingebaut und täglich abgelesen. Der Wasserverbrauch der Gefäße wurde täglich kontrolliert und die verbrauchte Wassermenge aufgefüllt.

Die Versuchsgefäße hatten einen Durchmesser und eine Füllhöhe von 39 cm. Sie waren mit lehmigem Schluff (20 % Sand, 70 % Schluff, 10 % Ton, pH 6.5) gefüllt, der beim Befüllen der Gefäße auf eine Bodendichte von $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ verdichtet wurde. Zur Verminderung der Evaporation wurde die Bodenoberfläche mit einer ca. 0.5 cm dicken Schicht aus Blähton (\varnothing 4-6 mm) bedeckt.

Am Versuchsbeginn wurden pro Gefäß 50 Samen der Sorte 'Ingot' (Sperling), eine mittelfrühen Frischmarktsorte, ca. 1 cm tief ausgelegt. Die Reglereinstellung für die Heiztemperatur im Gewächshaus betrug 14/10 °C bei einer Lüftungstemperatur von

20 °C. Nach 10 Tagen waren die Pflanzen aufgelaufen. Nach weiteren 14 Tagen wurde die Anzahl der Pflanzen pro Gefäß auf 23 reduziert. Die gewählte Pflanzendichte im Gefäß entsprach in etwa der Bestandesdichte von Frischmarktmöhren im Freiland (150 Pfl./m²). Die Reglereinstellung für die Heiztemperatur im Gewächshaus wurde zu diesem Zeitpunkt auf 4/4 °C bei einer Lüftungstemperatur von 16 °C gesenkt. Die Isttemperaturen im Gewächshaus lagen durch die sehr warme Witterung im Sommer während des gesamten Versuches wesentlich höher als die Temperatursollwerte.

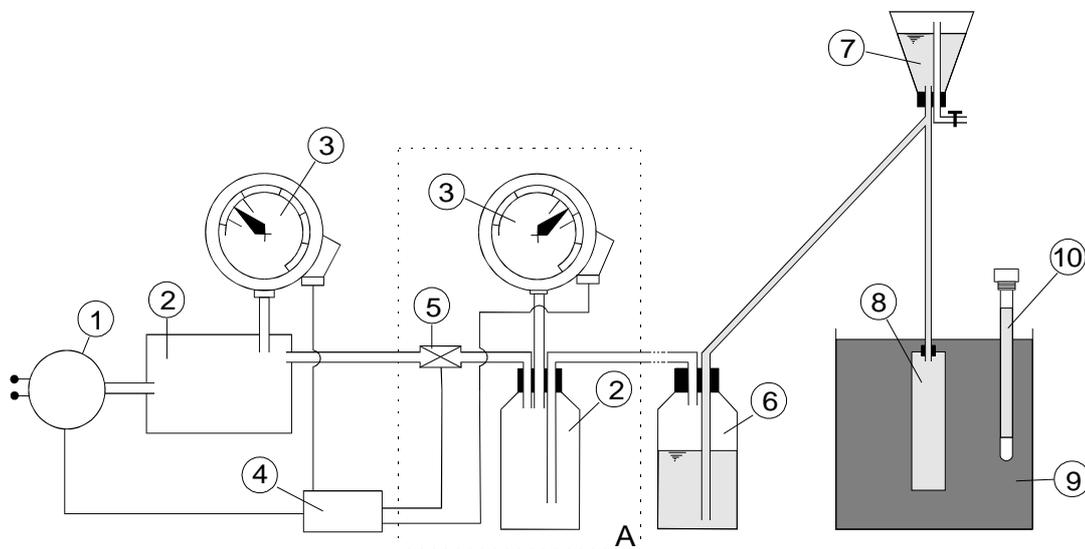


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Anlage zur kontinuierlichen Bewässerung von Versuchsgefäßen nach dem Bodenwasserpotential (G1):

- Vakuumpumpe, , Unterdruckbehälter, f Manometer mit Grenzwertschalter, „ Regelverstärker für zwei Einheiten A, ... Elektromagnetventil, † Vorratsflasche, ‡ Luftsammler, ^ keramische Kerze, ‰ Gefäß mit Boden, S Tensiometer (verändert nach SOMMER 1978)

Das Bodenwasserpotential wurde zu Beginn des Versuches in allen Gefäßen auf einen Sollwert von 150 hPa eingestellt, um einen einheitlichen Pflanzenbestand zu erhalten. Nach 37 Tagen wurden das Bodenwasserpotential variiert (Tabelle 7). Jeweils

12 Gefäße wurden auf einen Wert von 150 hPa und 400 hPa eingestellt. In beiden Stufen wurde bei je sechs Gefäßen nach 11 Wochen der Sollwert des Bodenwasserpotentials auf den jeweils anderen Wert gewechselt, um eine kurzfristige Änderung der Wasserversorgung zu simulieren.

Alle Gefäße wurden einheitlich auf einen Sollwert von 120 kg N/ha aufgedüngt. Der ursprüngliche N_{\min} -Gehalt des verwendeten Bodens betrug 30 kg N/ha. Der zugegebene Stickstoff wurde in 0-20 cm oder 20-40 cm Gefäßtiefe eingearbeitet, um Stickstoffvorräte in verschiedenen Tiefen auf dem Feld zu simulieren.

Der Versuch war als Blockversuch mit drei Wiederholungen angelegt. Insgesamt wurden 24 Gefäße an die Anlage angeschlossen.

Faktoren und Faktorstufen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Versuchsvarianten des Gefäßversuches

Faktor	Faktorstufe	
Bodenwasserpotential	150 hPa	Sollwert 150 hPa
	400 hPa	Sollwert 400 hPa
	150/400 hPa	Wechsel d. Sollwertes von 150 auf 400 hPa
	400/150 hPa	Wechsel d. Sollwertes von 400 auf 150 hPa
Stickstoff-Platzierung	N 0-20	Stickstoff in 0-20 cm Schicht eingearbeitet
	N 20-40	Stickstoff in 20-40 cm Schicht eingearbeitet

Nach 15 Wochen Kulturzeit erfolgte die Ernte aller Gefäße. Für die Ernte wurden die Möhren gezogen, gewaschen, abgetrocknet und in Laub, Mark und Rinde aufgeteilt. Die Pflanzen eines Gefäßes wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst. Pro Probe gingen 23 Möhren in die Analyse ein.

Zur Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes wurden in jedem Gefäß aus der 0-20 cm und 20-40 cm Schicht Bodenproben entnommen.

2.2.1.2 Analytik

a) Pflanzenanalysen

In den getrockneten Pflanzenteilen wurde der Nitratgehalt bestimmt. Die Nitratanalyse erfolgte wie in Kapitel 2.1.1.3a) beschrieben

b) Bodenanalysen

Die Bodenproben wurden mit einem Pürckhauer-Bohrer der entsprechenden Bodenschicht entnommen, anschließend gesiebt (Maschenweite 3 mm) und homogenisiert. Daran anschließend erfolgte die Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes in der Bodenfrischsubstanz mit einer ionensensitiven Elektrode nach der bei DRESSEL (1976) beschriebenen Methode.

2.2.1.3 Statistische Auswertung

Die Verrechnung des Gewächshausversuchs erfolgte varianzanalytisch als Blockversuch. Nach der Varianzanalyse wurden Mittelwertsvergleiche mit dem Student-Newman-Keuls-Test (MUNZERT 1992) durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 5 %.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

2.2.2 Ergebnisse

Sollwerte des Bodenwasserpotentials und Wasserverbrauch

Die für das Bodenwasserpotential eingestellten Sollwerte wurden von Anfang an nicht eingehalten. Nachdem mehrere Tensiometer in den 400 hPa-Gefäßen ausgefallen waren, wurde einmal von oben stark bewässert, um eine höhere Bodendichte und einen größeren Bodenschluss der Kerzen zu erreichen. Dadurch wurde aber auch der in zwei Schichten eingearbeitete Stickstoff verlagert, so dass die Wirkung der Stickstoffplatzierung nicht mehr geprüft werden konnte.

Wie Abbildung 14 zeigt, hatten die Gefäße jedoch trotz der technischen Probleme einen den Sollwerten entsprechend unterschiedlichen Wasserverbrauch.

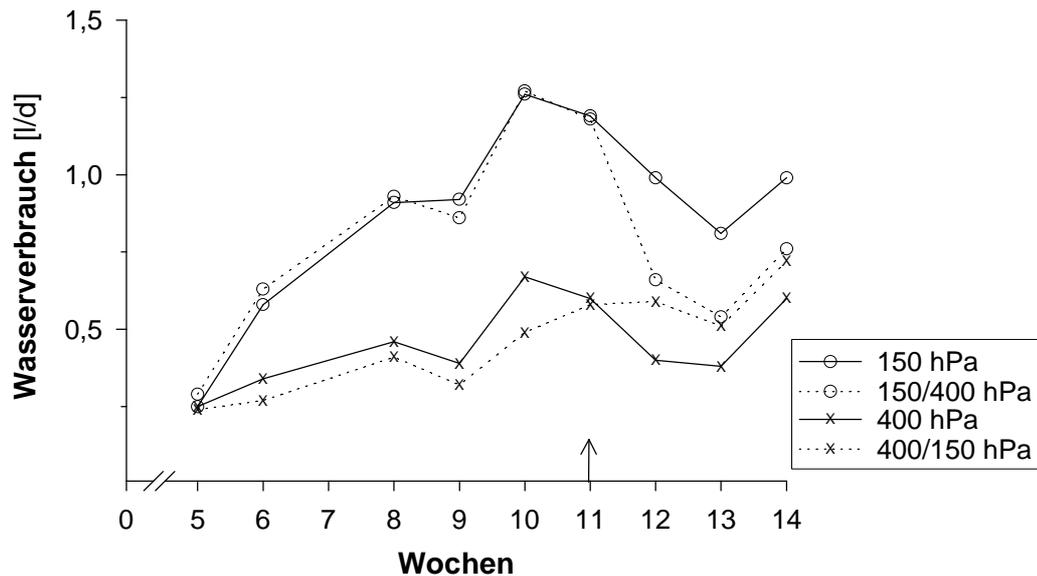


Abbildung 14: Wasserverbrauch pro Tag und Gefäß bei unterschiedlichen Bodenwasserpotentialen (G1, Woche 11: Wechsel des Bodenwasserpotentialen)

Frischgewicht

Das Frischgewicht der Möhren wurde durch die unterschiedlichen Bodenwasserpotentialen signifikant beeinflusst. Bodenwasserpotential und Frischgewicht waren negativ korreliert, d.h. je trockener der Boden war, desto geringer war der Ertrag der Pflanze (Abbildung 15). Die Umstellung auf das jeweils entgegengesetzte Bodenwasserpotential vier Wochen vor der Ernte hatte nur Auswirkungen auf die Rübe, jedoch nicht auf das Laub und die Feinwurzeln. Das Frischgewicht von Mark und Rinde wurde durch Erhöhen der Wasserspannung in den letzten vier Wochen vor der Ernte signifikant verringert. Im umgekehrten Fall wurde das Frischgewicht durch Herabsetzen zwar erhöht, die Erhöhung war jedoch nicht statistisch abgesichert. Die 400 hPa-Variante konnte in dieser Zeit den Rückstand zur Variante mit geringem Bodenwasserpotential nicht mehr einholen. Das Gewicht der Feinwurzeln war bei wechselnder Wasserspannung in beiden Fällen geringfügig erhöht, jedoch nicht signifikant.

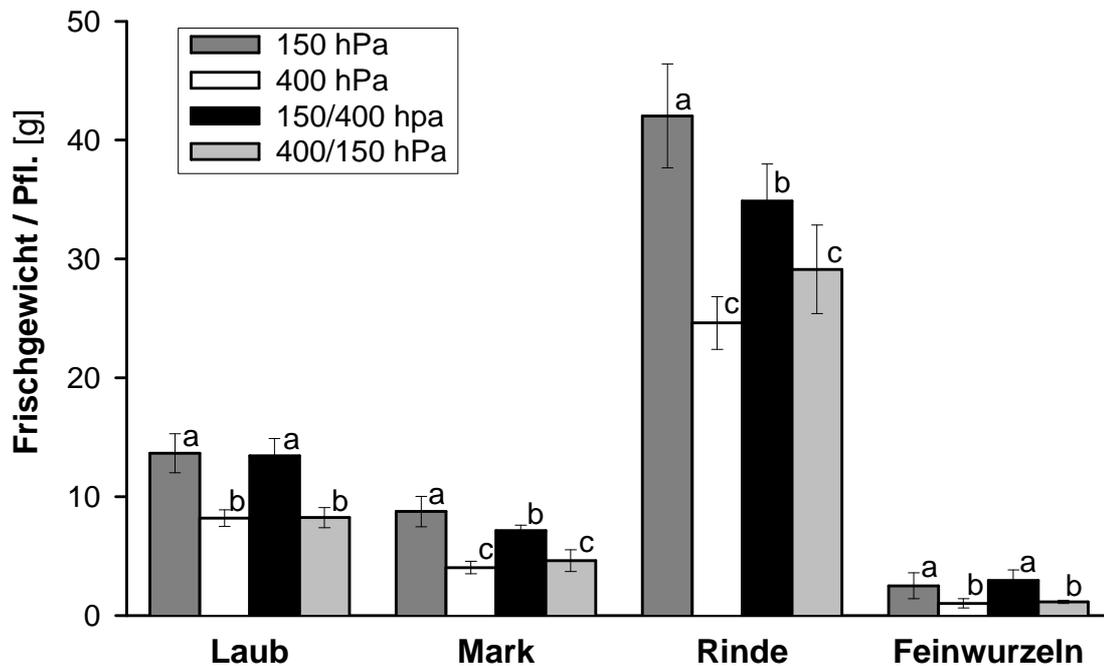


Abbildung 15: Einfluss des Bodenwasserpotentials auf das Frischgewicht von Möhren (G1)

N_{\min} -Gehalt

Auch die N_{\min} -Restwerte wurden vom Bodenwasserpotential beeinflusst. Der geringere Ertrag und damit verringerte Stickstoffzug der Trockenvarianten hatte am Ende der Versuchsperiode höhere N_{\min} -Restwerte im Boden zur Folge (Abbildung 16).

Nitratgehalt

Der Nitratgehalt war in allen Pflanzenteilen sehr niedrig und deshalb Differenzen nur schwer zu erkennen (Abbildung 17). Einen signifikanten Einfluss auf den Nitratgehalt hatte das Bodenwasserpotential nur im Laub, das insgesamt einen höheren Nitratgehalt hat. Hier waren Nitratgehalt und Bodenwasserpotential positiv korreliert. Die Umstellung auf die andere Bodenwasserpotentiale in den letzten 4 Wochen hatte aber auch im Laub keine signifikante Auswirkung mehr auf den Nitratgehalt. Das Bodenwasserpotential, das im ersten Abschnitt der Behandlung eingestellt war, bestimmte die Höhe des Nitratgehaltes.

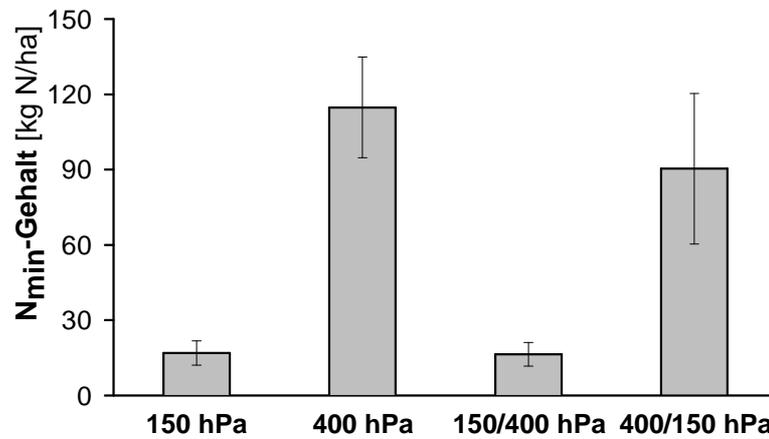


Abbildung 16: N_{min}-Rest in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential (G1)

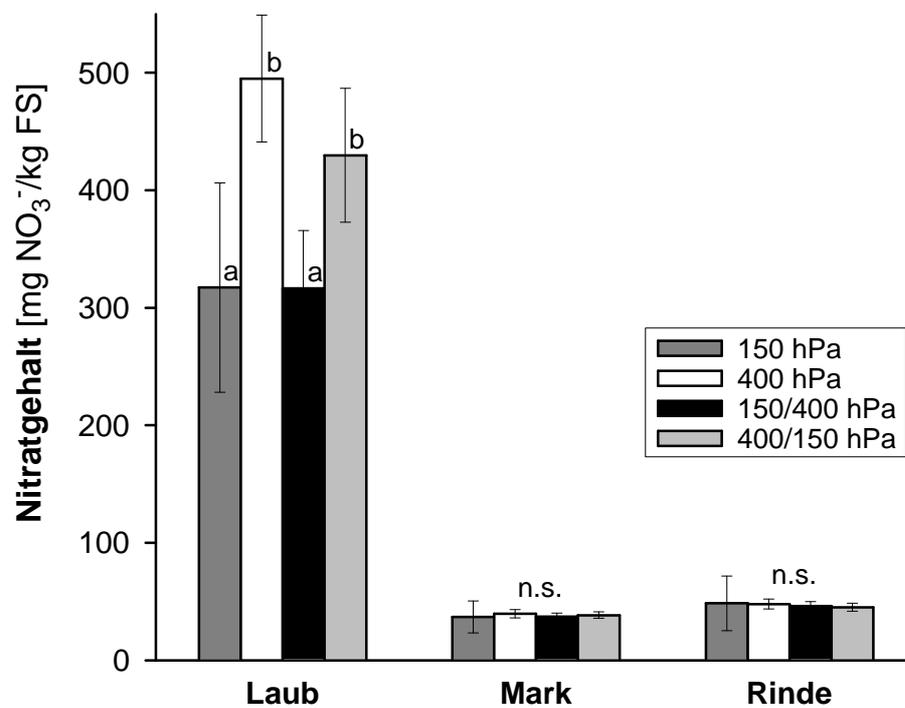


Abbildung 17: Nitratgehalt in Laub, Mark und Rinde in Abhängigkeit vom Bodenwasserpotential (G1, Versuchende)

2.3 Bodenfeuchte: Freilandversuch

In niederschlagsarmen Zeiten wird im Möhrenanbau zusätzlich bewässert. Im Gegensatz zum vorher beschriebenen Gefäßversuch erfolgt eine Beregnungsmaßnahme in der Praxis nicht kontinuierlich im Wurzelbereich, sondern von oben, so dass auch das Laub nass wird. Eine Bewässerung hat deshalb nicht nur auf den Stoffwechsel der Pflanze, sondern auch auf den Stickstoffhaushalt des Bodens Auswirkungen. Sie kann neben positiven Reaktionen auch negative Effekte, wie z.B. Mineralisationsschübe, nach sich ziehen und sowohl Nitratgehalt als auch Ertrag beeinflussen. Deshalb wurde ein Feldversuch durchgeführt, in dem die Reaktion der Möhren auf unterschiedliche Bewässerungsmengen bei zwei Stickstoffdüngestufen und mit zwei Sorten geprüft wurde.

Um den Nitratgehalt von Möhren zum Zeitpunkt der Ernte zu senken, wird von den Anbauern in der Praxis manchmal versucht, durch eine einmalige hohe Bewässerung kurz vor der Ernte Stickstoff in tiefere Bodenschichten zu verlagern (=Auswaschung), und dadurch das Stickstoffangebot für die Möhren kurzfristig zu vermindern. Auch BLANC et al. (1980) empfiehlt diese Maßnahme, um den Nitratgehalt abzusenken. Da dieses Verfahren durch den hohen Wasserverbrauch teuer und ökologisch nicht sinnvoll ist, wurde im Rahmen des nächsten Versuches die Wirksamkeit überprüft.

2.3.1 Material und Methoden

2.3.1.1 Versuchsdurchführung

Der Freilandversuch wurde auf dem Versuchsgelände des Institutes für Gemüsebau in Hannover Herrenhausen auf einem lehmigen Sand (78 % Sand, 16 % Schluff, 6 % Ton, pH 6.5) durchgeführt.

Die Aussaat erfolgte im Beetanbau bei einer Beetbreite von 2 m mit einer 6-reihigen pneumatischen Sämaschine und einer Aussaattiefe von 2.5 cm. Verwendet wurden die Sorten 'Ingot' (Sperling), eine mittelfrühe Frischmarktsorte, und 'Karotan' (Rijk

Zwaan), eine späte Sorte für den industriellen Anbau. Die Soll-Bestandesdichte der Sorte 'Ingot' betrug 160 Pfl./m², die von 'Karotan' 40 Pfl./m².

Der Versuch wurde als Streifenanlage mit drei Wiederholungen angelegt (Abbildung 18). Die Versuchsvarianten sind in Tabelle 8 wiedergegeben.

Tabelle 8: Versuchsvarianten und Termine des Freilandversuches

Faktoren:	
Bodenwasserpotential-sollwerte	150 / 400 hPa
Auswaschung	ohne / + 20 mm
Stickstoffdüngung	keine / 2 x 100 kg N/ha
Sorte	Ingot / Karotan
Wiederholungen	3
Termine:	
Aussaat	11.05.
Beginn der Beregnung	08.06.
Düngung	1. Gabe: 06.07. 2. Gabe: 02.09.
Auswaschung	Ingot: 09.09. Karotan: 14.10.
Ernte	Ingot: 14.09. Karotan: 19.10.
Auswertung:	<ul style="list-style-type: none"> – Trocken- und Frischsubstanz in Rübe und Laub – Nitrat in Rübe (Fruchtsaft) und Laub – N_{min} in 3 Schichten

Die Beregnung erfolgte mit einem motorisierten Düsenwagen, der nach den Sollwerten des Bodenwasserpotentials gesteuert wurde, die mit Tensiometern in 30 und 50 cm Tiefe kontrolliert wurden. Sobald die Sollwerte in 30 cm Tiefe überschritten wurden, setzte die Beregnung ein.

Die Auswaschung wurde als einmalige Beregnung in einer Höhe von 20 mm vier Tage vor der Ernte durchgeführt. Dabei wurde jeweils eine Hälfte der Bewässerungsparzelle beregnet (Abbildung 18).

Das Stickstoffangebot wurde in zwei Stufen variiert. Die 0-Parzellen blieben ungedüngt, bei der Variante mit einem Stickstoffangebot von 100 kg N/ha wurde am Düngungs-termin zur Ermittlung der Düngemenge der N_{\min} -Vorrat im Boden in einer Tiefe von 0-90 cm bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt lag der N_{\min} -Vorrat des Bodens bereits bei 155 kg N/ha, so dass nur mit 100 kg N/ha aufgedüngt wurde. Bei einer Stichprobe zwei Wochen vor der Ernte war der Nitratgehalt der Sorte 'Ingot' sehr gering (<200 mg NO_3^- /kg FS). Deshalb wurde nochmals mit 100 kg N/ha nachgedüngt.

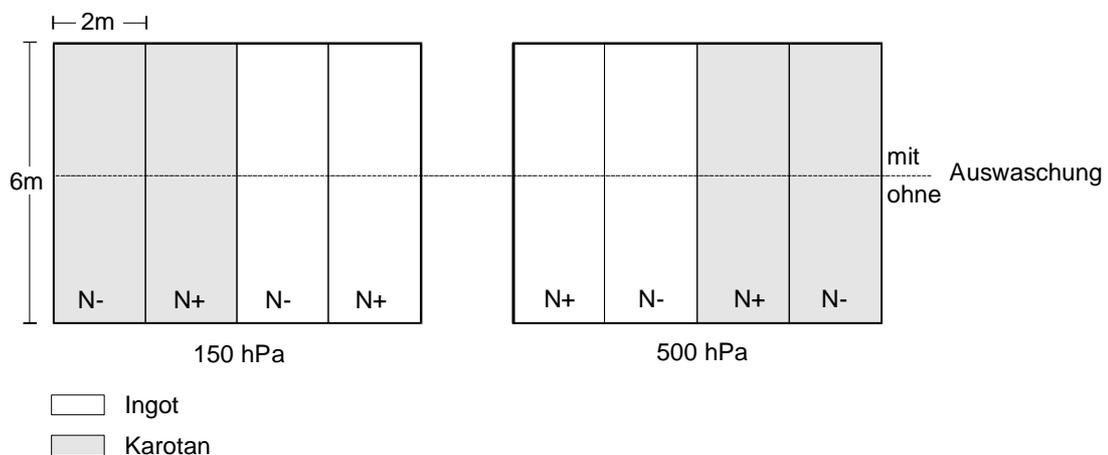


Abbildung 18: Skizze einer Wiederholung des Freilandversuches

Bei der Ernte wurden pro Parzelle 1.4 m² Möhren gezogen, gewaschen, abgetrocknet und in Laub und Rübe aufgeteilt. Die Pflanzen einer Parzelle wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst. Pro Probe gingen 25-30 Möhren in die Analyse ein.

Für die Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes wurden auf allen Parzellen in 0-30, 30-60 und 60-90 cm Tiefe mit einem Pürckhauer-Bohrer Proben entnommen und bis zur Analyse kühl gelagert.

2.3.1.2 Analytik

a) Pflanzenanalysen

In der Rübe erfolgte die Bestimmung des Nitratgehaltes im Frischsaft. Der Nitratgehalt im Laub wurde in der Trockensubstanz ermittelt. Die Nitratanalyse und die Bestimmung der Trockensubstanz von Laub und Möhre erfolgte wie in Kapitel 2.1.1.3a) beschrieben.

b) Bodenanalysen

Die Bodenproben wurden mit einem Pürckhauer-Bohrer der entsprechenden Bodenschicht entnommen, anschließend gesiebt (Maschenweite 3 mm) und homogenisiert. Daran anschließend erfolgte die Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes in der Bodenfrischsubstanz mit einer ionensensitiven Elektrode nach der bei DRESSEL (1976) beschriebenen Methode.

2.3.1.3 Statistische Auswertung

Die Verrechnung des Feldversuchs erfolgte mehrfaktoriell varianzanalytisch. Nach der Varianzanalyse wurde bei signifikanten Einflüssen eines Faktors Mittelwertvergleiche mit dem Student-Newman-Keuls-Test (MUNZERT 1992) durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 5 %.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

2.3.2 Ergebnisse

Verlauf der Bodenwasserspannung

Durch die natürlichen Niederschläge während des Versuches wurden die angestrebten unterschiedlichen Sollwerte von 150 und 400 hPa für die Bodenwasserspannung nur von Anfang Juli bis Ende August annähernd eingehalten (Abbildung 19). In der darauf

folgenden und für den Nitratgehalt entscheidenden Wachstumsphase vor der Ernte war die Bodenfeuchte aufgrund der feuchten Witterung in allen Varianten gleich.

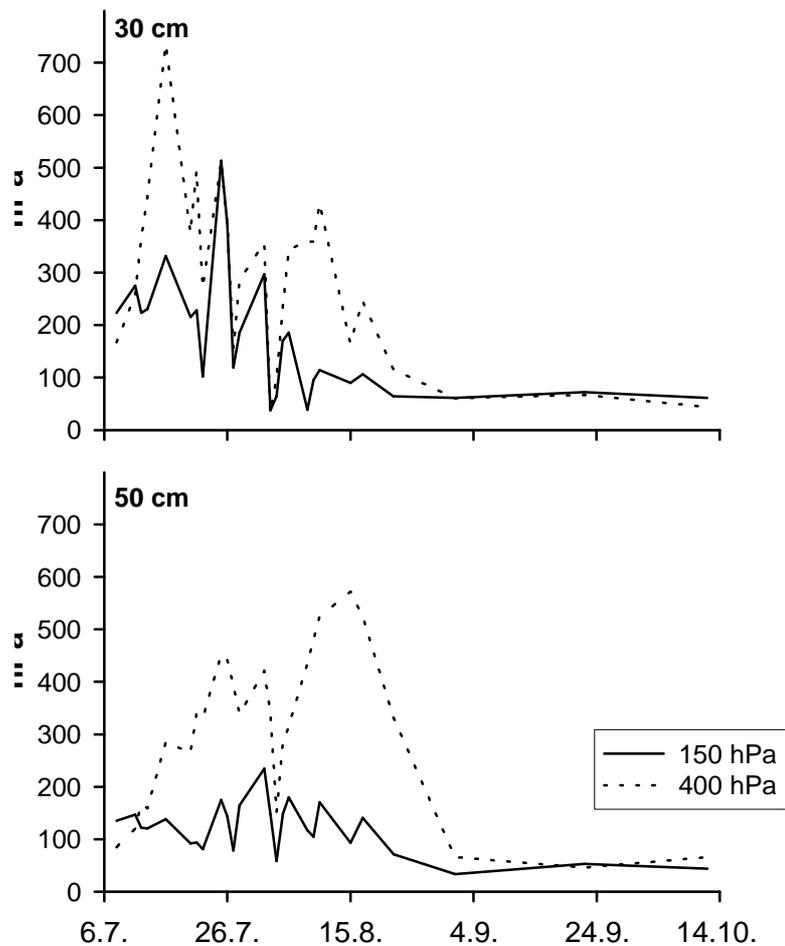


Abbildung 19: Verlauf der Bodenwasserspannung in zwei Tiefen (30 cm und 50 cm) bei einem Beregnungssollwert von 150 und 400 hPa (F1)

N_{min}-Gehalt des Bodens

Der N_{min}-Gehalt des Bodens war zum Zeitpunkt des ersten Düngungstermins (6.7.) mit 155 kg N/ha auf einem hohen Niveau. Zum Zeitpunkt der Ernte war in den ungedüngten Parzellen der N_{min}-Gehalt bei allen Behandlungen und Sorten auf weniger als 30 kg N/ha zurückgegangen und damit extrem niedrig. In den gedüngten Parzellen war zum

Erntezeitpunkt der N_{\min} -Gehalt wesentlich höher (Abbildung 20). Der Wert des vorhandenen N_{\min} -Vorrats wurde jedoch in keiner Variante überschritten, so dass die zusätzlich gegebenen 200 kg N/ha entweder vollständig aufgenommen - Möhren können während ihrer Vegetationszeit eine Stickstoffmenge von 200 kg N/ha aufnehmen (WEIER 1991a+b; MOJE 1997) - oder in Bodenschichten tiefer als 90 cm verlagert wurden. Obwohl die Wahrscheinlichkeit einer Stickstoffauswaschung bei dem hier vorliegenden lehmigen Sand relativ hoch ist (SCHARPF 1991b), kann sie aufgrund der trockenen Witterung in der ersten Hälfte des Versuchszeitraumes praktisch ausgeschlossen werden, und auch in der darauf folgenden Periode, in der die angestrebten Bodenwasserspannungswerte aufgrund von natürlichen Niederschlägen nicht mehr eingehalten werden konnten, waren die einzelnen Niederschläge nicht hoch genug (Abbildung 19, Abbildung 23).

Durch die unterschiedliche Beregnung wurde nur der N_{\min} -Gehalt in den Parzellen der Sorte 'Ingot' beeinflusst (Abbildung 20). Besonders in den gedüngten Parzellen war der N_{\min} -Gehalt bei einem Beregnungsgrenzwert von 150 hPa deutlich geringer als bei 400 hPa.

Die Beregnung mit 20 mm kurz vor der Ernte verringerte bei beiden Sorten nur in den gedüngten Parzellen den N_{\min} -Gehalt des Bodens.

Ertrag

Bei beiden Sorten war der Laubertrag wesentlich geringer als der Rübenertrag. Zwischen den Sorten gab es jedoch keine signifikanten Ertragsunterschiede (Abbildung 21). Obwohl zu Beginn des Versuches die Bodenwasserspannungswerte gut eingehalten werden konnten (Abbildung 19), wurde durch die fast 8 Wochen andauernde Periode mit unterschiedlichem Wasserangebot weder bei 'Ingot' noch bei 'Karotan' der Laub- und Rübenertrag signifikant beeinflusst (Abbildung 21). Sogar der bei 'Ingot' deutlich verminderte N_{\min} -Gehalt bei 150 hPa (Abbildung 20), hatte keine Unterschiede im Laubertrag zwischen der 150 hPa- und der 400 hPa-Variante zur Folge. Auch die einmalige Bewässerung kurz vor der Ernte hatte keinen signifikanten Einfluss

auf den Laub- und Rübenertrag (Abbildung 21).

Die Stickstoffdüngung hatte keine Wirkung auf den Rübenertrag, erhöhte aber bei beiden Sorten signifikant den Laubertrag. Ein höherer Laubertrag bei gleichzeitig unverändertem Rübenertrag ist eine für Möhren typische Reaktion auf ein höheres Stickstoffangebot (WEIER 1991a+b; MOJE 1997).

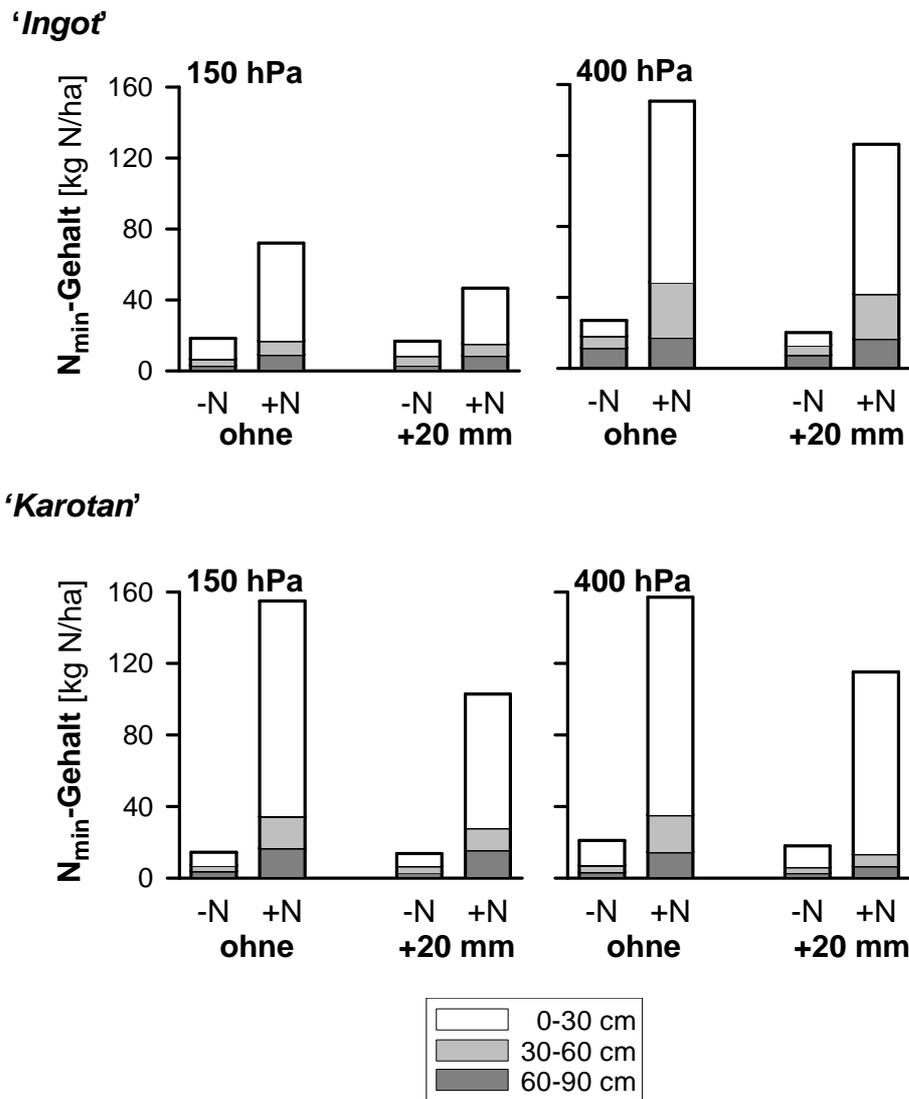
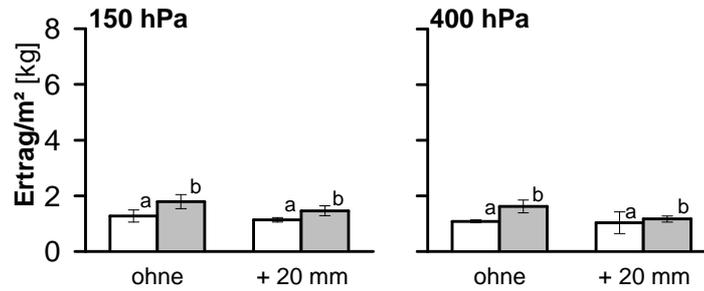
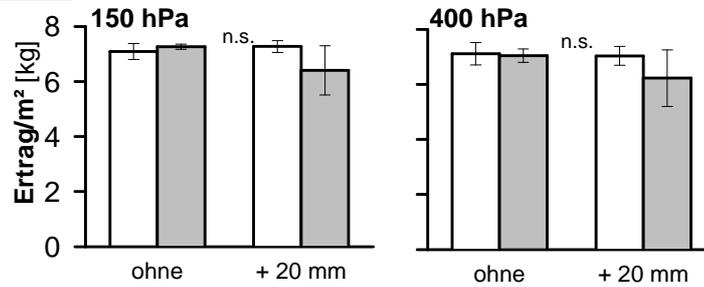


Abbildung 20: N_{min}-Rest im Boden (0-90 cm) in Abhängigkeit von Sorte, Bodenwasserspannung, Stickstoffdüngung und einer einmaligen Bewässerung kurz vor der Ernte (F1)

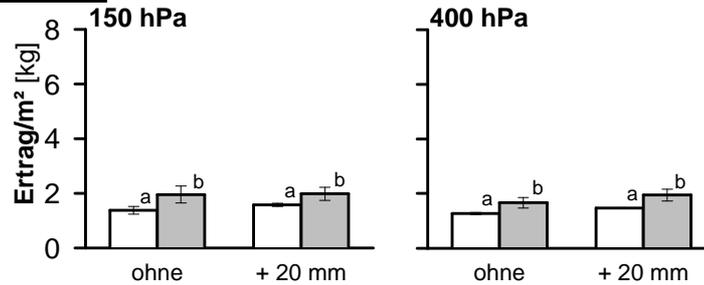
'Ingot': Laub



Rübe



'Karotan': Laub



Rübe

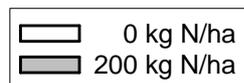
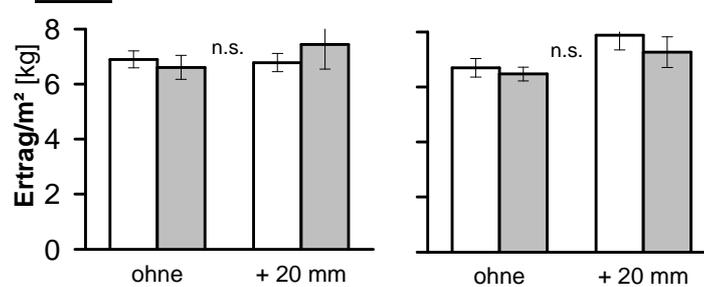


Abbildung 21: Laub- und Rübenertrag der Sorten 'Ingot' und 'Karotan' in Abhängigkeit von Bodenwasserspannung, Stickstoffdüngung und einer einmaligen Bewässerung (+20 mm bzw. ohne) kurz vor der Ernte (F1)

Nitratgehalt

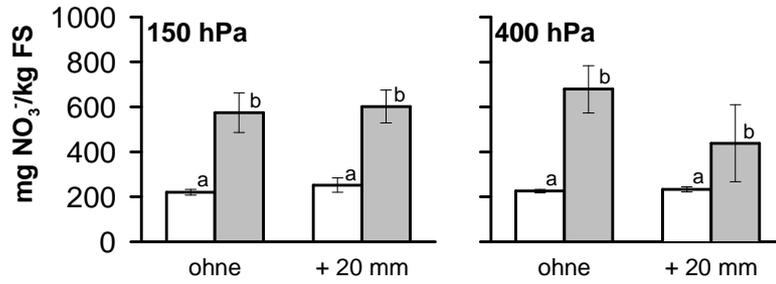
Wie nach dem Witterungsverlauf in den letzten Wochen vor der Ernte zu erwarten war, hatten die unterschiedlichen Bodenwasserspannungssollwerte keine Auswirkung auf den Nitratgehalt (Abbildung 22), obwohl der N_{\min} -Rest und damit das Stickstoffangebot zumindest bei *'Ingot'* zum Zeitpunkt der Ernte differierten (Abbildung 20).

Die Stickstoffdüngung von 200 kg N/ha erhöhte den Nitratgehalt immer signifikant (Abbildung 22).

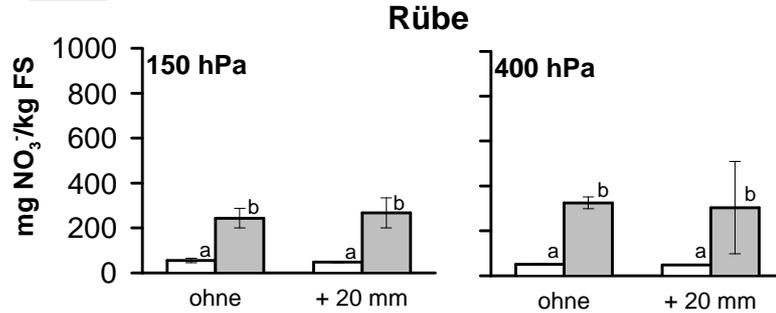
Durch die einmalige Bewässerung von 20 mm konnte nur bei den gedüngten Varianten von *'Karotan'* der Nitratgehalt signifikant gesenkt werden (Abbildung 20). Sie hatte zwar Auswirkungen auf das Stickstoffangebot und den Nitratgehalt, war jedoch nicht ausreichend, um eine wirkungsvolle Auswaschung und Absenkung der N_{\min} -Restwerte zu erreichen und den Nitratgehalt der gedüngten Varianten unter 250 mg $\text{NO}_3^-/\text{kg FS}$ zu senken.

Die Auswirkungen auf den Nitratgehalt und das Stickstoffangebot können nur durch Auswaschung oder erhöhte Stickstoffaufnahme der Pflanzen verursacht sein. Da eine höhere Stickstoffaufnahme der Pflanzen aufgrund der Erträge und der Nitratwerte auszuschließen ist, muss sich der Stickstoff in tieferen, nicht beprobten Bodenschichten befinden. Die Differenz zwischen den N_{\min} -Gehalten der einmalig beregneten und der unbehandelten Parzellen ist jedoch in den Profilen der N_{\min} -Werte nicht wieder zu finden. Bei einem lehmigen Sand, wie er in diesem Versuch vorlag, ist bei 20% Feldkapazität für eine Nitratverlagerung um 30 cm ein Niederschlag von 60 mm erforderlich (SCHARPF 1991b). Die geringe Höhe der einmaligen Wassergabe (20 mm) spricht damit eigentlich gegen die Möglichkeit einer Auswaschung. Auch die Niederschlagshöhe in den letzten fünf Tagen vor der Ernte (Abbildung 23) war besonders bei *'Karotan'* nicht ausreichend, um eine so tiefe Verlagerung zu bewirken. Durch die feuchte Witterung in den letzten Versuchswochen (Abbildung 19) war die Bodenfeuchtigkeit jedoch wesentlich höher als 20 % Feldkapazität, so dass eine Auswaschung zumindest eines Teils des Stickstoffs nicht ausgeschlossen werden kann.

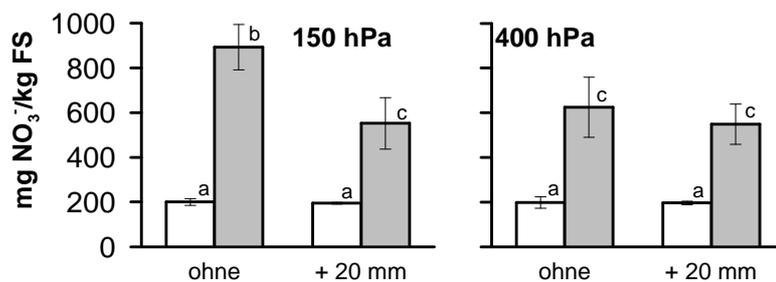
'Ingot': Laub



Rübe



'Karotan': Laub



Rübe

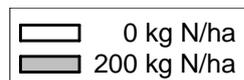
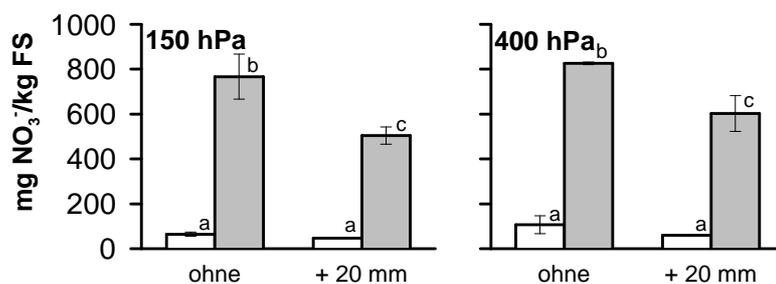


Abbildung 22: Nitratgehalt der Sorten 'Ingot' und 'Karotan' in Abhängigkeit von Bodenwasserspannung, Stickstoffdüngung und einer einmaligen Bewässerung (+20 mm bzw. ohne) kurz vor der Ernte (F1)

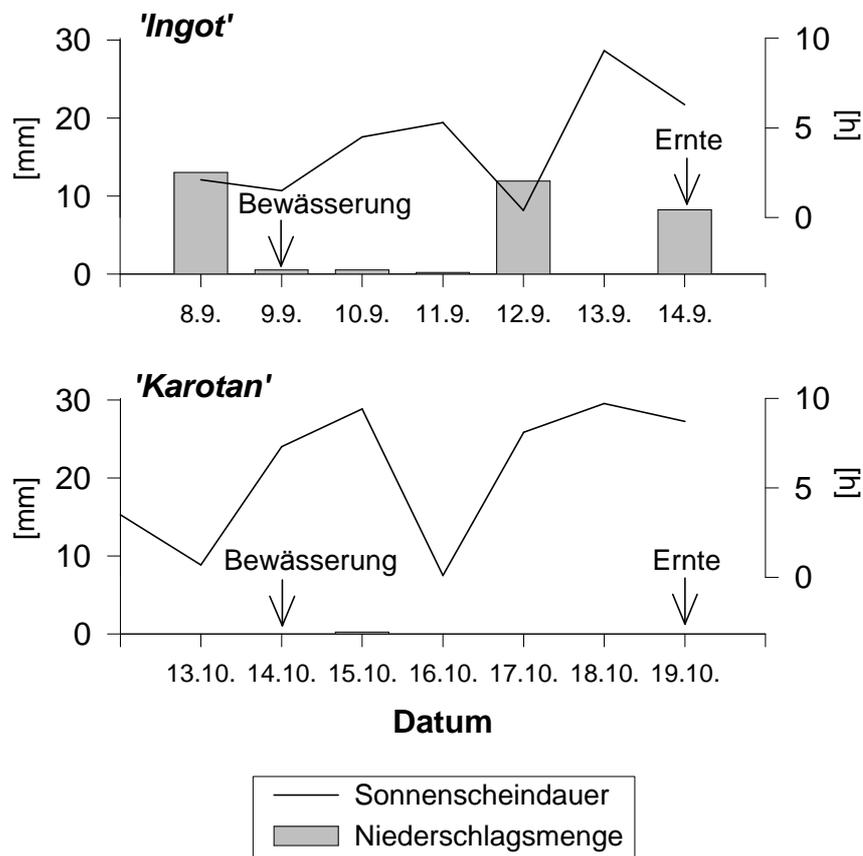


Abbildung 23: Niederschlagsmenge und Sonnenscheindauer bei 'Karotan' und 'Ingot' in der Woche vor der Ernte (F1)

2.4 Anbautechnische Massnahmen

Für den Anbauer sind leicht durchzuführende anbautechnische Massnahmen interessant, mit denen der Nitrathaushalt verändert und der Nitratgehalt gesenkt werden könnte. Zu diesen Massnahmen gehören z.B. das im vorherigen Kapitel erwähnte Auswaschen von Nitrat aus dem Boden durch eine einmalige starke Bewässerung oder das von MANß und MANß (1989) empfohlene Unterschneiden der Rüben kurz vor dem Erntetermin, durch das die Stickstoffaufnahme der Pflanze unterbrochen werden und als Folge der Nitratgehalt sinken soll.

Eine weitere Massnahme wäre das Manipulieren des Laubapparates. Da Nitrat im Transpirationsstrom transportiert wird, stellte sich die Frage, wie die Nitrataufnahme

beeinträchtigt wird, wenn durch Entfernen der Blätter keine Transpiration mehr stattfindet. Für den Nitratgehalt einer Pflanze ist jedoch auch die Nitratreduktion entscheidend, deren Höhe u.a. vom Zustand des Blattapparates abhängt. Im folgenden Versuch wurde deshalb geprüft, welche Auswirkungen das Unterschneiden der Wurzeln und ein Entfernen des Laubes auf den Nitratgehalt der Rübe hat.

2.4.1 Material und Methoden

Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit der Sorte 'Ingot' auf dem Versuchsgelände des Institutes für Gemüsebau in Hannover Herrenhausen auf einem lehmigen Sand (78 % Sand, 16 % Schluff, 6 % Ton, pH 6.5) unter praxisüblichen Bedingungen mit einer Bestandesdichte von 160 Pfl./m² durchgeführt.

Die Versuchsvarianten und Termine sind in Tabelle 9 wiedergegeben.

Analytik

Die Bestimmung des Nitratgehaltes der Rübe erfolgte im Frischsaft mittels einer nitratsensitiven Elektrode. Die Durchführung erfolgte wie in Kapitel 2.1.1.3a) beschrieben.

Statistische Auswertung

Die Verrechnung des Versuches erfolgte mehrfaktoriell varianzanalytisch. Nach der Varianzanalyse wurde bei signifikanten Einflüssen eines Faktors Mittelwertsvergleiche mit dem Student-Newman-Keuls-Test (MUNZERT 1992) durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 5 %.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

Tabelle 9: Versuchsvarianten und Termine (F2)

Faktoren:	
Kontrolle	
Unterschneiden	2 d vor der Ernte
Laubentfernen	4 d / 2 d vor der Ernte
Stickstoffdüngung	keine / 150 kg N/ha
Wiederholungen	4
Termine:	
Aussaat	28.03.
Düngung	16.05.
Unterschneiden	22.06.
Laubentfernen	20.06./22.06.
Ernte	24.06.
Auswertung:	<ul style="list-style-type: none"> – Rübenertrag – Nitrat in der Rübe (Fruchtsaft)

2.4.2 Ergebnisse

Auf das Frischgewicht hatten die unterschiedlichen Behandlungen und auch die Stickstoffdüngung keinen signifikanten Einfluss (Abbildung 24).

Auf den Nitratgehalt hatte das Unterschneiden der Rübe im Gegensatz zu den Beobachtungen von MANß und MANß (1989) keine Auswirkung (Abbildung 25). Bei der gedüngten Variante ist der Nitratgehalt im Vergleich zur Kontrolle eher leicht erhöht.

Auswirkungen auf den Nitratgehalt hatte jedoch das Entfernen des Laubes. Bereits zwei Tage nach Beginn der Behandlung war der Nitratgehalt sowohl in der gedüngten als auch ungedüngten Variante im Vergleich zur Kontrolle angestiegen, dieser Anstieg war zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht statistisch abgesichert. Nach vier Tagen war in beiden Varianten der Nitratgehalt im Vergleich zur Kontrolle signifikant erhöht, und erreichte selbst bei der ungedüngten Variante fast den Grenzwert.

Am deutlichsten wurde der Nitratgehalt wieder durch das unterschiedliche Stickstoff-

angebot beeinflusst. Während in den Varianten ohne zusätzliche Stickstoffdüngung der Grenzwert für Diät- und Babynahrung in keinem Fall überschritten wurde, lag er in den gedüngten Varianten immer darüber.

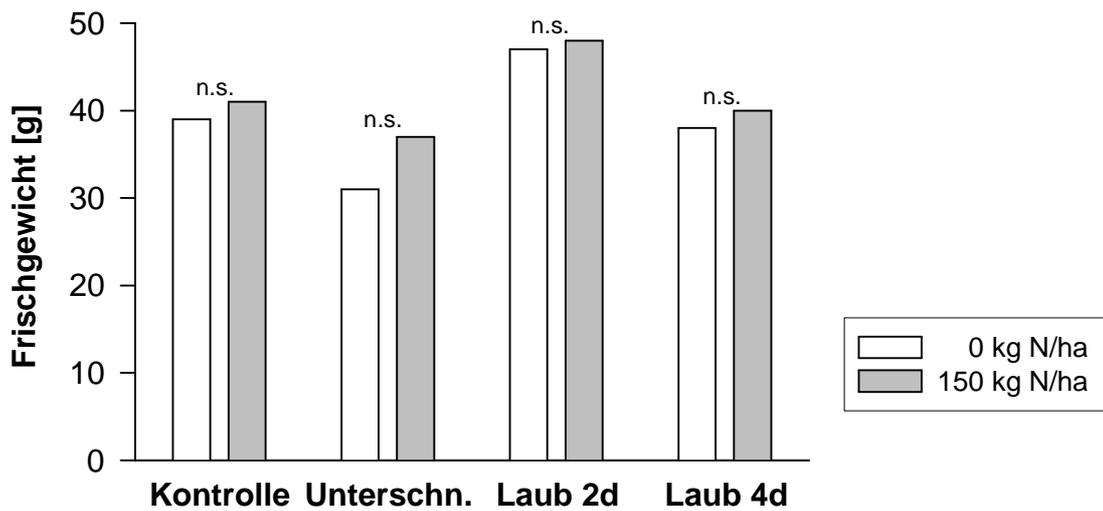


Abbildung 24: Einfluss von Unterschneiden und Laubentfernen 2 bzw. 4 Tage vor der Ernte auf das Frischgewicht der Rübe (F2)

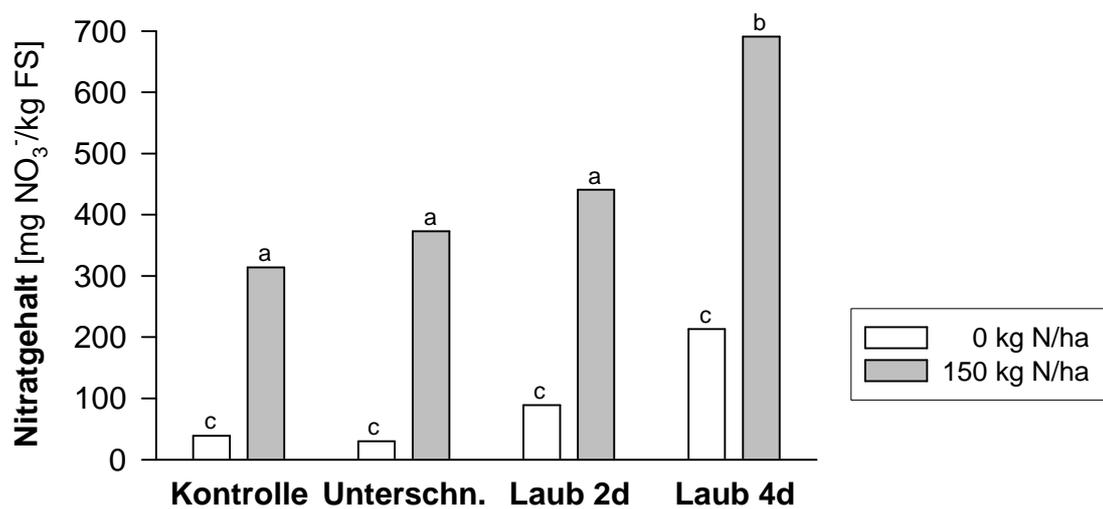


Abbildung 25: Einfluss von Unterschneiden und Laubentfernen 2 bzw. 4 Tage auf den Nitratgehalt in der Rübe (F2)

3 VERGLEICH VON SORTENEIGENSCHAFTEN

In den von MOJE (1997) durchgeführten Versuchen gab es immer wieder Hinweise auf Sortenunterschiede zwischen den im Projekt verwendeten Sorten 'Ingot' und 'Karotan'. So zeigte 'Ingot' einen geringeren Düngungseffekt als die Industriesorte 'Karotan', obwohl bei 'Ingot' durch die sechs Wochen kürzere Kulturzeit eher mit einem Düngungseffekt zu rechnen gewesen wäre. Eine mögliche Erklärung könnte z.B. eine unterschiedliche Durchwurzelungstiefe der beiden Sorten sein. Die Frischmarktsorte 'Ingot' hatte zudem meistens geringere Nitratgehalte als die Industriesorte 'Karotan'. Für solche Sortenunterschiede können neben genetischen Differenzen jedoch auch ungleiche Anbaubedingungen verantwortlich sein. So werden z.B. in der Praxis Industriesorten mit geringeren Bestandesdichten angebaut als Frischmarktsorten, und auch die Kulturzeit weicht je nach Sortentyp voneinander ab. In den folgenden zwei Versuchen wurden die morphologischen Unterschiede der beiden Sorten unter verschiedenen äußeren Anbaubedingungen miteinander verglichen.

3.1 Wurzelmorphologie

Um Kenntnisse über das Wachstum des gesamten Wurzelsystems zu erhalten, wurde in diesem Versuch das Wurzelwachstum in durchsichtigen Kunststoffröhren aus vom Zeitpunkt der Aussaat an fortlaufend dokumentiert.

3.1.1 Material und Methoden

Der Versuch wurde in Wurzelsäulen aus Plexiglas (\varnothing 10 cm) mit einer Gesamthöhe von 1 m, die in vier Abschnitte von je 25 cm unterteilt werden konnten, durchgeführt. Als Substrat wurde auf $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ verdichteter lehmiger Sand verwendet (78 % Sand, 16 % Schluff, 6 % Ton, pH 6.5). Eine zusätzliche Stickstoffdüngung wurde nicht gegeben, da der N_{\min} -Gehalt des Bodens zu diesem Zeitpunkt bereits 90 kg N/ha betrug.

Die Wurzelsäulen wurden mit schwarzer Folie umwickelt und mit einer Neigung von 10° schräg im Gewächshaus aufgestellt (Abbildung 26), so dass die Wurzeln von außen sichtbar an der Gefäßwand entlang wuchsen.

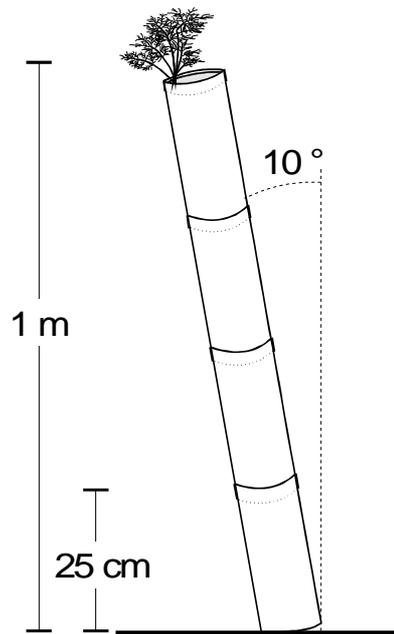


Abbildung 26: Schematische Darstellung einer Wurzelröhre (G2)

Das Saatgut wurde drei Tage bei 18°C vorgekeimt. Am 27.8. wurden je Gefäß drei gekeimte Samen am tiefsten Punkt des Gefäßrandes der Wurzelsäulen ausgelegt. Am 3.9. wurde auf je eine Pflanze pro Gefäß reduziert. Der Temperatursollwert im Gewächshaus betrug $16/10^\circ\text{C}$ bei einer Lüftungstemperatur von 20°C . Die Gefäße wurden manuell bewässert.

Der Versuch wurde in fünf Wiederholungen angelegt, wobei eine Pflanze bzw. ein Gefäß eine Wiederholung darstellte.

Am 26.10. erfolgte die Auswertung des Versuches. Die Pflanzen wurden gerntet, gewaschen und abgetrocknet. Dann wurden Frisch- und Trockengewicht von Laub und Rübe (siehe Kapitel 2.1.1.3a) sowie die Blattzahl bestimmt.

Zur Ermittlung der von außen durch das Plexiglas sichtbaren Wurzellänge wurden an den Säulen Folien befestigt, auf denen mehrmals wöchentlich die Zuwächse mit farbigen Folienstiften gekennzeichnet wurden. Am Versuche wurde die Länge der aufgezeichneten Wurzellinien in vier Abschnitten (0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm), die Gesamtlänge der Wurzeln und die Durchwurzelung an ausgewählten Terminen ermittelt. So war es möglich, das Wachstum der Wurzeln und die Schnelligkeit der Tiefendurchwurzelung zu beobachten.

Zur Ermittlung der Wurzellänge nach TENNANT (1975) wurden von jedem Abschnitt die Wurzeln (ohne Rübe) mit Wasser auf einem Prüfsieb (Maschenweite 1 mm) vom Boden getrennt und vorsichtig getrocknet, gewogen und in 0.5 cm lange Teilstücke geschnitten. Anschließend wurden diese in einer Zählchale ausgezählt und die Wurzellänge nach TENNANT (1975) berechnet.

Für die statistische Auswertung wurden t-Tests als Mittelwertsvergleiche durchgeführt.

3.1.2 Ergebnisse

Sichtbare Wurzellänge

Zu Beginn verlief das Längenwachstum der von außen sichtbaren Wurzeln bei *'Ingot'* und *'Karotan'* fast parallel (Abbildung 27). Die Wurzellänge von *'Karotan'* war zu diesem Zeitpunkt etwas geringer als die von *'Ingot'*. Ca. 20 Tage nach der Aussaat begann bei beiden Sorten eine Phase verstärkten Wurzelwachstums, in der sich die Wurzellänge innerhalb von 30 Tagen um das fünf- bis sechsfache erhöhte. Bei *'Ingot'* folgte danach eine Phase schwächeren Wurzelzuwachses, während bei *'Karotan'* die Wurzellänge bis zum Ende des Versuches weiterhin nahezu linear anstieg. Bei Versuche lag die durch das Plexiglas sichtbare Wurzellänge von *'Karotan'* schließlich ungefähr 30 % über der von *'Ingot'*.

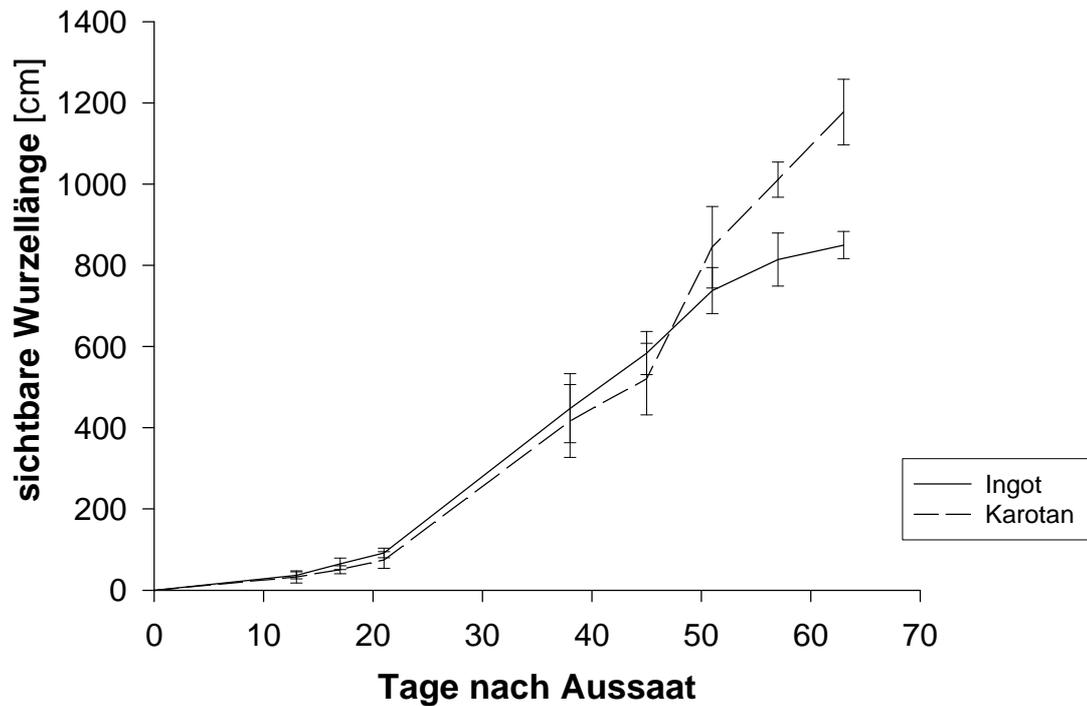


Abbildung 27: Verlauf der Wurzellänge der von außen sichtbaren Feinwurzeln (G2)

Durchwurzelungstiefe

Auch die Durchwurzelungstiefe war bei *'Ingot'* zunächst größer als bei *'Karotan'* (Abbildung 28). Etwa zum gleichen Zeitpunkt, an dem bei *'Ingot'* der Wurzelzuwachs schwächer wurde (Abbildung 27), holte *'Karotan'* in der Durchwurzelungstiefe auf und wurzelte am Versuchende ca. 10 cm tiefer als *'Ingot'*.

Auffällig ist die große Durchwurzelungstiefe der kleinen Pflanzen. Abbildung 29 zeigt, dass schon Pflanzen mit zwei Laubblättern bis zu 25 cm tief wurzeln können.

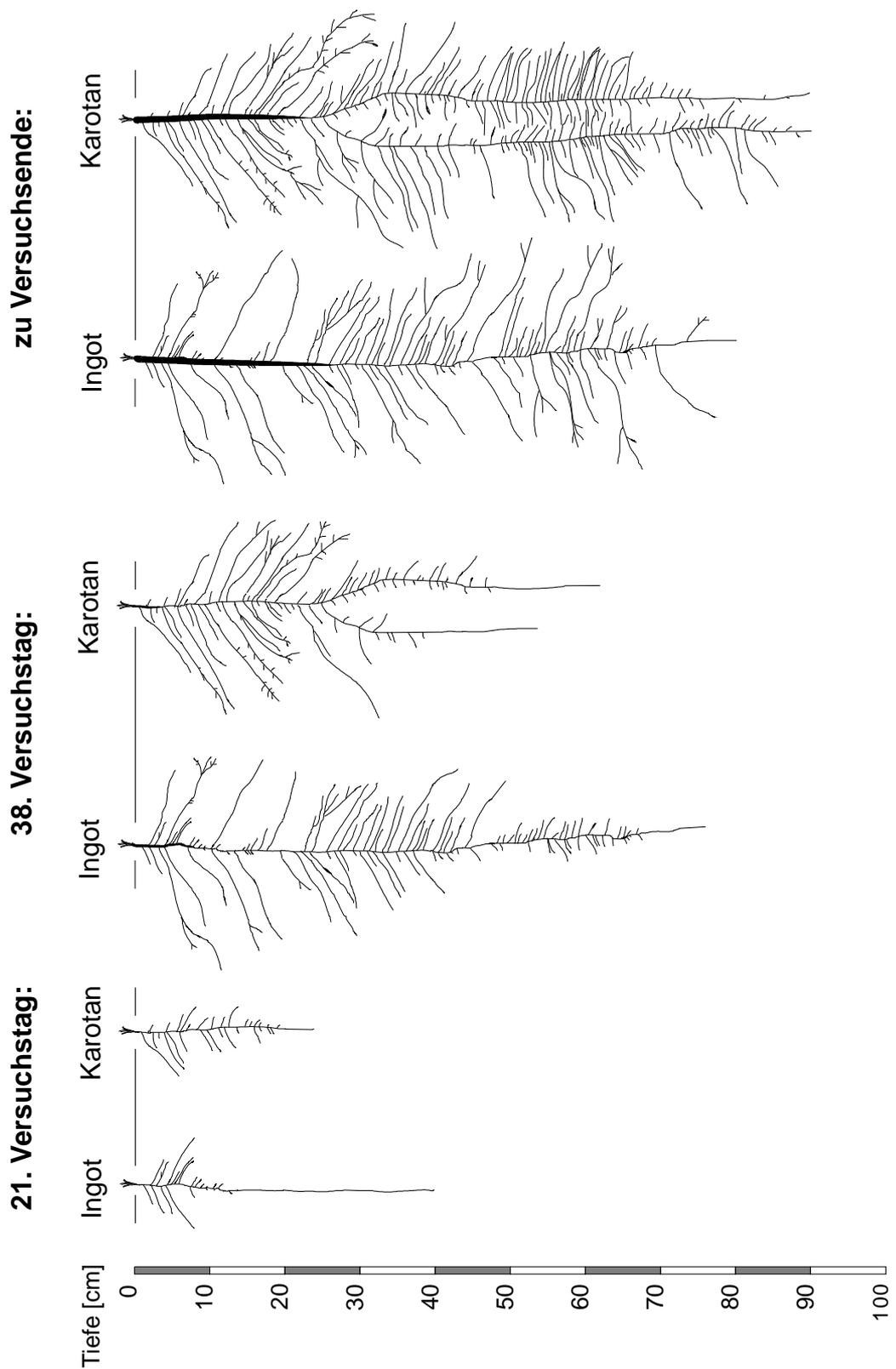


Abbildung 28: Entwicklung der Wurzelsysteme am Beispiel von zwei Versuchspflanzen der Sorten 'Ingot' und 'Karotan' (G2; 21., 38. und letzter Versuchstag)

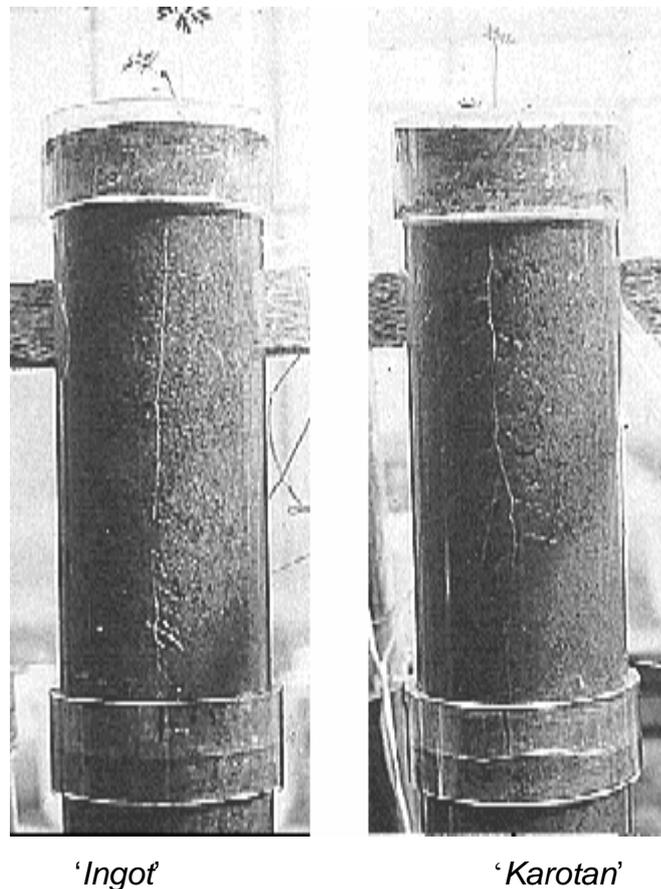


Abbildung 29: Wurzelsystem von Möhren der Sorten *'Ingot'* und *'Karotan'* nach 9 Versuchstagen (G2, Segmentlänge 25 cm)

Wurzellänge und Wurzelgewicht

Am Versuche wurden die Wurzeln aus vier Gefäßschichten ausgewaschen, gewogen und die Wurzellänge nach TENNANT (1975) ermittelt.

In allen Schichten waren die Wurzeln von *'Karotan'* schwerer und länger als die von *'Ingot'* (Abbildung 30). Allerdings hatte *'Karotan'*, wie bei der sichtbaren Wurzellänge deutlich wurde, erst zum Schluss einen stärkeren Zuwachs (Abbildung 27 und Abbildung 28).

Von beiden Sorten wurden die oberen Gefäßschichten (0-50 cm) intensiver durchwurzelt. Hier war sowohl das höchste Wurzelgewicht als auch die größte Wurzellänge zu finden. Mit zunehmender Tiefe nahmen das Wurzelgewicht und die Wurzellänge ab (Abbildung 30).

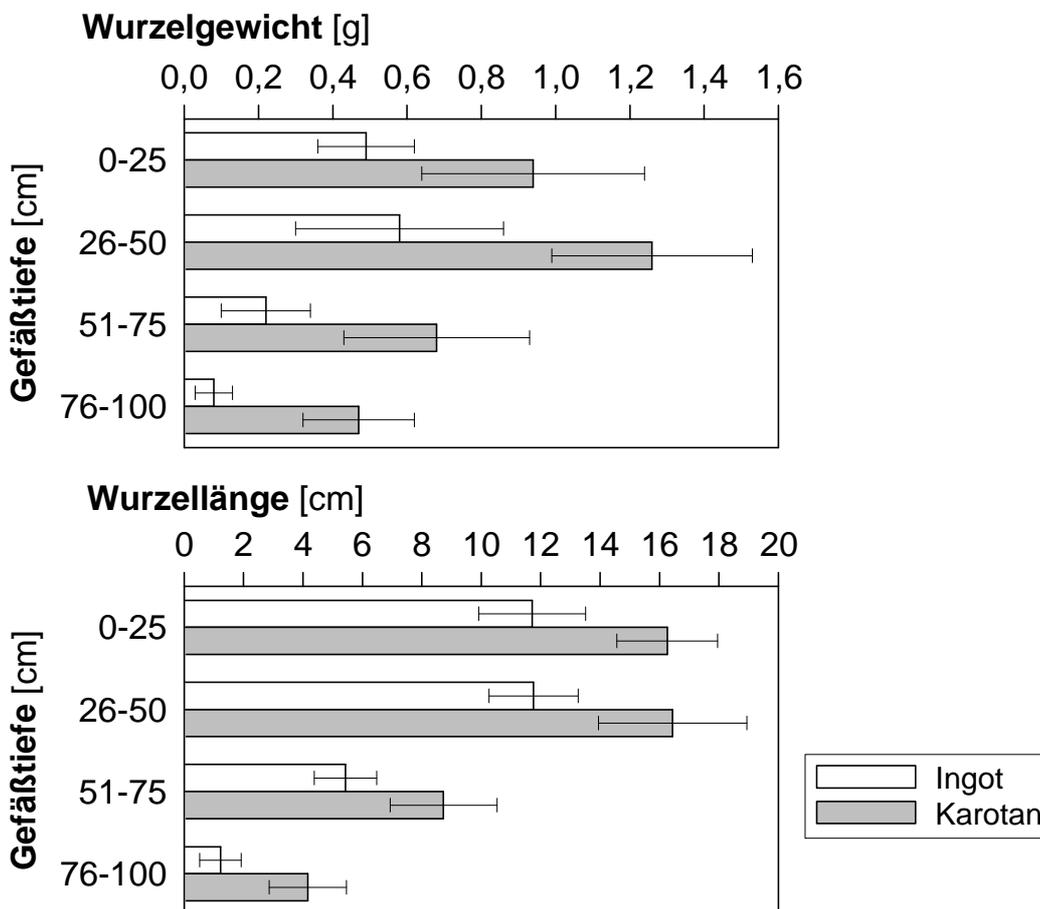


Abbildung 30: Wurzelgewicht und Wurzellänge (ermittelt nach TENNANT 1975, G2)

Da auch die unteren Gefäßschichten bis 100 cm Tiefe durchwurzelt waren und in Untersuchungen von MOJE (1997) auch Bodenschichten bis 100 cm Tiefe nahezu vollständig von Nitrat entleert wurden, muss die im N_{\min} -Konzept für Möhren verwendete anrechenbare Bodentiefe von 0-60 cm (SCHARPF 1991b) überprüft werden.

Laub- und Rübenfrischgewicht

Am Ende des Versuches hatten beide geprüften Sorten eine vergleichbare Masse an Frischsubstanz gebildet (45.4 g für 'Ingot', 49.0 g für 'Karotan', Abbildung 31), die Verteilung zwischen Laub- und Rübenmasse war jedoch unterschiedlich. Während bei 'Ingot' die Laubmasse nur ca. 25 % der Rübenmasse erreichte, war das Gewicht von Laub und Rübe bei 'Karotan' ungefähr gleich. Zum Zeitpunkt der Ernte hatte 'Karotan'

also ein Verhältnis von Laub- zu Rübenmasse von etwa 1:1 und 'Ingot' von etwa 1:4. 'Karotan' hatte zu diesem Zeitpunkt eine mittlere Blattzahl von 12,3, 'Ingot' von 9,3 (Ergebnisse nicht dargestellt). Auch in der Größe der einzelnen Blätter unterschieden sich die beiden Sorten. Mit einem Gewicht von 2 g / Blatt war das Gewicht eines einzelnen Blattes bei 'Karotan' ungefähr doppelt so hoch wie bei 'Ingot'. 'Ingot' bildet mit weniger Laub eine größere Rübe, während 'Karotan' den aufgrund des größeren Laubertrages möglichen potentiellen Rübenertrag nicht ausnutzt.

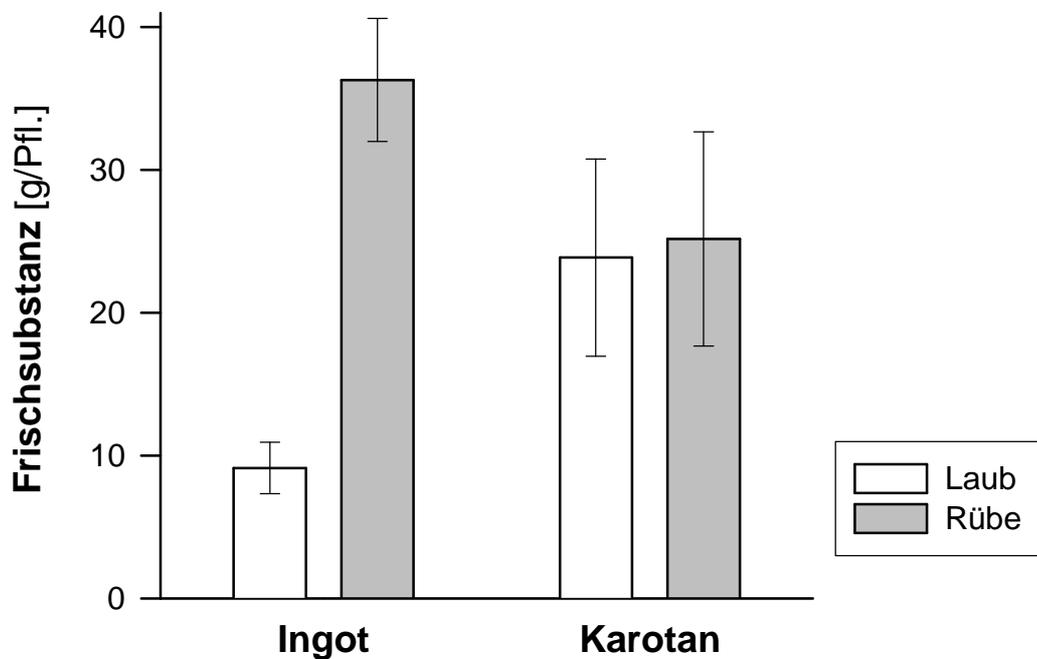


Abbildung 31: Laub- und Rübenertrag der Sorten 'Ingot' und 'Karotan' (G2, 60 Tage nach Aussaat)

3.2 Morphologie von Laub und Rübe

Da bei Möhren Sorteneigenschaften und Reifekriterien, wie z.B. Ertrag, Form oder Inhaltsstoffe, eine hohe umweltbedingte Variabilität aufweisen (BANGA 1962; HABBEN

1972), wurde in einem zweiten Versuch überprüft, inwiefern vermeintliche Sorteneigenschaften tatsächlich durch Anbaumaßnahmen bedingt werden. Dazu wurden in einem Freilandversuch die in dieser Arbeit verwendeten Sorten 'Ingot' und 'Karotan' unter verschiedenen an der Praxis orientierten und für die jeweilige Sorte sowohl typischen als auch untypischen Bedingungen angebaut.

3.2.1 Material und Methoden

Der Freilandversuch zum Wachstum von Laub und Rübe wurde auf dem Versuchsgelände in Ruthe (10 % Sand, 80 % Schluff, 10 % Ton, pH 6.5) durchgeführt.

Als Sorten wurden wie im vorherigen Versuch die Frischmarktsorte 'Ingot' und die Industriesorte 'Karotan' verwendet. Die Aussaat erfolgte im Beetanbau bei einer Beetbreite von 2 m mit einer 6-reihigen pneumatischen Sämaschine und einer Aussaattiefe von 2.5 cm am 5. Mai.

Um verschiedene Konkurrenzsituationen für die Pflanzen zu schaffen, wurde in zwei Bestandesdichten ausgesät: 50 und 150 Pfl./m². Die Aussaatstärke von 150 Pfl./m² entspricht der für Frischmarktsorten, die von 50 Pfl./m² der für Industriemöhren in der Praxis gebräuchlichen Aussaatstärke. Durch unterschiedlichen Feldaufgang wich die tatsächlich erreichte Bestandesdichte bei 'Ingot' mit nur 115 Pfl./m² von der Soll-Dichte ab, mit mehr als doppelt soviel Pflanzen war jedoch ein genügender Abstand zwischen den Konkurrenzstufen vorhanden.

Der N_{min}-Gehalt zur Saatzeit lag bei 150 kg N/ha in 0-90 cm. Eine zusätzliche Düngung wäre nicht erforderlich gewesen (MOJE 1997). Um jedoch Unterschiede zwischen den Pflanzen aufgrund von ungleichem Stickstoffangebot auszuschließen, wurde zusätzlich eine Stickstoffdüngung von 100 kg N/ha aufgebracht.

Der Versuch wurde mit vier Wiederholungen angelegt. Die Parzellengröße betrug 8 m². Die Versuchsvarianten sind in Tabelle 10 wiedergegeben.

Nach 99 ('Ingot') bzw. 114 Tagen ('Karotan') erfolgte die erste Ernte. Wegen der in der Praxis üblichen kürzeren Anbauzeit der Frischmarktsorte 'Ingot' begann deren Ernteperiode 14 Tage früher. Während der Ernteperiode wurde jede der beiden Sorten alle 14 Tage insgesamt 4 mal beerntet (siehe Tabelle 10). Bei jeder Ernte wurden pro Parzelle 1 m² aus der Parzellenmitte gerodet und die Möhren in Laub und Rübe aufgeteilt. Die

weitere Aufbereitung erfolgte je nach Analyse (siehe Tabelle 10) wie in Kapitel 2.1.1.3 beschrieben.

Für die Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes wurden auf allen Parzellen in 0-30, 30-60 und 60-90 cm Tiefe mit einem Pürckhauer-Bohrer Proben entnommen und bis zur Analyse kühl gelagert.

Tabelle 10: Versuchsfaktoren und Auswertung des Freilandversuches zum Wachstum von Rübe und Laub (F3)

Faktoren:	
Sorte	Ingot / Karotan
Stickstoffdüngung	ohne / 100 kg N/ha
Konkurrenz	hoch (150 Pfl./m ²) gering (50 Pfl./m ²)
Erntetermin	17.08. (d 99 - nur Ingot) 01.09. (d114) 22.09. (d135) 10.10. (d153) 26.10. (d169 - nur Karotan)
Wiederholungen	4
Auswertung:	<ul style="list-style-type: none"> – Trocken- und Frischsubstanz in Rübe und Laub – Nitrat in der Rübe (Frischsaft) – N_{\min} in 0-30, 30-60, 60-90 cm Tiefe

Die Verrechnung des Versuches erfolgte varianzanalytisch. Durch den unterschiedlichen Feldaufgang konnten die beiden Sorten nicht miteinander verglichen werden, so dass jede Sorte getrennt für sich verrechnet wurde. Nach der Varianzanalyse wurden bei signifikanten Einflüssen eines Faktors Mittelwertvergleiche mit dem Student-Newman-Keuls-Test (MUNZERT 1992) durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug 5 %.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

3.2.2 Ergebnisse

Frischgewicht von Laub und Rübe

Das unterschiedliche Stickstoffangebot hatte keinen signifikanten Einfluss auf das Frischgewicht von Laub und Rübe. Deshalb wurden für die Darstellung der Ergebnisse beide Stickstoffvarianten zusammengefasst.

Während der gesamten Ernteperiode war in allen Varianten die Rübe schwerer als das Laub (Abbildung 32). Zwischen den Sorten gab es deutliche Unterschiede im Wachstumsverlauf. Während bei *'Ingot'* das Rübenfrischgewicht pro Pflanze schon nach dem zweiten Erntetermin kaum mehr anstieg, nahm bei *'Karotan'* die Rübe während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich an Gewicht zu. Das Rübenwachstum war bei *'Karotan'* zum Zeitpunkt der letzten Ernte wahrscheinlich noch nicht abgeschlossen.

Das Laubwachstum beider Sorten verlief während des Versuchszeitraumes in etwa parallel. *'Karotan'* hatte im Vergleich zu *'Ingot'* höhere Laubgewichte, besonders bei geringer Konkurrenz. Bei beiden Sorten gab es nach dem dritten Erntetermin keinen Zuwachs mehr. Danach verringerte sich das Laubfrischgewicht und das Laub beider Sorten begann zum gleichen Zeitpunkt abzureifen.

Die unterschiedliche Konkurrenz zwischen den Pflanzen hatte bei den beiden hier verwendeten Sorten entscheidenden Einfluss auf die Größe der einzelnen Pflanze (Abbildung 32). Sowohl bei *'Ingot'* als auch bei *'Karotan'* war das Laub- und Rüben- gewicht pro Pflanze durch höhere Konkurrenz signifikant verringert.

Nitratgehalt in der Rübe

Die durch unterschiedliche Bestandesdichten bedingte Konkurrenz hatte auf den Nitratgehalt nur wenig Einfluss (Abbildung 32). Lediglich bei der Frischmarktsorte *'Ingot'* in der Variante ohne Stickstoffdüngung war bei geringer Konkurrenz, d.h. wenig Pflanzen pro Flächeneinheit, der Nitratgehalt signifikant erhöht. Bei hoher Stickstoffversorgung

war der Nitratgehalt in allen Varianten deutlich höher, signifikante Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Bestandesdichten waren jedoch nicht vorhanden.

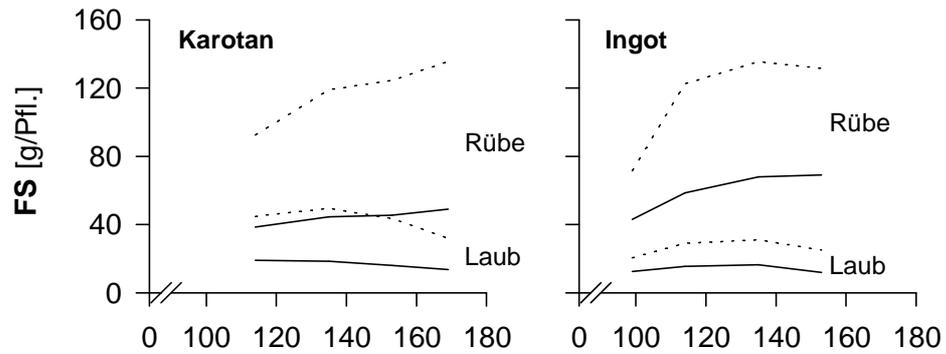
Analog zum Nitratgehalt war auch der N_{\min} -Gehalt im Boden bei den gedüngten Varianten erwartungsgemäß höher (Abbildung 32). 'Karotan' hatte bei gleichen oder sogar geringeren N_{\min} -Gehalten im Boden insgesamt einen höheren Nitratgehalt in der Rübe als 'Ingot'.

Innerhalb einer Stickstoffdüngungsstufe gab es jedoch keine positive Korrelation zwischen Nitratgehalt und N_{\min} -Gehalt zum Zeitpunkt der Ernte. Bei 'Ingot' nahm der Nitratgehalt sogar zu, während gleichzeitig der N_{\min} -Gehalt im Boden abnahm. Diese Ergebnisse zeigen die geringer werdende Beziehung zwischen dem Nitratgehalt und dem Stickstoffangebot zum Ende der Vegetationsperiode (siehe auch BRÜCKNER und HARTMANN 1985 sowie MOJE 1997).

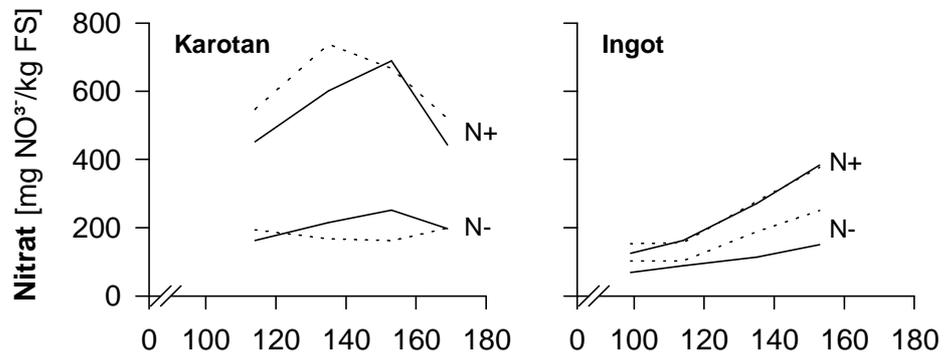
Vergleicht man den Verlauf von Frischgewicht, Nitratgehalt und N_{\min} -Gehalt, wird der Zusammenhang zwischen Nitratgehalt und Wachstum deutlich: Bei 'Ingot' war das Wachstum nach dem zweiten Erntetermin weitgehend abgeschlossen. Nach diesem Zeitpunkt stieg auch der Nitratgehalt an. Solange ein hohes Wachstum vorlag, blieb der Nitratgehalt auch bei hohen N_{\min} -Gehalten im Boden gering. Erst bei nachlassendem Wachstum stieg der Nitratgehalt an.

Bei 'Karotan' ist dieser Zusammenhang nicht deutlich. Obwohl 'Karotan' einen geringeren N_{\min} -Gehalt im Boden hatte, war der Nitratgehalt im Vergleich zu 'Ingot' höher. Moje (1997) stellte bei Industriemöhren in Erhebungsversuchen einen geringeren Zusammenhang zwischen N_{\min} -Rest und Nitratgehalt fest als bei Frischmarktmöhren. Sie führt das auf spätere Ernten und nachlassende Assimilationsleistung aufgrund der herbstlichen Witterung zurück. Dies kann hier nicht zutreffen, da beide Sorten zur gleichen Zeit beerntet wurden. Neben der Witterung müssen also noch andere Faktoren für die Höhe des Nitratgehaltes verantwortlich sein. Die unterschiedliche Reaktion der beiden Sorten weist auch auf genotypische Unterschiede hin.

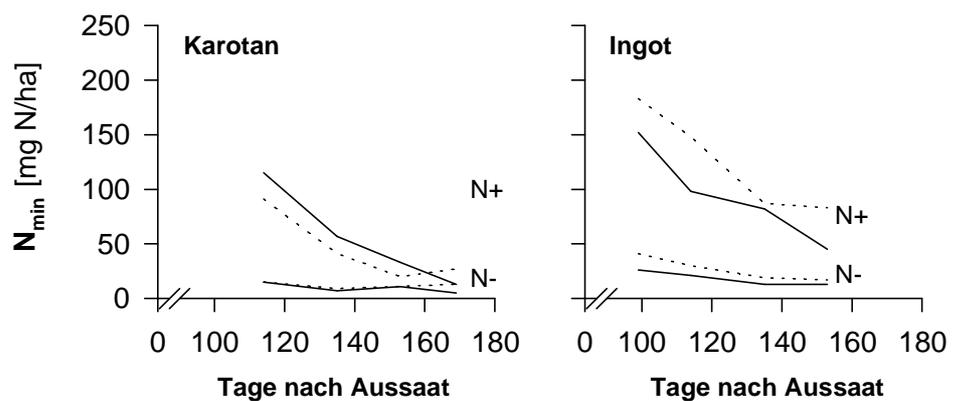
a) Frischgewicht



b) Nitratgehalt in der Rübe



c) N_{min}-Gehalt



..... Konkurrenz gering
 ————— Konkurrenz hoch

Abbildung 32: Frischgewicht von Rübe und Laub, Nitratgehalt in der Rübe und N_{min}-Gehalt des Bodens bei 'Ingot' und 'Karotan' in Abhängigkeit von Konkurrenz, Stickstoffangebot (nur b und c) und Erntetermin (F3)

4 NITRATKONZENTRATION IN VAKUOLEN VON EINZELZELLEN

Nitrat wird überwiegend in den Vakuolen der Zellen gespeichert. Der Nitratgehalt im Cytoplasma ist in der Regel sehr gering (HEIMER und FILNER 1971; FERRARI et al. 1973; MARTINOIA et al. 1981; GRANSTEDT und HUFFAKER 1982; NOTTON und HUCKLESBY 1983; SMIRNOFF und STEWART 1985; HERNANDEZ et al. 1995). Hohe Nitratkonzentrationen in den Vakuolen bestimmter Rübenbereiche können auf eine bevorzugte Speicherung von Nitrat in diesen Geweben hinweisen. Hier bestimmt dann die Nitratkonzentration in den Vakuolen maßgeblich den Nitratgehalt der betreffenden Gewebe, und eine Veränderung im Nitratgehalt wird zuerst in einer Veränderung der Vakuolenkonzentration sichtbar.

Im folgenden sollte deshalb untersucht werden, in welchen Bereichen der Rübe hohe Nitratkonzentrationen in den Vakuolen vorliegen und wie diese Bereiche auf eine Veränderung der Nitrataufnahme reagieren. Dazu wurde die Nitratkonzentration in den Vakuolen von einzelnen Zellen der Rübe bei zunehmendem Stickstoffangebot gemessen. Um vergleichen zu können, in welchem Maße sich die Veränderung der Vakuolenkonzentration auf die Nitratkonzentration des umliegenden Gewebes auswirkt, wurde außerdem die Nitratkonzentration des umgebenden Gewebebereiches bestimmt.

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Sorten

Die Bestimmung des Nitratgehaltes in Vakuolen von Einzelzellen wurde mit der Sorte 'Ingot', einer mittelfrühen Frischmarktsorte, durchgeführt.

4.1.2 Pflanzenanzucht

Die Pflanzenanzucht erfolgte in Klimakammern. Die Klimakammern, Klimabedingungen, verwendete Kulturgefäße und Substrate sind in Kapitel 2.1.1 beschrieben.

Die Nährlösungszusammensetzung ist Tabelle 3 zu entnehmen. Nach Beginn der Messungen wurde der Nitratgehalt der Nährlösung durch Zugabe von $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ in zwei Schritten (Tag 4 und 9) auf $14 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ verdoppelt.

4.1.3 Analytik und Modifizierung der Methode zur Messung von Nitrat in Vakuolen von Einzelzellen

a) Probeaufbereitung

Die Pflanzen wurden bei einem maximalen Rübindurchmesser von 3 cm geerntet. Aufgrund der langwierigen Einzelzellmessungen konnte jeweils nur eine Pflanze pro Tag gemessen werden. Bei der Ernte wurde 4 h nach Beginn der Tagphase eine Pflanze den Gefäßen entnommen, gewaschen und abgetrocknet. Im Anschluss daran wurde 2 cm unterhalb des Blattansatzes eine Gewebescheibe von ca. 0.5 cm Dicke entnommen und geviertelt (Abbildung 33).

b) Bestimmung der Konzentration der Inkubationslösung

Zur Bestimmung von Nitrat in Vakuolen von Einzelzellen wurde eine modifizierte Druckmess-Sondentechnik verwendet. Mit dieser Methode sind Messungen an intakten Pflanzen möglich. Eine Messung in tieferen Zellschichten ist aufgrund der Kapillarengröße allerdings schwierig. Deshalb wird mit Gewebestücken gearbeitet, die zum Schutz vor Austrocknen in einer Lösung inkubiert werden. Hier wurde als Inkubationslösung eine Mannitlösung gewählt. Der Zuckeralkohol Mannit wird von der Zelle in zu vernachlässigender Menge aufgenommen, ist nicht toxisch, weitgehend physiologisch inert und beeinflusst den Zellturgor und den osmotischen Druck nahezu nicht (PFEIFFENSCHNEIDER 1990; HAIN 1995).

Für die Entnahme von Zellsaftproben musste eine Konzentration des Mannits gefunden werden, die den osmotischen und physiologischen Zustand der Zellen so wenig wie möglich beeinflusst. Die optimale Konzentration der Inkubationslösung ist die, bei der der Zellturgor der Gewebestücke in der Inkubationslösung dem Zellturgor in der intakten Pflanze am nächsten kommt.

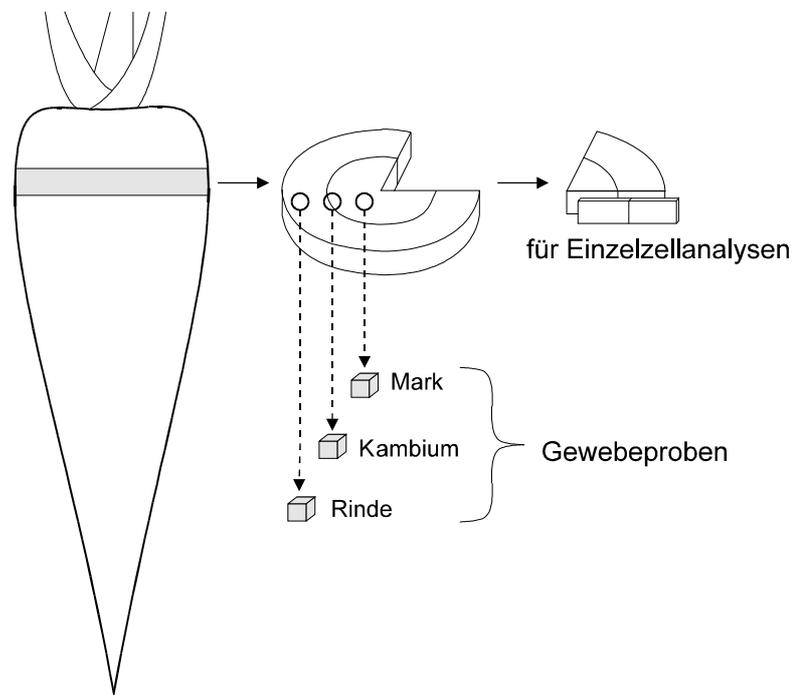


Abbildung 33: Aufteilung der Möhre für die Gewebe- und Einzelzellproben

Die Bestimmung des Zellurgors wurde mit der bei HAIN (1995) beschriebenen modifizierten Zelldruckmess-Sonde durchgeführt.

Die Sonde besteht aus einer mit Silikonöl gefüllten Glasmikrokapillare, die mit einer ebenfalls mit Silikonöl gefüllten Messkammer verbunden ist. Über einen motorgetriebenen Druckkolben kann das Volumen in der Kammer und so der Innendruck in der Kammer und auch der Kapillare verändert werden (Abbildung 34).

Für die Messung des Turgordruckes wird entweder eine intakte Rübe auf dem Binokulartisch oder ein Schnittpräparat in einem mit Mannitlösung gefüllten Plexiglasbehälter befestigt. Die Kapillarenspitze wird in eine Zelle eingestochen und deren Zellsaft schießt in die Kapillare. Dadurch wird das Silikonöl komprimiert, und in der Spitze der Kapillare bildet sich ein Meniskus zwischen Zellsaft und Silikonöl aus. Der Turgor der Zelle überträgt sich dabei auf das Meßsystem. Mittels des Druckkolbens wird der Druck im System erhöht und der Meniskus so nah wie möglich an die Zelle geschoben. Wenn der Meniskus weder eine konvexe noch eine konkave Form aufweist (Abbildung 35), ist der Druck im System überall gleich. Dieser Druck entspricht dem Turgordruck in der Zelle.

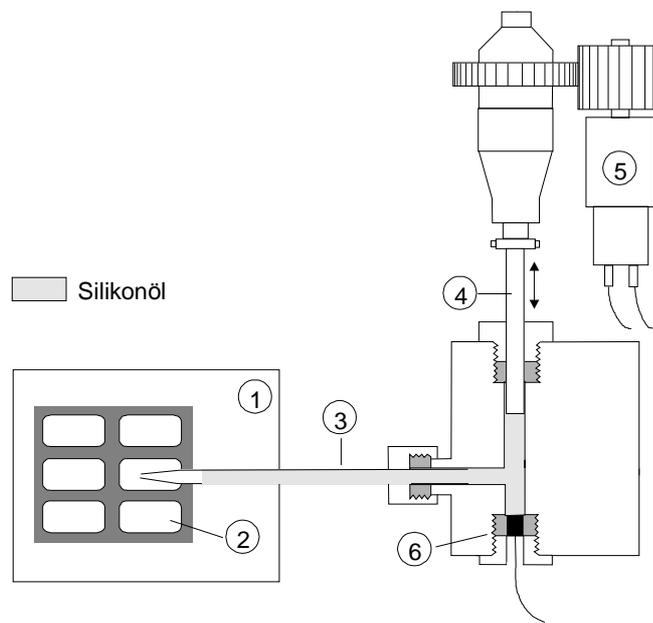
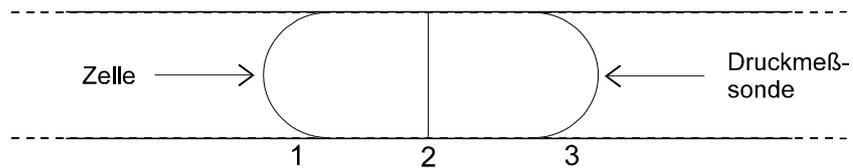


Abbildung 34: Schematische Darstellung der modifizierten Druckmess-Sonde (verändert nach HAIN 1995).

- Inkubationsmedium, , Gewebestück, f Glasmikrokapillare, ,, Druckkolben, ... Elektromotor, † Druckaufnehmer



- Meniskus 1: Zellturgor < Druck in der Sonde
- Meniskus 2: Zellturgor = Druck in der Sonde
- Meniskus 3: Zellturgor > Druck in der Sonde

Abbildung 35: Skizze der Meniskusbewegung in der Kapillarenspitze

Zur Bestimmung der optimalen Konzentration der Inkubationslösung wurde der Turgor in der äußersten Rindenschicht von intakten Rüben und von Gewebestücken aus der Rinde, die in Lösungen mit unterschiedlichen Mannitkonzentrationen inkubiert wurden, bestimmt und miteinander verglichen.

Der Turgor in den äußeren Rindenzellen an intakten Rüben hatte einen Wert von 0.51 ± 0.05 MPa (Tabelle 11). Der Turgor in Rindenzellen der inkubierten Gewebestücke nahm mit steigender Konzentration der Mannitlösung signifikant ab (Abbildung 36).

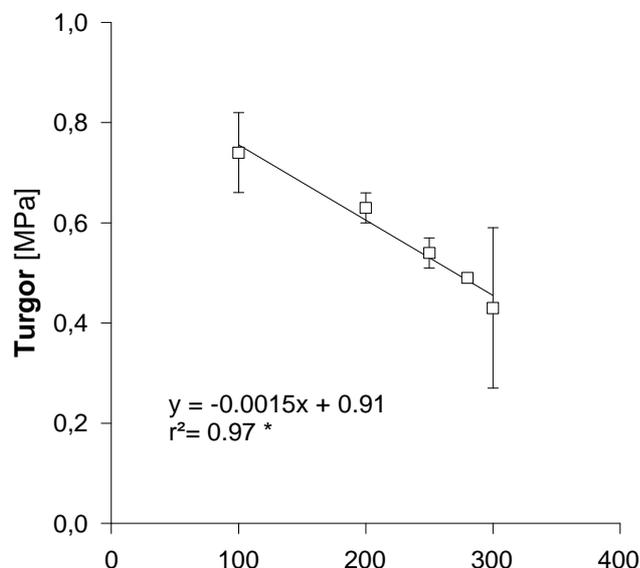


Abbildung 36: Turgor in Schnittpräparaten von Rindenzellen in Abhängigkeit der Mannitkonzentration des Inkubationsmediums

In den Gewebestücken aus der Rinde stellte sich bei einer Mannitkonzentration von $250 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ein Turgor von 0.53 ± 0.03 MPa ein (Abbildung 36). Bei einer Mannitkonzentration von $280 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ lagen die gemessenen Werte (0.49 ± 0.01 MPa) zwar näher an denen der intakten Rübe (Tabelle 11), der Zelldruck war aber nur für sehr kurze Zeit konstant und nahm dann stetig ab - ein Zeichen für ein Leckschlagen der Zelle. Bei $250 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ war eine längere und stabile Messung in allen Bereichen der Rübe möglich, so dass diese Konzentration in den weiteren Messungen als Inkubationsmedium eingesetzt wurde.

Unter diesen Bedingungen war der Turgor in den Gewebestücken geringfügig höher als in der intakten Rübe (Tabelle 11). Auch bei PFEIFFENSCHNEIDER (1990) war der Turgor in inkubierten Gewebestücken im Vergleich zu dem intakter Rüben von Möhren leicht erhöht. Ursache dafür ist sehr wahrscheinlich das hohe Wasserpotential der Inkubationslösung und ein daraus resultierender Wasserfluss in die Zellen. Dieser Wasserfluss in die Zellen würde auch die negative Korrelation zwischen Turgor und Konzentration der Inkubationslösung (Abbildung 36) erklären, da bei steigender Konzentration der Inkubationslösung die Wasserpotentialdifferenz zwischen Inkubationslösung und Zelle sinkt und der Wasserfluss in die Zellen und so auch die Turgorveränderung (s.o.) geringer wären.

Insgesamt ist der Turgor im Mark um etwa 0.1 MPa höher als in der Rinde (Tabelle 11). Diese Werte stimmen mit Ergebnissen von PFEIFFENSCHNEIDER (1990) überein.

Tabelle 11: Turgor von Zellen in intakten Möhren (äußere Rindenschicht) und in Gewebestücken aus Mark und Rinde

	Turgor [MPa]
intakte Möhre (äußere Rindenschicht)	0.51 ± 0.05
Gewebestücke:	
Rinde	0.53 ± 0.03
Mark	0.63 ± 0.06

c) Probenahme

Zur Entnahme von Proben wurde einem Viertel der entnommenen Gewebescheibe seitlich eine 1 mm dünne Scheibe abgeschnitten (Abbildung 33), für eine Stunde in einer $250 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ Mannitlösung gebadet, kurz in einer $0.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ CaSO_4 -Lösung gespült und auf einem Plexiglashalter befestigt, der mit wassergesättigtem flüssigem Paraffin gefüllt war, das durch ein Wassertemperiersystem konstant bei einer Temperatur von 20°C gehalten wurde. An vier Stellen wurden dann Zellsaftproben aus den Vakuolen entnommen (Abbildung 37). Zum Entnehmen und Pipettieren von Proben aus Einzelzellen wurde das bei HAIN (1995) beschriebene Pipettiersystem benutzt.

Dazu wurde mit einer am Pipettiersystem befestigten Mikrokapillare, deren Spitze mit Paraffinöl gefüllt war, in die Zelle gestochen. Aufgrund des Turgors schoss der Zellsaft in die Kapillare, die dann sofort wieder aus der Zelle gezogen wurde und bis zur Messung kühl aufbewahrt wurde.

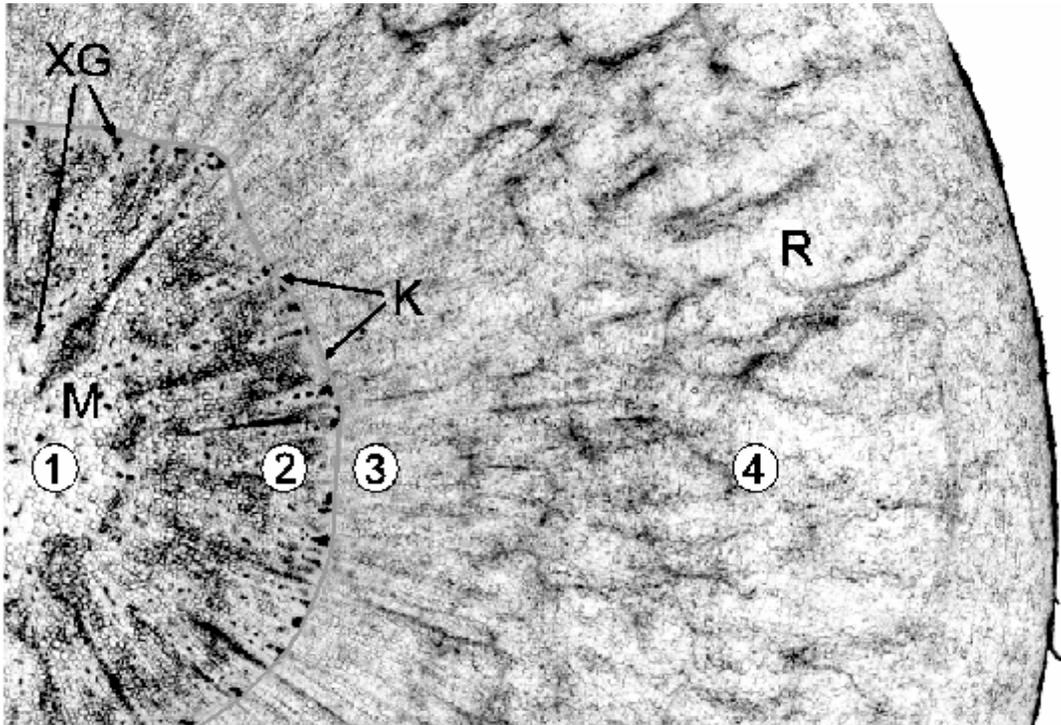


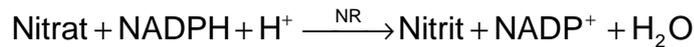
Abbildung 37: Querschnitt durch eine Möhre ca. 2 cm unterhalb des Blattansatzes (M = Mark, K = Kambium, R = Rinde, XG = Xylemgefäß). Entnahme von Einzelzellproben bei • - „ (• inneres Mark, , kambiales Mark, *f* kambiale Rinde, „ äußere Rinde)

d) Bestimmung von Nitrat mittels Fluoreszenzmikroanalytik

Die Grundlage für die hier durchgeführte fluoreszenzmikroskopische Bestimmung von Nitrat bildete die bei BEUTLER et al. (1986) beschriebene Methode zur enzymatischen Bestimmung von Nitrat in Lebensmitteln und die bei ZHEN et al. (1991) beschriebene fluoreszenzmikroskopisch-enzymatische Bestimmung von Nitrat im Vakuolensaft von Einzelzellproben.

Prinzip

Nitrat wird durch reduziertes NADPH in Gegenwart des Enzyms Nitratreduktase (NR) zu Nitrit reduziert:



Die bei dieser Reaktion verbrauchte NADPH-Menge ist der Menge an umgesetztem Nitrat proportional.

Der Verbrauch an NADPH kann aufgrund der unterschiedlichen Fluoreszenz von NADPH und NADP als abnehmende Fluoreszenz gemessen werden (ZHEN et al. 1991). Die Änderung der emittierten Fluoreszenzstrahlung ist der Menge an umgesetztem NADPH und so der Menge an reduziertem Nitrat proportional.

Fluoreszenzmikroanalytik

Die durch UV-Einstrahlung emittierte Fluoreszenzstrahlung von NADPH (Emissionsmaximum $\lambda = 440$ nm) wurde mit einem Fluoreszenzanalytiksystem bestehend aus Fluoreszenzmikroskop, Detektor und Mikroskopsystemprozessor gemessen.

Veränderung und Optimierung der Reaktionsbedingungen

Bei der fluoreszenzmikroskopischen Bestimmung von Nitrat nach BEUTLER et al. (1986) und ZHEN et al. (1991) wird ein Tropfen einer Mischung von Puffer, FAD und NADPH unter Paraffin auf einen Objektträger ausgelegt, dann Probe oder Standard hinzupipettiert und die Fluoreszenz des Tropfens gemessen. Anschließend wird die Reaktion durch Zugabe von Nitratreduktase gestartet und nach einer Wartezeit erneut die Fluoreszenz gemessen.

Die Durchführung der oben beschriebenen Methode war jedoch wie im folgenden beschrieben aus mehreren Gründen nicht möglich und wurde deshalb modifiziert.

Die Fluoreszenz von NADPH nahm auch ohne Enzymzugabe deutlich mit der Zeit ab (Abbildung 38). Die Fluoreszenzabnahme des NADPH verlief nicht linear. In den ersten dreißig Minuten nach dem Auslegen der Tropfen nahm die Fluoreszenz nur langsam,

anschließend sehr viel schneller ab. Auch eine Erhöhung der Konzentration von NADPH veränderte diesen Kurvenverlauf nicht.

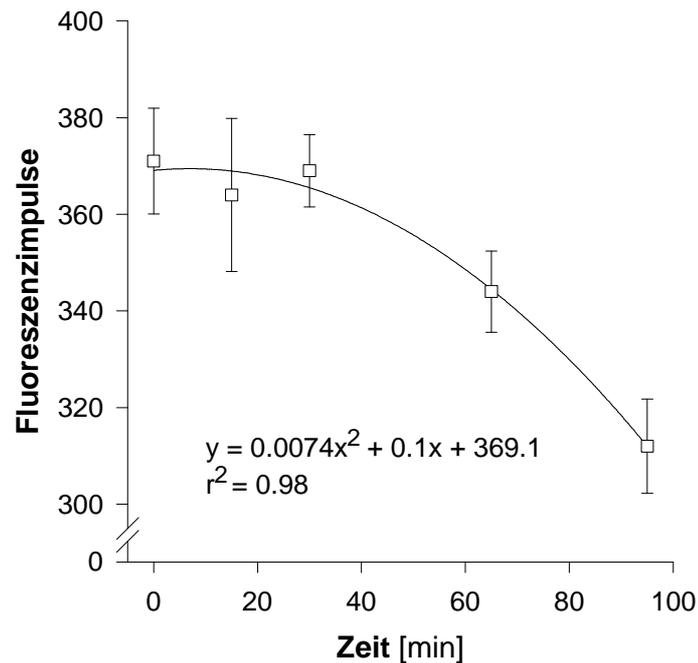


Abbildung 38: Abnahme der Fluoreszenz unter Paraffin

Um die Messung innerhalb der Zeitspanne zu beenden, in der die Fluoreszenz des NADPH nur leicht absank, war es notwendig, den Reaktionsablauf vom Beginn des Pipettierens bis zur abschließenden Fluoreszenzmessung auf ca. 30 min zu verkürzen.

Dazu wurden folgende Änderungen der Reaktionsbedingungen vorgenommen:

- Da die Nitratreduktase bereits mit FAD vorbehandelt war (BEUTLER et al. 1986), wurde kein FAD mehr zugefügt und dadurch leichteres und auch schnelleres Pipettieren möglich.
- Die Konzentration der Pufferlösung wurde deutlich reduziert.
- NADPH wurde gemeinsam mit Nitratreduktase im letzten Pipettierschritt zugegeben.
- Es wurde nur noch eine Fluoreszenzmessung durchgeführt.

Daraus ergibt sich folgender Reaktionsablauf (Konzentrationen und Volumina in Tabelle 12):

1. Auslegen eines Tropfens Puffer
2. Hinzupipettieren von Probe oder Standard
3. Zugabe der Mischung aus NADPH / Nitratreduktase (Verhältnis 1:3)
4. Messung der Fluoreszenz

Tabelle 12: Konzentrationsvergleich der verwendeten Reagenzien im Testmedium bei den unterschiedlichen Analyseverfahren

	BEUTLER et al. (1986)		ZHEN et al. (1991)		modifiziert	
Verwendete Reagenzien						
Imidazol-Puffer, pH 7.8	100	mol·m ⁻³	91	mol·m ⁻³	33	mol·m ⁻³
NADPH	13	mol·m ⁻³	4.1	mol·m ⁻³	50	mol·m ⁻³
FAD	0.23	mol·m ⁻³	0.0105	mol·m ⁻³	-	
Nitratreduktase	4.5	U·ml ⁻¹	4.5	U·ml ⁻¹	2	U·ml ⁻¹
Konzentration im Test						
Imidazol-Puffer, pH 7.8	36	mol·m ⁻³	45.5	mol·m ⁻³	11.4	mol·m ⁻³
NADPH	0.22	mol·m ⁻³	2.05	mol·m ⁻³	7.3	mol·m ⁻³
FAD	0.0038	mol·m ⁻³	0.00525	mol·m ⁻³	-	
Nitratreduktase	70	U·l ⁻¹	1.35	U·l ⁻¹	88	U·l ⁻¹

Die Aktivität der Nitratreduktase zeigte eine Abhängigkeit von der Lieferung, dem Alter und der Lagerzeit der angebrochenen Charge. Die Endkonzentration von 88 U·l⁻¹ im Test erwies sich als zuverlässig. Bei einer geringeren Konzentration wurde das vorhandene Nitrat innerhalb von 30 min nicht immer vollständig umgesetzt. Eine Erhöhung über 4 U·ml⁻¹ in der Reagenzlösung war aufgrund der Konsistenz der Lösung nicht mehr pipettierbar.

Die Aktivität der Nitratreduktase wurde außerdem von der Konzentration der Pufferlösung beeinflusst. Die zuerst in Anlehnung an BEUTLER et al. (1986) verwendete Konzentration des Imidazol-Puffers von 100 mol·m⁻³ in der Reagenzlösung verringerte

die Geschwindigkeit der Nitratumsetzung. Erst nach Verdünnen des Puffers auf $33 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ (Reagenzlösung) lief die Reaktion zuverlässig bis zum Endpunkt.

Durchführung

Mit einem Kapillarenziehgerät wurden aus Glaskapillarrohlingen (Durchmesser: außen 1 mm, innen 0.75 mm) Mikrokapillaren hergestellt. Mit einer Mikrokapillarenschmiede wurden in den Kapillarenspitzen in verschiedenen definierten Abständen zur Spitze Konstriktionen erzeugt, die den Innendurchmesser bis auf weniger als 25 % des ursprünglichen Durchmessers verringerten. Die Kapillarenspitzen wurden dann unter dem Stereomikroskop geöffnet.

Eine Mikrokonstriktionskapillare wurde auf einem Mikromanipulator (Leitz) befestigt und über einen Silikonschlauch mit einer Kunststoffspritze verbunden. Das Schlauchsystem konnte über einen Elektrohbmagneten, gesteuert über ein Fußpedal, druckdicht verschlossen werden. Durch Bewegen des Spritzenkolbens wurden Flüssigkeiten bis zur Konstriktion in die Glaskapillare gezogen. So konnten je nach Abstand zwischen Konstriktion und Kapillarenspitze unterschiedlich große Mengen reproduzierbar mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ unter einem Stereomikroskop pipettiert werden (Abbildung 39).

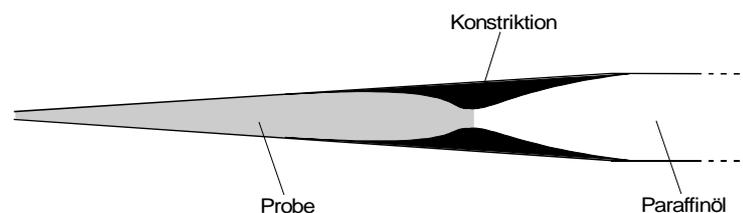


Abbildung 39: Schematische Darstellung einer mit Probe gefüllten Konstriktionskapillarenspitze

Zur Bestimmung der Volumina von der Konstriktion bis zur Kapillarenspitze wurde Wasser aufgenommen und in Öl pipettiert, die Durchmesser der Wassertropfen gemessen und unter Annahme einer Kugelform die Volumina bestimmt.

Alle Reaktionsschritte erfolgten unter puffergesättigtem dickflüssigem Paraffin. Hierzu wurden auf Standardobjektträger aufgeklebte Aluminiumringe (Höhe 3 mm, Innendurchmesser 18 mm) mit Paraffin gefüllt.

Parallel mit jedem Probendurchgang erfolgte eine Kalibrierung durch Standardmessungen. Jede Probe und jeder Standard wurden in vierfacher Wiederholung ausgelegt und gemessen.

Im ersten Pipettierschritt wurden je Probe und Standard vier 500 μ l-Tropfen Imidazol-Puffer auf den Objektträger aufgebracht. Anschließend wurde jedem Tropfen 120 μ l Standard bzw. Probe zugegeben. Die Messung wurde gestartet mit 850 μ l einer Mischung von NADPH und Nitratreduktase (Verhältnis 1:3). Nach ca. 15 min Wartezeit hatte die Reaktion ihren Endpunkt erreicht, und es erfolgte die Messung am Fluoreszenzmikroskop.

4.1.4 Analytik der Gewebeproben

a) Probenahme und -aufbereitung

Für die parallel zu den Einzelzellanalysen durchgeführten Analysen in Gewebeproben wurden aus den restlichen drei Vierteln der der Rübe entnommenen Scheibe (Abbildung 33) aus dem Mark, der Rinde und dem Bereich des Kambiums Proben von ca. 0.5 g entnommen, in flüssigem Stickstoff eingefroren und bei -20 °C gelagert.

b) Nitrat

Für die Nitratbestimmung in den Gewebeproben wurde etwa 100 mg tiefgefrorenes Versuchsmaterial in 1 ml-Eppendorfgefäße eingewogen, deren Spitze mit Filterpapier ausgelegt war, und bei 80 °C für 5 min im Wasserbad erhitzt. Danach wurde mit einer Nadel ein Loch in die Spitze des Eppendorfgefäßes gebohrt, in ein weiteres Eppendorfgefäß gesteckt und bei 13000 g für 10 min zentrifugiert, um nicht gelöste Gewebekomponenten (potentielle Kristallisationskeime) aus dem Press-Saft zu entfernen. Die Bestimmung von Nitrat erfolgte mit dem Fluoreszenzmikroskop.

c) Reduzierende Kohlenhydrate

Etwa 100 mg tiefgefrorenes Versuchsmaterial wurde mit 5 ml 80 %igem Ethanol 10 min in einem Reagenzglas bei 80 °C extrahiert. Anschließend wurde die Extraktionslösung in ein Reagenzglas (=Sammelbehälter) umgefüllt. Das verbliebene Versuchsmaterial wurde in einem Mörser mit 1 ml 10 %igem Ethanol zerrieben, mit 3 ml 10 %igem Ethanol in das Reagenzglas zurückgespült und 5 min bei 60 °C extrahiert. Danach wurde der Extrakt 10 min bei 2400 g zentrifugiert und der Überstand in den Sammelbehälter überführt. Für die Messung wurden 0.5 ml Probe, 0.5 ml 5 %iges Phenol und 2.5 ml H₂SO₄ gemischt und nach 30 min die Extinktion am Spektralphotometer bei einer Wellenlänge von 490 nm gemessen.

d) Kalium und Chlorid

Etwa 100 mg tiefgefrorenes Versuchsmaterial wurde in Reagenzgläser eingewogen und mit 8 ml 0.5 % HNO₃ im Wasserbad bei 80 °C über Nacht extrahiert. Nach dem Abkühlen wurden im Press-Saft die K-Gehalte mit einem Flammenphotometer und die Cl-Gehalte mit einem Chlorid-Titrator bestimmt.

e) Osmotischer Druck

Die Probenaufbereitung für die Messung des osmotischen Druckes erfolgte wie bei Nitrat. Anschließend wurde die Bestimmung mit einem Mikroliter-Osmometer nach dem Prinzip der Gefrierpunktniedrigung durchgeführt.

4.1.5 Statistische Auswertung

Für die Auswertung der Einzelzellanalysen und Gewebeproben wurde der Messzeitraum in zwei Phasen unterteilt. Phase 1 umfasst den Zeitraum von Beginn des Messzeitraumes (d 1-9), Phase 2 den Zeitraum nach der 2. Erhöhung des Stickstoffangebotes bis zum Ende des Versuches (d 10-48). Für jede der beiden Phasen wurde der Phasenmittelwert berechnet, die Differenz der Mittelwerte mit dem χ^2 -Test für Mittelwerte (COCHRAN 1954) geprüft, eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt und das Bestimmtheitsmaß errechnet.

Unterschiedliche Buchstaben innerhalb von Tabellen oder Abbildungen stehen für

signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Nitratkonzentration in Vakuolen von Einzelzellen

Durch die Erhöhung des Stickstoffangebotes veränderte sich die Nitratkonzentration im Vakuolensaft der Zellen nur im kambialen Mark und der kambialen Rinde signifikant, also in den Zellen, die in der Nähe des Kambiums lagen (Abbildung 40). Die Zellen des kambialen Marks reagierten zunächst kaum auf die erste Erhöhung des Stickstoffangebotes. Nach der zweiten Erhöhung und darauf folgendem konstantem Stickstoffangebot in der zweiten Phase des Messzeitraumes war ein signifikanter Anstieg vorhanden. In der kambialen Rinde nahm die Nitratkonzentration in den ersten Mess-tagen trotz höheren Stickstoffangebotes zunächst signifikant ab. Erst bei einem Nitratangebot von $14 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ war ein signifikanter Anstieg der Nitratkonzentration in den Vakuolen zu beobachten.

Im inneren Mark stieg die Nitratkonzentration während der Messperiode zwar tendenziell an, und auch der Mittelwert von Phase 2 lag deutlich über dem von Phase 1 (Tabelle 13), dieser Anstieg ließ sich jedoch aufgrund der hohen Streuung der Messwerte nicht statistisch absichern.

In der äußeren Rinde veränderte sich die Nitratkonzentration in den Vakuolen während der gesamten Messdauer nicht signifikant und blieb konstant auf einem sehr geringen Niveau.

Mit Ausnahme des inneren Marks bestätigen auch die in Tabelle 13 aufgeführten Phasenmittelwerte der beprobten Bereiche die in Abbildung 40 gezeigten Reaktionen auf die Erhöhung des Stickstoffangebotes. Es reagierten also besonders die Bereiche auf das höhere Stickstoffangebot, die in der Nähe der am Kambium konzentrierten Xylemgefäße lagen. Diese Ergebnisse bestätigen auch die in den Klimakammer-versuchen (K1 und K3) gefundene radiale Verteilung von Nitrat in der Rübe.

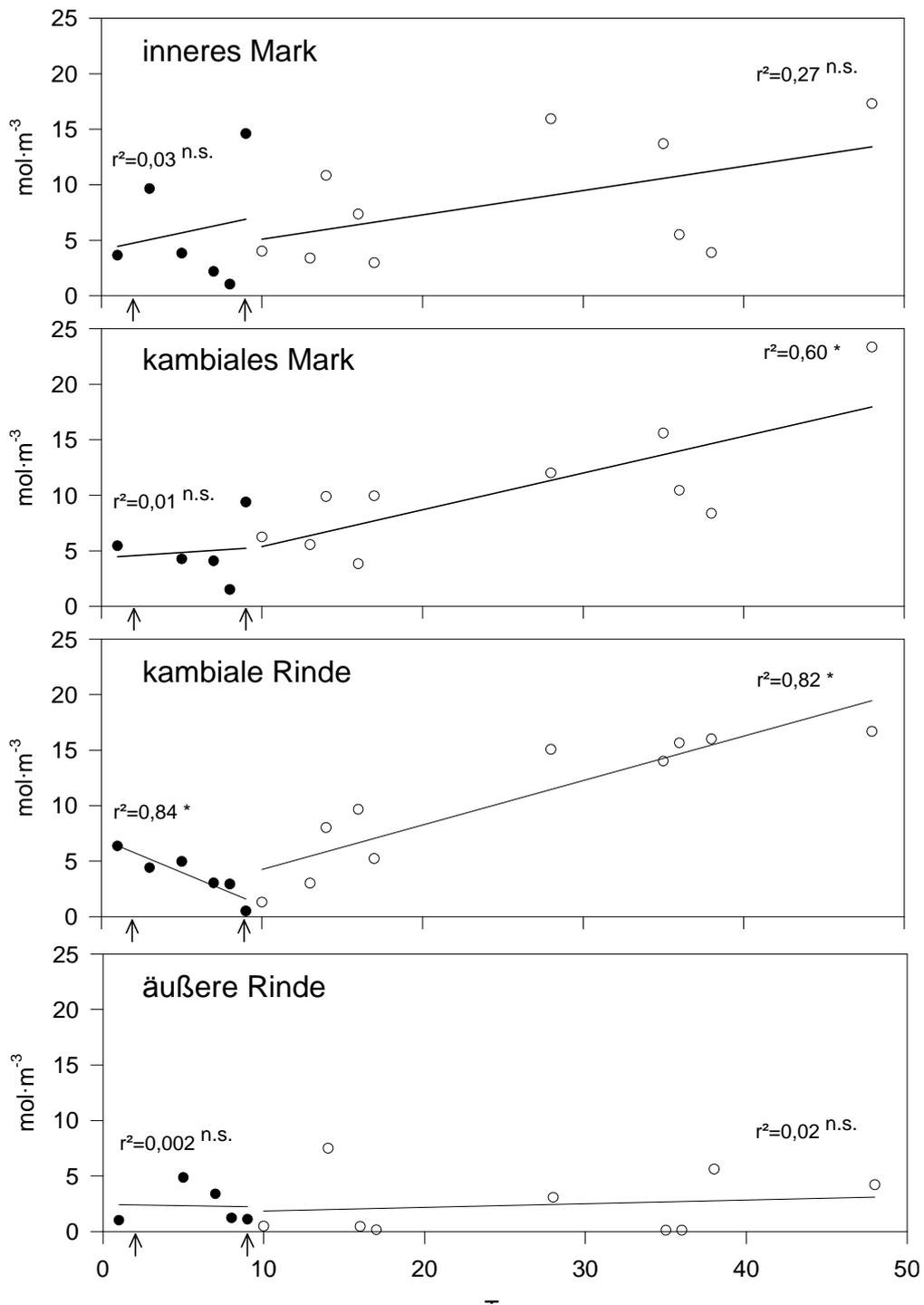


Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Nitratkonzentrationen in Vakuolen von Einzelzellen (K4, \uparrow = Erhöhung der Nitratkonzentration in der Nährlösung um jeweils $3.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$)

Tabelle 13: Mittelwert ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) und Standardabweichung der Nitratkonzentration von Einzelzellproben (K4, unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der zwei Phasen, $\alpha=0.05$)

	Phase 1: (d 1-9)	Phase 2: (d 10-48)
inneres Mark:	5.82 ± 5.23 a	8.48 ± 5.52 a
kambiales Mark:	4.93 ± 2.87 a	10.52 ± 3.63 b
kambiale Rinde:	3.70 ± 2.02 a	10.45 ± 3.81 b
äußere Rinde:	2.31 ± 1.73 a	2.41 ± 2.81 a

4.2.2 Gewebeproben

Die Gewebeproben wurden aus den schon bei den Einzelzellproben beprobten Bereichen entnommen. Die kambiale Rinde und das kambiale Mark konnten dabei nicht getrennt beprobt werden und wurden zu einer Probe zusammengefasst. Dann wurde der Nitratgehalt bestimmt. Um die Auswirkung der Erhöhung des Stickstoffangebotes auf den osmotischen Wert der Zellen und seine Zusammensetzung zu untersuchen, wurden außerdem neben dem osmotischen Druck noch der Kalium- und Chloridgehalt sowie der Gehalt an reduzierenden Kohlenhydraten bestimmt.

a) Nitratgehalt

Die Nitratkonzentrationen in den Gewebeproben waren zu Beginn der Messung geringer als die in den Vakuolen. Die geringeren Werte könnten durch eine Verdünnung der hohen Nitratkonzentration der Vakuolen durch nichtvakuoläre Bereiche mit geringerer Nitratkonzentration verursacht werden, da in den Gewebeproben sowohl Apoplast als auch Symplast enthalten sind. Nach Erhöhen des Stickstoffangebotes nahm die Nitratkonzentration in allen drei Bereichen zu (Abbildung 41, Tabelle 14).

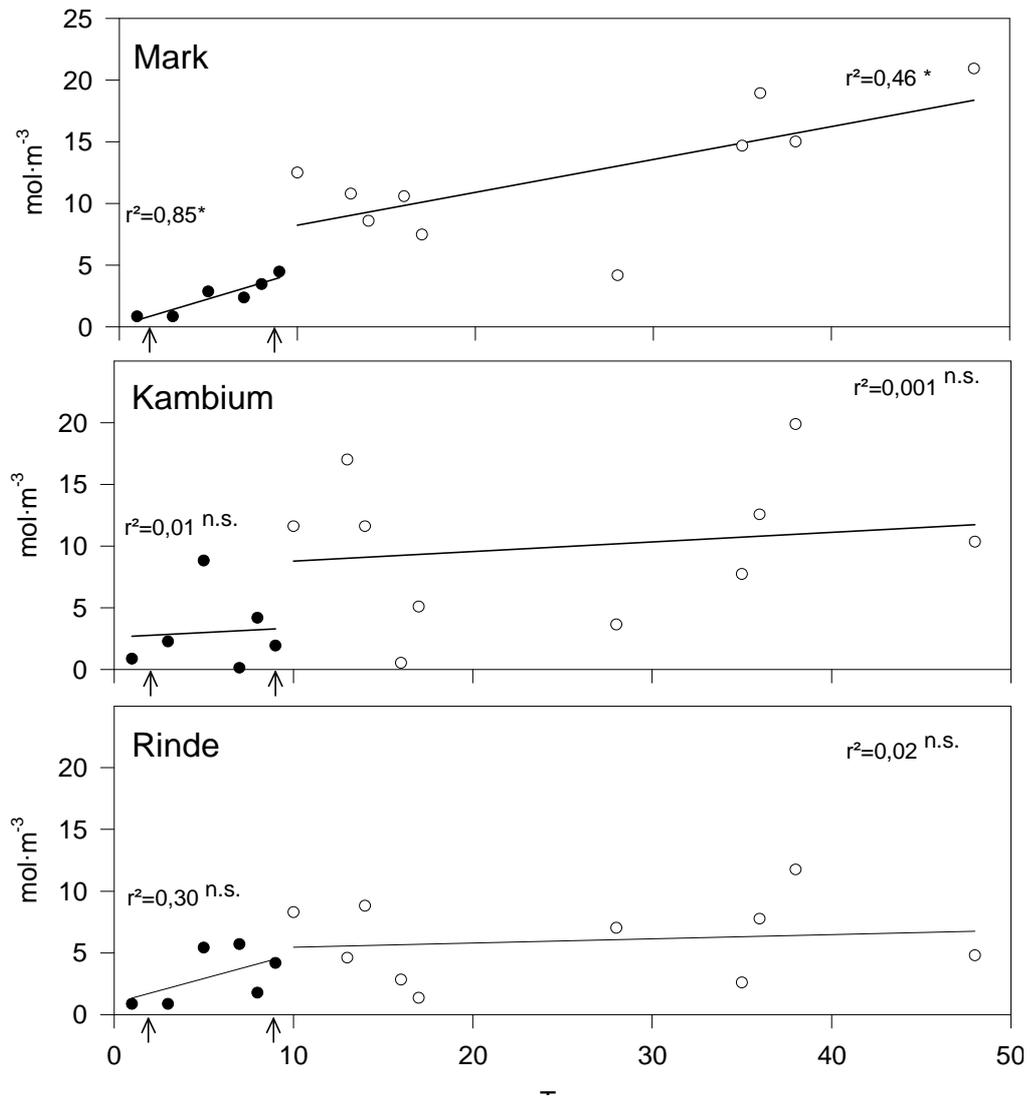


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der Nitratkonzentrationen in Gewebeprobe (K4, \uparrow = Erhöhung der Nitratkonzentration in der Nährlösung um jeweils $3.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$)

Im Mark setzte sofort ein signifikanter und anhaltender Anstieg der Nitratkonzentration ein. Die Reaktion auf das erhöhte Stickstoffangebot war im Vergleich zu den Einzelzellen des betreffenden Gewebebereiches wesentlich deutlicher und die Streuung geringer. Im Bereich des Kambiums unterschieden sich zwar die Mittelwerte während und nach der Erhöhung des Stickstoffangebotes, ein signifikanter Verlauf der Regressionslinien der Nitratkonzentration lag jedoch nicht vor. Im Gegensatz zu den Vakuolenwerten der entsprechenden Region streuten die Werte stark. In der Rinde stieg

der Nitratgehalt in der ersten Phase nach der Erhöhung des Stickstoffangebotes im Gegensatz zu den Einzelzellproben leicht an. Dieser Anstieg konnte nicht signifikant abgesichert werden. In der zweiten Messphase blieb die Nitratkonzentration wie auch schon bei den Vakuolenwerten auf einem konstantem Niveau. Die Mittelwerte beider Phasen (Tabelle 14) unterschieden sich jedoch signifikant.

Tabelle 14: Mittelwert ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) und Standardabweichung der Nitratkonzentration in Gewebeproben (K4, unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der zwei Phasen, $\alpha=0.05$)

	Phase 1: (d 1-9)	Phase 2: (d 10-48)
Mark:	2.47 ± 0.91 a	12.36 ± 5.39 b
Kambium:	3.02 ± 3.75 a	9.99 ± 6.25 b
Rinde:	3.12 ± 1.79 a	5.98 ± 3.28 b

b) Osmotischer Druck und Nitratgehalt

Nitrat ist auch an der osmotischen Regulation der Zelle beteiligt. Anhand der Daten der genommenen Gewebeproben sollte deshalb untersucht werden, ob Beziehungen zwischen dem Nitratgehalt und dem Gehalt an anderen osmotisch wirksamen Substanzen bestehen und inwiefern sich eine Veränderung des Nitratangebotes auf die Zusammensetzung des osmotische Druckes auswirkt.

Der osmotische Druck stieg während des Versuchszeitraumes in allen drei untersuchten Bereichen leicht an, dieser Anstieg war jedoch nicht signifikant (Tabelle 15).

Abbildung 42 zeigt die Nitratgehalte der Gewebeproben aus Mark, Kambium und Rinde und die dazugehörigen Werte des osmotischen Druckes. Zwischen dem osmotischen Druck und dem Nitratgehalt der Gewebeproben bestand keine signifikante Beziehung.

Tabelle 15: Mittlerer osmotischer Druck (in MPa) der Gewebeproben (K4, unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile stehen für signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der zwei Phasen, $\alpha=0.05$)

	Phase 1: (d 1-9)	Phase 2: (d 10-48)
Mark:	1.32 ± 0.09 a	1.49 ± 0.22 a
Kambium:	1.36 ± 0.10 a	1.45 ± 0.33 a
Rinde:	1.25 ± 0.15 a	1.47 ± 0.29 a

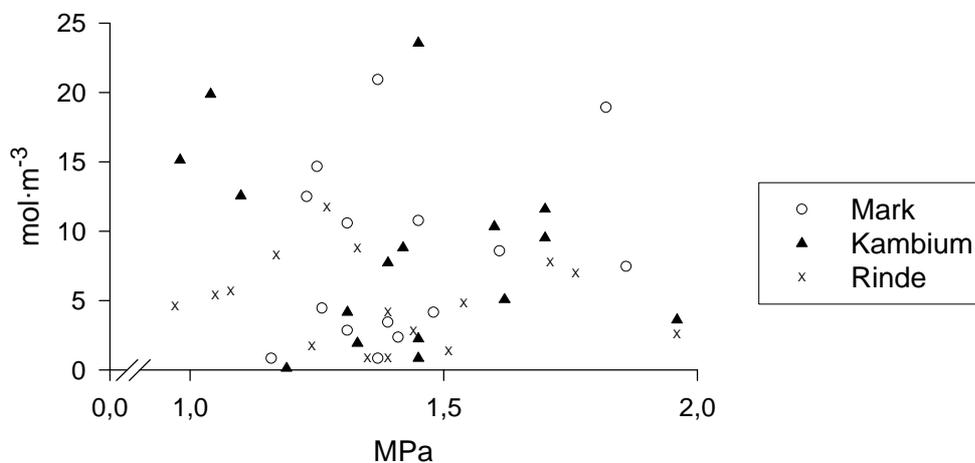


Abbildung 42: Beziehung zwischen der Nitratkonzentration und dem osmotischen Druck in den Gewebeproben aus Mark, Kambium und Rinde (K4)

c) Zusammensetzung des osmotischen Druckes

Kalium ist wichtigstes physiologisches Osmotikum und durch seine Beteiligung an der Proteinsynthese der Nitratreduktase und der Stickstoffaufnahme mit dem Stickstoffhaushalt der Pflanzen verbunden. Auch die Synthese höhermolekularer Kohlenhydrate in Speichergewebe wird von Kalium gefördert. Chlorid ist als Anion osmotisch wirksam und an der Regulation des Turgors beteiligt (MENGEL 1991; BERGMANN 1993) und

kann Nitrat in seiner osmotischen Wirksamkeit ersetzen (WEHRMANN und HÄHNDEL 1984). Die reduzierenden Kohlenhydrate, hauptsächlich Glucose und Fructose, haben neben Kalium einen großen Anteil an der Zusammensetzung des osmotischen Druckes im Vakuolensaft der Möhre (STEINGRÖVER 1983). Am ersten und letzten Messtag wurde deshalb neben Nitrat die Chlorid- und Kaliumkonzentration sowie die Konzentration an reduzierenden Kohlenhydraten gemessen und daraus die Zusammensetzung des osmotischen Druckes berechnet (Abbildung 43).

Der Anteil von Nitrat am osmotischen Druck war zu Beginn in allen drei Bereichen nur gering und stieg auch durch die Erhöhung des Stickstoffangebotes nur wenig an. Auch Chlorid hatte nur einen kleinen Anteil am osmotischen Druck. Hier nahm während des Messzeitraumes der Anteil in Mark und Kambium ab, in der Rinde hingegen zu. Von den hier untersuchten Inhaltsstoffen hatten nur Kalium und die reduzierenden Kohlenhydrate einen größeren Anteil am osmotischen Druck. Zu Beginn des Messzeitraumes war der Anteil an Kalium in allen drei untersuchten Bereichen hoch. Während der Messung verringerte er sich im Kambium und in der Rinde nur wenig, im Mark jedoch auf etwa 1/3 seiner ursprünglichen Größe. Die reduzierenden Kohlenhydrate nahmen in Mark, Kambium und Rinde zu und bewirkten so den größten Teil der Änderung in der Zusammensetzung des osmotischen Wertes (Abbildung 43). Insgesamt wurden durch die gemessenen Substanzen allerdings nur bis zu 40 % des osmotischen Druckes erklärt.

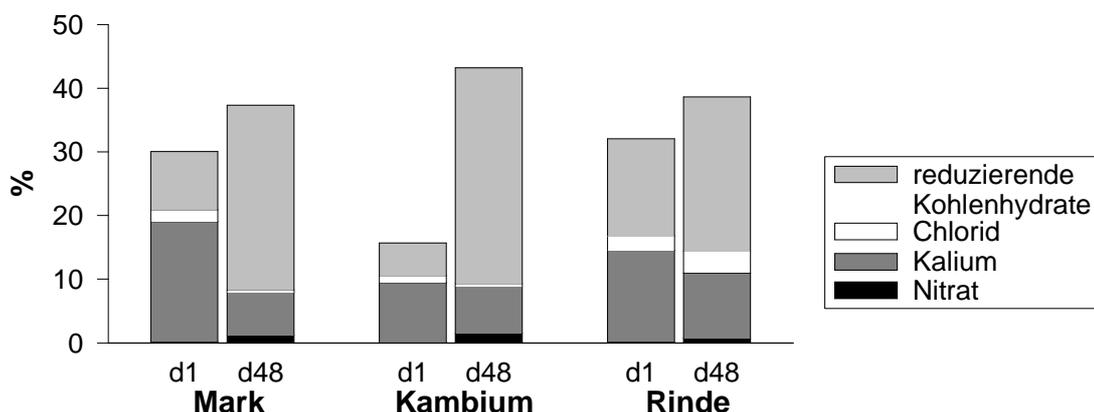


Abbildung 43: Anteil von Nitrat, Kalium, Chlorid und reduzierenden Kohlenhydraten am osmotischen Druck zu Beginn (Tag 1) und am Ende des Messzeitraumes (Tag 48, K4)

5 DISKUSSION

5.1 Verteilung von Nitrat in der Pflanze

Das im Boden befindliche Nitrat ist die wichtigste Stickstoffquelle für die Pflanzen. Es gelangt über Diffusion und Massenfluss zur Wurzeloberfläche (MENGEL 1991; MARSCHNER 1995; KAGE 1997), wo es aktiv gegen einen elektro-chemischen Gradienten in die Wurzel aufgenommen wird. Die Aufnahme verbraucht Energie und ist stoffwechselabhängig (MÜNTZ 1984).

Die Nitrataufnahmerate wird durch die relative Wachstumsrate über den Bedarf der Pflanze an Stickstoff bzw. Aminosäuren (Endprodukte der Nitratreduktion) - wahrscheinlich durch einen negativen Feedback-Mechanismus - reguliert (CLARKSON 1986; MILLARD 1988; IMSANDE und TOURRAINE 1994; SCHENK 1996; IVASHIKINA und SOKOLOV 1997). Die von anderen Autoren (STEINGRÖVER et al. 1986a; BEHR 1988; MENGEL 1991) oft genannte Kohlenhydratversorgung der Wurzel als Regelmechanismus für die Aufnahme von Nitrat wäre nicht spezifisch genug, da auch alle anderen energieverbrauchenden Aufnahmesysteme von einer Änderung der Kohlenhydratversorgung in den Wurzeln betroffen wären (IMSANDE und TOURRAINE 1994). Da bei Untersuchungen von IVASHIKINA und SOKOLOV (1997) die Höhe der Nitrataufnahme unabhängig von der Nitratassimilation in der Wurzel war, scheint insbesondere der Stickstoffbedarf und damit das Wachstum des Sprosses bei der Regelung der Nitrataufnahme wichtig zu sein.

Nach der Aufnahme in die Wurzel erfolgt der Langstreckentransport und die Verteilung von Nitrat in der Pflanze mit dem Transpirationsstrom in den Xylemgefäßen, da Nitrat phloemimmobil ist (PATE 1973; MÜNTZ 1984). Bei ausreichendem Angebot ist Nitrat das vorherrschende Anion im Xylem und stellt einen bedeutenden Teil der negativen Ladung sowie der Stickstoffkomponenten (PEUKE und KAISER 1996). Während des Langstreckentransportes verändert sich die Nitratkonzentration in den Xylemgefäßen durch Austausch mit dem benachbarten Xylemgewebe (Adsorption und Resorption) ständig (MARSCHNER 1995). Nach dem Verlassen des Xylemgewebes gelangt Nitrat über Symplast und Apoplast zu den Orten, an denen es gespeichert oder assimiliert

wird.

Aufgrund der Beschränkung des Langstreckentransports auf das Xylem erhalten Organe, die vorwiegend oder ausschließlich über das Phloem mit Wasser versorgt werden, wenig oder kein Nitrat. Deshalb ist in der Regel der Nitratgehalt in Blättern wesentlich höher als in Früchten oder anderen Speicherorganen (MARSCHNER 1985).

Auch bei der Möhre ist der Nitratgehalt im Laub am höchsten und in der Rübe geringer (MARSCHNER 1985; WIEBE und BEHR 1987). Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche bestätigen diese Verteilung. Die Rübe besteht zum einen aus der Rinde, die überwiegend durch das Phloem versorgt wird, zum anderen aus dem Mark, das aus Xylemgefäßen und Xylemgewebe gebildet wird. In ihr treffen zwei unterschiedliche Gewebetypen mit gegensätzlichen Nitratspeichereigenschaften zusammen.

Vergleicht man die Verteilung von Nitrat zwischen den einzelnen Pflanzenteilen der Möhre, hat das Laub einen wesentlich höheren Nitratgehalt als die Rübe (Tabelle 16). Aufgrund des hohen Nitratgehaltes befindet sich mehr als $\frac{3}{4}$ des insgesamt in der Pflanze vorhandenen Nitrats im Laub. Der Nitratgehalt im Blattstiel ist dabei wesentlich höher als in der Blattspreite, das Frischgewicht beider Pflanzenteile ist jedoch in etwa gleich. Durch die große Differenz im Nitratgehalt bestimmt der Blattstiel maßgeblich den Nitratgehalt und die Nitratmenge im Laub. Der Nitratgehalt ist im Blattstiel sogar so hoch, dass trotz des geringen Anteils am gesamten Möhrewicht der größte Teil des gesamten in der Möhre vorhandenen Nitrats im Blattstiel zu finden ist. Die Rübe hat im Vergleich zum Laub ein höheres Frischgewicht, der Nitratgehalt ist jedoch geringer. Er ist im Mark höher als in der Rinde. Wie beim Blattstiel ist die Ursache für den hohen Nitratgehalt im Mark das dort lokalisierte Xylem. Trotz des höheren Nitratgehaltes im Mark befindet sich im Gegensatz zum Laub der größte Teil des gesamten in der Rübe vorhandenen Nitrats jedoch in der Rinde, da die Rinde einen sehr viel größeren Anteil am gesamten Rübengewicht hat als das Mark. Obwohl der Nitratgehalt im Mark fast $3\frac{1}{2}$ mal höher ist, entfallen mehr als $\frac{3}{4}$ des in der Rübe vorhandenen Nitrats auf die Rinde.

Tabelle 16: Verteilung von Frischgewicht und Nitrat in einzelnen Pflanzenteilen von Möhren (Daten aus unveröffentlichten Ergebnissen*)

	Frischgewicht [g/Pfl.]	Nitratgehalt [mg/kg FS]	rel. Anteil am Frischgewicht [%]	rel. Anteil der Nitratmenge [%]
Laub:	8.4	1391	17	76
Blattspreite	4.0	572	8	15
Blattstiel	4.4	2149	9	61
Rübe:	39.2	90	83	24
Rinde	36.0	76	76	18
Mark	3.2	262	7	6
gesamt:	47.6	320	100	100

* Kulturbedingungen siehe Tabelle 3

5.2 Nitratreduktion

Bevor das von den Wurzeln aufgenommene anorganische Nitrat in pflanzeigene organische Kohlenstoffverbindungen eingebaut werden kann, muss es zu Ammonium reduziert werden. Die Reduktion verläuft in zwei Schritten, bei denen zwei Enzyme beteiligt sind: Die Nitratreduktase ist im Cytoplasma lokalisiert und katalysiert den ersten Schritt, die Umwandlung von Nitrat zu Nitrit. Die Nitritreduktase ist in den Chloroplasten des Sprosses bzw. Proplastiden der Wurzeln lokalisiert und katalysiert den zweiten Schritt, die Umwandlung von Nitrit zu Ammoniak. Primäre Endprodukte der Nitratreduktion sind Glutamin und Glutamat (MIFLIN 1980; MÜNTZ 1984; CHAMPIGNY 1995). Die Nitratreduktion wird über zahlreiche endogene und exogene Faktoren reguliert, z.B. über Enzymsynthese, Enzymabbau und Enzymaktivierung, Substratangebot, Aminosäurenkonzentration, Umweltfaktoren oder die Verfügbarkeit von Reduktionsäquivalenten (SRIVASTAVA 1980; MARSCHNER 1995).

Während Bäume und viele perennierende Pflanzen den größten Teil des Nitrats in den Wurzeln reduzieren, variiert bei den anderen Pflanzen der in den Wurzeln reduzierte Anteil an Nitrat je nach Pflanzenart, Nitratangebot und Umweltbedingungen (ANDREWS

1986; PEUKE und KAISER 1996). In den Wurzeln stammt die erforderliche Energie für die Nitratreduktion ebenfalls aus der Photosynthese. Die Reduktion von Nitrat in den Wurzeln ist durch die Abhängigkeit von der Photosynthese immer eng mit dem Blattapparat verbunden.

Bei der Möhre ist der Anteil des in den Wurzeln reduzierten Nitrates an der Gesamtnitratreduktion nicht bekannt. Da jedoch nahezu alle Gewebe höherer Pflanzen die für die Nitratreduktion notwendigen Enzyme bilden können (ANDREWS 1986; PEUKE und KAISER 1996), kann wahrscheinlich auch in der Wurzel der Möhre Nitrat reduziert werden.

Bei Chicorée, wie die Möhre eine bienne Pflanze mit einer Rübe als Speicherorgan und einem rosettenförmig angelegten Blattapparat, ist die Nitratreduktaseaktivität in der Wurzel bis zum Beginn des Dickenwachstums größer als im Spross. Danach sinkt die Nitratreduktaseaktivität in den Wurzeln und schließlich wird die Nitratreduktion im Laub dominant (DORCHIES und RAMBOUR 1985). In der Chicorée Rübe ist die Nitratreduktion eng mit Veränderungen der Source-Sink-Beziehungen zwischen Laub und Rübe verbunden. Ab Beginn des Dickenwachstums wird die Rübe zum Assimilat-Sink, gleichzeitig beginnt die Nitratreduktaseaktivität zu sinken (VUYLSTEKER et al. 1997). Auch bei der Möhre verändern sich mit Beginn des Dickenwachstums die Source-Sink-Beziehungen, und die Rübe wird ein immer größerer Sink für Assimilate (BENJAMIN und WREN 1978). In ihr wird vor allem Saccharose gespeichert (PHAN und HSU 1973; STEINGRÖVER 1983; VEEN und KLEINENDORST 1985; HOLE 1996). Saccharose ist ein wichtiger Energielieferant für die Nitratreduktion in den Wurzeln (BROUQUISSE et al. 1992). Nach Beginn der Verdickung der Hauptwurzel wird Saccharose jedoch immer weniger für die Nitratassimilation, sondern verstärkt für die Speicherung verwendet. Eine hohe Nitratreduktaseaktivität in der Rübe würde dann in Konkurrenz zur Speicherung treten, zumal in den Wurzeln der Energiebedarf für die Reduktion höher als im Spross ist (RAVEN 1985). Die Nitratreduktion im Laub wäre für die Möhre also auch energetisch günstiger. Ein weiterer Hinweis auf eine höhere Nitratreduktaseaktivität im Laub von Möhren ist, dass Pflanzen, bei denen durch Stickstoff besonders das Laubwachstum gefördert wird, den größten Anteil vom aufgenommenen Nitrat sofort in den Spross transportieren (SPRENT und THOMAS 1984). Auch bei der Möhre

reagierte in zahlreichen Düngungsversuchen vor allem das Laub auf Änderungen des Stickstoffangebotes (z.B. NICOLAISEN und HAAR 1964; HABBEN 1972; WEIER 1991a; MOJE 1997). Wenn bei der Möhre der größte Teil des aufgenommenen Stickstoffes in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert wird, wird dort auch der größte Anteil der Nitratassimilation stattfinden. Ein hoher Anteil der Nitratreduktion in den Wurzeln ist deshalb unwahrscheinlich.

5.3 Nitratakkumulation

In den einzelnen Pflanzenorganen wird die Nitratakkumulation von der Nitrataufnahme, dem Transport in der Pflanze und der Höhe der Reduktion bestimmt. Übersteigt die Nitrataufnahme die Nitratreduktion, kommt es zur Akkumulation von Nitrat. Vor allem bei höheren Nitratkonzentrationen im Xylemsaft wird im Xylemparenchym und dem umliegenden Gewebe Nitrat gespeichert. Dort dient es als Stickstoffreserve und Osmotikum (MARSCHNER 1985).

Das gesamte in der Zelle befindliche Nitrat wird zwei unterschiedlichen Bereichen zugeordnet, dem „Metabolischen Pool“ und dem „Speicherpool“ (DEVienne et al. 1994a).

Der „Metabolische Pool“ ist im Cytoplasma lokalisiert. Dort wird das Nitrat reduziert und die Nitratkonzentration ist in der Regel gering (HEIMER und FILNER 1971; FERRARI et al. 1973; MARTINOIA et al. 1981; GRANSTEDT und HUFFAKER 1982; NOTTON und HUCKLESBY 1983; HERNANDEZ et al. 1995; SMIRNOFF und STEWART 1985). Der „Speicherpool“ ist in der Vakuole lokalisiert. In ihm befindet sich der größte Teil des in der Zelle vorhandenen Nitrats. Die Nitratkonzentration im Speicherpool erhöht sich, wenn das Nitratangebot die Verwertung von Nitrat überschreitet (HERNANDEZ et al. 1995). Aus dem Speicherpool wieder mobilisiert werden kann Nitrat nur bei absinkender oder fehlender Nitratzufuhr (ASLAM et al. 1976; GRANSTEDT und HUFFAKER 1982; HERNANDEZ et al. 1995; MARSCHNER 1985; CLARKSON 1986). Influx und Efflux von Nitrat in bzw. aus der Vakuole sind stoff-

wechselabhängig und werden durch Faktoren wie Wachstum, Source-Sink-Beziehungen und Umweltbedingungen reguliert (BLUMWALD und GELLI 1997).

Bei der Möhre können sowohl im Laub als auch in der Rübe hohe Nitratakkumulationen vorkommen. Der Nitratgehalt im Möhrenlaub spielt für den Anbauer und Verbraucher eine untergeordnete Rolle, während eine hohe Nitratakkumulation in der Rübe nicht erwünscht ist.

Die Rübe der Möhre ist ein Speicherorgan und besteht aus dem innen liegenden Mark und der ringförmig darum liegenden sekundären Rinde. Beide Bereiche werden durch die dünne Zellschicht des Kambiums getrennt (HAVIS 1939; HOLE 1996). Während bei den meisten Sprosspflanzen Xylem- und Phloemgefäße zusammengefasst in Leitbündeln die Organe durchziehen (MÜNTZ 1984), sind in der Rübe der Möhre die Phloemgefäße in der Rinde und die Xylemgefäße im Mark lokalisiert, umgeben vom jeweiligen Speichergewebe (HOLE 1996). Das Speichergewebe von Mark und Rinde unterscheidet sich deutlich in der zellulären Struktur (Abbildung 37) und auch im Speichervermögen (ESAU 1940; PFEIFFENSCHNEIDER 1990).

Die Rübe entwickelt sich aus dem oberen Teil der Hauptwurzel und dem Hypokotyl durch sekundäres Dickenwachstum, d.h. durch Zellteilung und Zellstreckung (ESAU 1940; KRUG 1991). Während im Mark beim sekundären Dickenwachstum vor allem die Zellvolumina zunehmen und auch insgesamt größer sind als in der Rinde, erfolgt das Wachstum des Rindengewebes überwiegend über Zellteilung. Mit fortschreitender Entwicklung nehmen in der Rinde die Zellzahlen zu (HOLE et al. 1987; PFEIFFENSCHNEIDER 1990).

Da Geweben mit größeren Zellen mehr Speichermöglichkeiten zur Verfügung stehen, ist die Speicherkapazität im Mark höher als in der Rinde (PFEIFFENSCHNEIDER 1990). Besonders im inneren Mark sind die Zellen großlumig und haben ein geringeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen als die Markzellen, die dem Kambium benachbart sind. Um die gleiche Konzentrationsänderung im Vakuolensaft zu zeigen, müssen die Zellen im inneren Mark eine größere Menge an Nitrat aufnehmen als die

kleineren Zellen im kambialen Mark. Gleichzeitig sind sie von den hauptsächlich in der Nähe des Kambiums liegenden Xylemgefäßen am weitesten entfernt. Infolgedessen reagierten sie auch schwächer auf das erhöhte Stickstoffangebot. MILFORD (1973), WYSE (1979) und HAIN (1995) nennen ebenfalls ein geringes Oberflächen/Volumen-Verhältnis bei gleichzeitig größerer Entfernung zum Leitgewebe als Grund für weniger effiziente Akkumulationsprozesse von großen Zellen.

In den hier durchgeführten Versuchen nahm in der kambialen Rinde wider Erwarten nach der Erhöhung des Stickstoffangebotes die Nitratkonzentration in den Vakuolen zunächst ab. Erst später reagierten die Zellen in diesem Bereich auf das erhöhte Stickstoffangebot (Abbildung 40). Eine mögliche Erklärung wäre, dass Rindenzellen im Gegensatz zu den großlumigen Markzellen Reservestoffe überwiegend über eine verstärkte Zellteilung und hohe Zellzahlen speichern, d.h. erst eine möglichst große Anzahl von Zellen anlegen, bevor Reservestoffe eingelagert werden (PFEIFFENSCHNEIDER 1990). Dafür wird u.a. Stickstoff benötigt, so dass die Abnahme der Nitratkonzentration in den Vakuolen der kambialen Rinde eine Folge hoher Zellteilungsraten sein könnte. Erst ein sehr hohes Stickstoffangebot führte zu einem Ansteigen der Nitratkonzentration in den Vakuolen (=Akkumulation).

Die Zellen, die im kambialen Mark und der kambialen Rinde in unmittelbarer Nähe der meisten Xylemgefäße lagen, reagierten am stärksten auf die Erhöhung des Stickstoffangebotes. Für das aus den ausschließlich im Mark liegenden Xylemgefäßen in das umliegende Gewebe eintretende Nitrat stellte das Kambium dabei keine Grenze dar. Ebenso wenig gab es einen gerichteten Transport von Nitrat ausschließlich in Richtung des Xylemgewebes. Aus diesem Grund kann es auch in der Rinde, besonders in der Nähe der nitrattransportierenden Xylemgefäße, zu höheren Nitratkonzentrationen kommen.

In der vom Kambium am weitesten entfernt liegenden äußeren Rinde veränderte sich die Nitratkonzentration durch das erhöhte Stickstoffangebot während der Versuchszeit nicht. Dieser Bereich liegt von den Xylemsträngen am weitesten entfernt und besteht aus relativ alten Zellen. OSCARSON et al. (1989a+b) nennt Zellwachstum und Stoffwechselaktivität als Voraussetzung für den aktiven Transport von Nitrat in die Zellen. Wenn Assimilate und andere osmotisch wirksame Stoffe bevorzugt in junge neu

gebildete Zellen eingelagert würden, und Zellwachstum eine Voraussetzung für hohe Nitrat- aufnahmeraten ist (HENRIKSEN et al. 1992; PADGETT und LEONARD 1994), würden sich alte Zellen hinsichtlich ihrer osmotischen Zusammensetzung in einer Art Ruhezustand befinden. Für diese Annahme spricht auch, dass die kleinsten und jüngsten Zellen in der Rübe im kambialen Mark und in der kambialen Rinde zu finden sind, d.h. in den Bereichen der Rübe, die am wenigsten träge auf Zustandsänderungen reagierten.

Für die Nitratkonzentrationen in der Vakuole ist neben dem Nitratangebot die Größe und das Alter der Zelle sowie die Distanz der Zelle zu den Xylemgefäßen ausschlaggebend.

Auch die Ergebnisse der Gewebeproben zeigen, dass Veränderungen in der Vakuolenkonzentration je nach Abstand zu den Xylemgefäßen sehr lokal begrenzt sein können. Ein Beispiel dafür ist die Reaktion des inneren Marks. Hier war bei den Einzelzellproben die Streuung hoch und die Vakuolenkonzentration abhängig von der jeweiligen Entfernung zu den in diesem Bereich locker verstreut liegenden Xylemgefäßen. Die Gewebeproben aus dem Mark hatten eine wesentlich geringere Streuung und zeigten eine viel gleichmäßigere Reaktion, da eine Probe sowohl xylemnahe als auch xylemferne Zellen beinhaltet. Auch beim Kambium wird dieser Zusammenhang deutlich. Die Reaktion auf die Erhöhung des Stickstoffangebotes war bei den Gewebeproben in diesem Bereich schwächer als bei den Einzelzellproben, da auch Zellen mit beprobt wurden, die weiter entfernt von den direkt am Kambium liegenden Xylemgefäßen lagen.

5.4 Zusammensetzung des osmotischen Potentials in Rübenzellen

Als anorganisches Molekül gehört Nitrat zu den osmotisch wirksamen Zellsaftkomponenten. Nach STEINGRÖVER (1983) und PFEIFFENSCHNEIDER (1990) ist Nitrat in der Rübe der Möhre jedoch nicht maßgeblich an der Zusammensetzung des osmotischen Potentials beteiligt. Auch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen das. Selbst im Mark, in dem die Nitratkonzentration nach Verdoppelung des Nitratangebotes

stark zunahm, veränderte sich der Anteil des Nitrats am osmotischen Potential nur unwesentlich (Abbildung 43).

Die wichtigsten Komponenten des Vakuolensaftes in der Rübe der Möhre sind neben Kalium und organischen Säuren vor allem Kohlenhydrate (STEINGRÖVER 1983; DAIE 1984). Auch bei den hier gemessenen Komponenten haben die reduzierenden Zucker (=Monosaccharide) den größten Anteil am osmotischen Druck. Dieser Anteil nahm in allen drei untersuchten Bereichen der Rübe während des untersuchten Zeitraumes zu. Steigendes Stickstoffangebot hatte auch in Versuchen von HABBEN (1972) wenig Auswirkung auf den Gesamtzuckergehalt von Möhren, förderte aber die Bildung von Monosacchariden und veränderte so das Verhältnis von nieder- zu hochmolekularen Zuckern.

In Klimakammerversuch zum Einfluss der Temperatur (K3) verlief der Nitratgehalt gegenläufig zum Saccharosegehalt. Dieser konträre Verlauf war besonders im Mark ausgeprägt. Eine stärkere Reaktion des Marks bei Veränderungen des Zuckergehaltes im Gegensatz zum Rindengewebe beobachtete auch PFEIFFENSCHNEIDER 1990 bei Untersuchungen mit Möhren.

Die Beziehung zwischen Zucker- und Nitratgehalt wurde in der Literatur vor allem bei variierenden Lichtintensitäten untersucht. In Untersuchungen von BLOM-ZANDSTRA und LAMPE (1985) führten geringe Lichtintensitäten zu einer Abnahme der Photosyntheserate und dadurch auch zu einer Abnahme des Zuckergehaltes und einer Zunahme des Nitratgehaltes. Zur Aufrechterhaltung des osmotischen Wertes war bei niedriger Einstrahlung die Nettonitrataufnahme und der Nitrattransport in die Vakuolen erhöht (STEINGRÖVER 1986). Bei steigenden Temperaturen wird die Veratmung höher und demzufolge sinkt der Zuckergehalt ebenfalls (LORENZ und WIEBE 1980).

Die im Klimakammerversuch gefundene gegenläufige Beziehung bestand nur zwischen Nitrat- und Saccharosegehalt. In den Gewebeproben wurde der Saccharosegehalt jedoch nicht mit erfasst, was die Diskrepanz zwischen diesen Ergebnissen erklären könnte.

Wenn steigendes Stickstoffangebot kaum Auswirkungen auf den Gesamtzuckergehalt hat, der Gehalt an Monosacchariden jedoch steigt (HABBEN 1972), muss der Saccharosegehalt sinken. Bei steigendem Stickstoffangebot erhöht sich aber in der

Regel der Nitratgehalt in der Pflanze, so dass dieser gegenläufig zum Saccharosegehalt wäre. Inwieweit ein Ausgleich des osmotischen Potentials durch Nitrat stattfindet, kann mit diesen Ergebnisse nicht gesagt werden, da der Anteil von Saccharose nicht bestimmt und der von Nitrat nur sehr gering ist.

Insgesamt erklären die in dieser Arbeit gemessenen Komponenten mit ungefähr 40% nur einen geringen Anteil des osmotischen Druckes. Der restliche Anteil wird durch organische Säuren, Aminosäuren und Saccharose gebildet (PHAN und HSU 1973; STEINGRÖVER 1983; VEEN und KLEINENDORST 1985; HOLE 1996).

5.5 Einfluss von Klimafaktoren auf den Nitratgehalt

Die Klimafaktoren beeinflussen in vielfältiger Weise das Umfeld einer Pflanze und damit auch den Nitratgehalt. Sie wirken sowohl direkt, z.B. auf die Aktivität der nitrat-assimilierenden Enzyme in Spross und Wurzel, als auch indirekt, z.B. auf die Nitratdynamik des Bodens und das Nitratangebot für die Pflanze.

5.5.1 Strahlung

Von allen Klimafaktoren hat die Strahlung den größten Einfluss auf den Nitratgehalt der Pflanzen. Bei zahlreichen Pflanzen ist eine negative Beziehung zwischen Strahlung und Nitratgehalt nachgewiesen worden (SCHARRER und SEIBEL 1956; KNIPMEYER et al. 1962; WRIGHT und DAVISON 1964; SCHUPHAN et al. 1967; CANTLIFFE 1972b; MINOTTI und STANKEY 1973; VENTER 1978; WEDLER 1980+1985; PARK 1981; STEINGRÖVER et al. 1982; LENZ 1983a; TEMPERLI et al. 1983; ZURHAKE 1983; LILLO und HENRIKSEN 1984; BLOM-ZANDSTRA und LAMPE 1985; DANEK-JEZIK 1986; HUNDT et al. 1986a+b; WIEBE 1987b; PASCHOLD 1988; SCHAER 1989; SCHRAGE 1990; GRANGES und DARBELLEY 1994; NIEUWHOF 1994 u. a.).

Auch bei Möhren resultierte sinkende Lichtintensität durch Beschattung vor der Ernte in abnehmendem Wachstum und steigendem Nitratgehalt in der Rübe. Je länger beschattet

wurde, desto höher war der Nitratgehalt (BLANC et al. 1979). Diese Beziehung wird in den Ergebnissen dieser Arbeit bestätigt.

Die Nitratkonzentration im Gewebe wird hauptsächlich durch den Wirkung der Strahlung auf die Nitratreduktion beeinflusst, die als energieabhängiger Prozess von der Photosynthese abhängig ist. Die Wirkung der Strahlung beruht auf der Bereitstellung von Energie aus der Photosynthese in Form von Reduktionsäquivalenten und Kohlenstoffskeletten zur Entsorgung des bei der Nitratreduktion entstehenden Ammoniums sowie auf der Beeinflussung der Nitrataufnahme, des Nitrattransportes und der Proteinsynthese der Nitratreduktase (MACDUFF und JACKSON 1992; HUCKLESBY und BLANKE 1993; DEVIENNE et al. 1994b; PEUKE und KAISER 1996). Eine Übersicht über die genauen Mechanismen der Wirkung von Licht auf die Nitratassimilation geben SAWHNEY und NAIK (1990) sowie SIVASANKAR und OAKS (1996).

Da die Photosynthese in den Blättern lokalisiert ist, reagiert der Nitratgehalt in den Blättern schneller auf Änderungen der Strahlung als der in den Wurzeln (ASLAM und HUFFAKER 1982). Auch die Möhre reagierte auf eine höhere Strahlung mit einem zeitlich verschobenen Rückgang des Nitratgehaltes in der Reihenfolge Blatt → Blattstiel → Rübe (Abbildung 8).

Die Reaktion auf Umweltbedingungen ist u.a. vom Stickstoffangebot abhängig (CANTLIFFE 1972a; ZURHAKE 1983). Der schnellste Abbau der Nitratakkumulation erfolgte, wenn bei hoher Strahlung das Stickstoffangebot unterbrochen wurde. Eine Verringerung des Nitratgehaltes in der Möhre durch eine Absenkung des Nitratangebotes hatte nur bei hoher Einstrahlung Erfolg. Bei niedriger Strahlung veränderte sich der Nitratgehalt trotz stickstofffreier Nährlösung nicht signifikant (Abbildung 7). Bei Kontrollpflanzen war bei hohem Stickstoffangebot trotz erhöhter Strahlung keine Änderung des Nitratgehaltes feststellbar (Ergebnisse nicht dargestellt).

Die Strahlung hat auch Auswirkungen auf die Verwendung von Nitrat als Osmotikum. Bei sinkender Strahlung wird Nitrat verstärkt in den Vakuolen als Osmotikum eingesetzt, um Defizite an Kohlenhydraten zu kompensieren. Die Verfügbarkeit organischer Verbindungen für die Speicherung in der Vakuole beeinflusst die Nutzung

von Nitrat als Osmotikum. Auch das Verhältnis zwischen Akkumulation von Nitrat und Akkumulation von organischen Verbindungen ist lichtabhängig (STEINGRÖVER et al. 1986a; BLOM-ZANDSTRA und LAMPE 1985; BLOM-ZANDSTRA 1989).

5.5.2 Temperatur

Die Temperatur hat erheblichen Einfluss auf Wachstum und Entwicklung der Pflanzen. Die Grenzwerte und Optimalbereiche sind dabei von einer Vielzahl weiterer Faktoren, z.B. Pflanzenart, Sorte, physiologisches Alter, Anpassung, Dauer der Einwirkung oder der Intensität anderer Wachstumsfaktoren abhängig und nicht allgemeingültig zu definieren (KRUG 1991).

Die Wirkung der Temperatur auf den Nitratgehalt von Pflanzen ist ebenso vielfältig. Die Temperatur hat sowohl unmittelbar Einfluss auf Aufnahme, Transport und Reduktion des Nitrats, als auch mittelbar über das Wachstum und den Stoffwechsel. Außerdem beeinflusst sie über Mineralisation und Nitrifikation die Dynamik des Stickstoffs im Boden und so das Stickstoffangebot der Pflanze. Das Ausmaß ihrer Wirkung ist wiederum abhängig von anderen Faktoren, wie Nährstoffangebot, Stickstoffform, Licht oder Feuchtigkeit.

Besonders in Feldversuchen können Temperaturwirkungen oft nicht von anderen Umweltfaktoren getrennt und Wechselwirkungen nicht eindeutig abgegrenzt werden. Eine hohe Bodentemperatur kann z.B. durch hohe Strahlung verursacht werden. In der Literatur findet man aus diesem Grund häufig nur pauschale Angaben, z.B. fanden HUNDT et al. (1986a) bei trüb-kühl-feuchten Witterungsbedingungen höhere Nitratgehalte in Möhren als bei hell-warm-trockenen. Diese Ergebnisse zeigen die enge Verflechtung der Temperaturwirkung mit anderen Klimafaktoren.

Die einzelnen Schritte der Nitratassimilation - Aufnahme, Transport und Reduktion - sind aktive energieverbrauchende Prozesse und werden bis zu einem Temperatur-optimum durch höhere Temperaturen gefördert (ENGELS et al. 1992; ENGELS und MARSCHNER 1996; BIGOT und BOUCAUD 1996; CARVAJAL et al. 1996; PEUKE und KAISER 1996). Höhere Temperaturen steigern einerseits den Nitratgehalt, da mehr Nitrat aufgenommen und transportiert wird, andererseits führt die Förderung der

Reduktion zu niedrigeren Nitratgehalten (OERTLI 1987).

Die Wirkung der Temperatur auf den Nitratgehalt ist eng mit ihrer Wirkung auf Photosynthese und Wachstum verflochten. Da das Temperaturoptimum der Photosynthese unter dem der Ertragsbildung liegt (WIEBE und LORENZ 1982), wird bei hohen Temperaturen das Wachstum mehr gefördert als die Photosynthese (MENGEL 1979). Die Pflanze benötigt bei hohem Wachstum mehr Stickstoffverbindungen, was sich negativ auf den Nitratgehalt auswirkt, während sie bei vermindertem Wachstum weniger reduzierte Stickstoffverbindungen benötigt und der Nitratgehalt steigt. Die Wirkung der Temperatur auf den Nitratgehalt ist deshalb auch von der Höhe der Strahlung abhängig: hohe Temperaturen bei ausreichender Strahlungsstärke haben trotz einer erhöhten Nitrataufnahme einen niedrigen Nitratgehalt zur Folge, während hohe Temperaturen bei gleichzeitig geringer Strahlung den Nitratgehalt erhöhen. Trotz gesteigerter Nitrat-aufnahme bei erhöhter Temperatur müssen nicht zwangsläufig höhere Nitratgehalte auftreten, wenn die Strahlung für hohe Wachstums- und Nettophotosyntheseraten ausreichend hoch ist.

Werden andere Wachstumsfaktoren weitgehend konstant gehalten, wird von vielen Autoren eine positive Korrelation zwischen Temperatur und Nitratgehalt gefunden, so z.B. von NIEUWHOF (1994) bei Radies, SCHAER (1989) bei Kohlrabi, van der BOON et al. (1990) bei Salat, ALI et al. (1996) bei Tomate. Auch für die Möhre wurde diese Beziehung in dieser Arbeit bestätigt.

5.5.3 Wasser

Der Wasserstatus der Pflanzen ist eine Funktion der Wasserzufuhr aus dem Boden und des Wassergehaltes der Atmosphäre (HANSON und HITZ 1982), d.h. der Boden- und Luftfeuchte, und bestimmt in vielfältiger Weise den Stoffwechsel und das Wachstum. Im Boden ist Wasser Transportmittel für Pflanzennährstoffe, Lösungs- und Quellungs-mittel in Verwitterungsvorgängen, sowie Grundlage für mikrobielle Prozesse wie Mineralisation und Nitrifikation.

In der Pflanze laufen alle Stoffwechselfvorgänge in wässriger Lösung ab. Wasser ist Lösungsmittel für Gase, Salze und organische Stoffe, Transportmittel für Nährstoffe und

gelöste organische Stoffe, sowie Rohstoff für viele Stoffwechselfvorgänge und Synthesen. Außerdem ist es für die Erhaltung des Turgors, die Regelung der Stomatabewegungen, die Transpiration und die Temperaturregelung notwendig.

Luftfeuchte (Sättigungsdefizit)

Die Luftfeuchte bzw. das Sättigungsdefizit hat einen großen Einfluss auf die Transpiration der Pflanze, da der Transpirationsstrom von der Differenz zwischen dem Wasserpotential in der Bodenlösung und der Atmosphäre angetrieben wird. Weil im Transpirationsstrom neben Wasser auch darin gelöste Ionen, u.a. Nitrat, transportiert werden, könnte das Sättigungsdefizit über die Transpiration auch die Verteilung von Nitrat in der Pflanze und den Nitratgehalt beeinflussen.

Die Verteilung der im Transpirationsstrom gelösten Ionen hängt nicht allein von der Transpirationsstärke sondern auch von ihrer Konzentration im Xylemsaft ab. In das Xylem gelangen die Ionen durch aktiven Transport aus dem Wurzelgewebe. Dieser Vorgang ist abhängig von zahlreichen Faktoren, wie z.B. dem Wasserpotential in der Wurzel, dem Ernährungsstatus der Pflanze, der Wachstumsrate und Umweltfaktoren, nicht jedoch von der Menge an Wasser, die in die oberen Pflanzenteile transportiert wird (SMITH 1991). Auch auf molekularer Ebene wurde keine direkte Verbindung zwischen Wasser- und Ionenbewegung gefunden (CLARKSON 1988).

Sobald die Transpiration geringer wird, erhöht sich die Konzentration der Ionen im Xylemsaft. Die Ionenkonzentration im Xylemsaft und die Transpirationsrate stehen also in umgekehrtem Verhältnis zueinander. Bei geringer Transpiration werden andere Transportformen, wie z.B. der Massenfluss, zunehmend wichtiger für den Ionen-transport (SHANER und BOYER 1976a+b; TANNER und BEEVERS 1990; SMITH 1991). Ein Beispiel dafür sind die Pflanzen des nebelfeuchten Regenwaldes, die nur sehr wenig transpirieren, bei denen aber trotz des geringen Transpirationsstroms die Versorgung mit Mineralstoffen ausreichend ist (GRUBB 1977).

Auch bei Nitrat hatte das Sättigungsdefizit keinen Einfluss auf Aufnahme, Transport und Akkumulation von Nitrat (SHANER und BOYER 1976a+b; PATE et al. 1979;

PEUKE und KAISER 1996). Obwohl Nitrat mit dem Transpirationsstrom transportiert wird, verringerte sich der Nitratfluss (= Xylemsaftkonzentration · Transpirationsstärke) bei verminderter Transpirationsrate nicht, da die Nitratkonzentration im Xylemsaft in umgekehrtem Verhältnis zum Transpirationsstrom stand (SHANER und BOYER 1976a+b). Nur wenn bei stark verminderter Transpirationsrate zusätzlich die Verfügbarkeit von Nitrat für die Wurzeln extrem niedrig war, sank die Nitratkonzentration im Xylem ab; es stand weniger Nitrat für die Nitratreduktion zur Verfügung und die Nitratreduktaseaktivität nahm ab. Da die Pflanze in der Lage ist, die Aufnahme von Nitrat in das Xylem über einen sehr weiten Bereich und auch bei geringen Konzentrationen an der Wurzel noch konstant zu halten (BLOM-ZANDSTRA und JUPJIN 1987; PITMAN 1988), folgerten SHANER und BOYER (1976b), dass Umweltfaktoren, die die Nitrataufnahme beeinflussen und gleichzeitig die Transpirationsrate verändern, einen besonders großen Einfluss auf die Nitratreduktaseaktivität haben. Die Auswirkung auf den Nitratgehalt in den Blättern war trotz der Abnahme der Nitratreduktaseaktivität jedoch gering. Der Nitratgehalt verringerte sich nur sehr langsam und nur dann, wenn die Wurzeln kein Nitrat mehr nachliefern konnten. SHANER und BOYER 1976a führten das auf die geringe Geschwindigkeit der Mobilisierung des Nitrats aus dem Speicherpool in der Vakuole zurück.

Hier könnte auch die Ursache für die nicht signifikante Wirkung des Sättigungsdefizites in dem hier durchgeführten Versuch liegen. Da der Nitratgehalt im Gegensatz zur Nitratreduktaseaktivität auf Änderungen des Nitratflusses nur sehr langsam reagiert, war die erwartete differenzierte Reaktion auf die unterschiedlichen Sättigungsdefizite trotz des verminderten Stickstoffangebotes nicht sichtbar. Ein Grund für die sehr langsame Reaktion des Nitratgehaltes auf Änderungen im Nitratfluss könnte die Verteilung der Xylemgefäße sein. Bezogen auf die gesamte Fläche des radialen Querschnittes durch die Rübe haben Xylemgefäße nur einen Anteil von ca. 5% der gesamten Fläche des Marks (Abbildung 37). Die den Xylemgefäße benachbarten Markzellen reagieren jedoch am schnellsten auf Änderungen in der Konzentration des Xylemsaftes. Der größte Teil der Zellen im Mark liegt also nicht direkt an den Xylemgefäßen, sondern weiter von diesen entfernt und reagiert entsprechend langsamer (siehe auch Kapitel 5.3).

Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte beeinflusst sowohl den Wasserstatus der Pflanzen als auch über Mineralisation und Massenfluss das Stickstoffangebot des Bodens, und damit den Nitratgehalt der Pflanze.

Die optimale Bodenfeuchte für die Mineralisation liegt ungefähr bei Feldkapazität. Der Massenfluss nimmt dagegen mit steigender Bodenfeuchte zu, so dass weniger Stickstoff zu den Wurzeln gelangt, je trockener ein Boden ist (MENGEL und CASPER 1980; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1989). Niederschläge können dann den Transport von Nitrat zur Wurzel verbessern. Je nach Zustand des Bodens können Niederschläge jedoch ganz unterschiedliche Folgen haben: War der Boden vorher trocken, wird die Mineralisation und der Massenfluss gefördert, das Nitratangebot für die Pflanze steigt. War der Boden vorher schon nass oder sind die Niederschläge sehr hoch, wird der Massenfluss zwar gefördert, die Mineralisation geht jedoch zurück, die Nitratkonzentration der Bodenlösung wird verdünnt und im extremen Fall kommt es zur Auswaschung (NICOLAISEN und ZIMMERMANN 1968; BREIMER 1982; WEHRMANN und SCHARPF 1988).

Für die meisten Pflanzen liegt die optimale Bodenfeuchte ebenfalls im Bereich der Feldkapazität. Bei steigender Bodenfeuchte treten an den Wurzeln zunehmend anaerobe Verhältnisse auf, die besonders den Stoffwechsel der Wurzeln beeinträchtigen. Bei geringer werdender Bodenfeuchte sinkt das Wasserpotential in der gesamten Pflanze und der Stoffwechsel geht zurück. Auch die Nitratreduktaseaktivität reagiert empfindlich auf Änderungen des Wasserstatus und ist gehemmt, wenn das Wasserpotential der Pflanze sinkt (HUFFAKER et al. 1970; MORILLA et al. 1973; MAYNARD et al. 1976; SHANER und BOYER 1976a+b; FROTA und TUCKER 1978; MAYNARD und BARKER 1979; SRIVASTAVA 1980; HANSON und HITZ 1982; McDONALD und DAVIES 1996). Die Reaktion der Pflanze auf den geänderten Wasserstatus ist unter anderem von der Pflanzenart, dem Alter und der Akklimation der Pflanze, aber auch von der Dauer des Wasserstressses abhängig (BRAY 1997).

In der Literatur wurde in vielen Versuchen bei Wassermangel ein erhöhter Nitratgehalt festgestellt (ACKERSON et al. 1977; DRAGLAND 1978; van DIEST 1990; BREIMER

1982; SØRENSEN et al. 1997). Es ist jedoch schwierig, eine allgemeine Aussage über die Beziehung zwischen dem Nitratgehalt und der Bodenfeuchte zu machen, und es sind eine Vielzahl verschiedener Ergebnisse zu finden, bei denen auch die jeweils verwendete Pflanzenart, ihre Abhärtung, die Dauer der Behandlung usw. eine Rolle spielt.

Auch über den Einfluss der Bodenfeuchte und Beregnung auf den Nitratgehalt von Möhren sind unterschiedliche Ergebnisse zu finden. Bei Untersuchungen von HARTMANN et al. (1986) traten die höchsten Nitratgehalte bei mittlerer Beregnung auf, da das Nitratangebot bei höherer durch Auswaschung und bei geringerer Beregnung durch eingeschränkten Massenfluss verringert war. In anderen Versuchen wurde der Nitratgehalt durch Beregnung signifikant gesenkt oder, wie auch im Feldversuch in dieser Arbeit, kein Einfluss von Beregnung auf den Nitratgehalt festgestellt (PASCHOLD und HUNDT 1986; PASCHOLD 1989b; MOJE 1997).

Im hier beschriebenen Gefäßversuch führte ein niedriges Wasserpotential im Boden zu höheren Nitratgehalten in der Möhre, verursacht durch die höheren Stickstoffgehalte im Boden als direkte Folge der Ertragsminderung. Ergebnisse mehrerer Beregnungsversuche aus der Literatur bestätigen diesen Zusammenhang (BREIMER 1982; PASCHOLD 1989a+b; HEDGE 1987; GUTEZEIT und SCHEUNEMANN 1994). Bei SØRENSEN et al. (1997) hatte Trockenstress am Anfang der Vegetationsperiode hohe, am Ende der Kulturzeit geringe Nitratgehalte in der Möhre zur Folge. Da sich ein hohes Nitratangebot kurz vor der Ernte ungünstig auf den Nitratgehalt auswirkt (MOJE 1997), kann eine Trockenperiode in dieser Zeit das Nitratangebot verringern und einen niedrigen Nitratgehalt zur Ernte nach sich ziehen. Im Gegensatz dazu können Niederschläge in der Zeit kurz vor der Ernte nach einer längeren trockenen Periode das im Boden befindliche Nitrats wieder für die Pflanze verfügbar machen oder einen Mineralisierungsschub auslösen und so das Nitratangebot und den Nitratgehalt erhöhen. Auch PASCHOLD und HUNDT (1986) sowie PASCHOLD (1989b) empfehlen, drei Wochen vor der Ernte die Beregnung einzustellen, um einen Mineralisierungsschub zu verhindern. Immer wieder wurde auch die Beobachtung gemacht, dass nicht bzw. nicht ausreichend bewässerte Bestände von Speisemöhren die größte Schwankungsbreite im Nitratgehalt zur Ernte aufweisen (FRÖHLICH et al. 1990; PASCHOLD 1989b; MOJE

1997). Eine möglichst gleichmäßige Bodenfeuchte während der Hauptvegetationszeit sichert eine hohe Ertragsbildung und deshalb auch einen geringen Nitratgehalt bei Möhren (SRI AGUNG und BLAIR 1989; FRÖHLICH und HENKEL 1990; FRÖHLICH 1991; PRABHAKAR et al. 1991; SØRENSEN et al. 1997).

5.6 Einfluss von Morphologie und Wachstum auf den Nitratgehalt

Der Einfluss von Morphologie und Wachstum auf den Nitratgehalt von Möhren ist einerseits genotypisch festgelegt, andererseits kann er durch äußere Faktoren und deshalb auch vom Anbauer beeinflusst werden, z.B. durch möglichst optimale Wachstumsbedingungen.

Morphologie der Rübe

Eine Möglichkeit zur Senkung des Nitratgehaltes kann die Verwendung nitratarmer Sorten sein. In der Literatur wird bei Möhren in diesem Zusammenhang oft ein möglichst hohes Verhältnis von Rinde zu Mark genannt (VENTER 1984; PASCHOLD und HUNDT 1986; PASCHOLD 1989b). Da Gewebe, in denen Nitrat transportiert wird, in der Regel den höchsten Nitratgehalt haben (MARSCHNER 1985), und der Durchmesser des Marks bei Möhren genotypisch festgelegt ist (BANGA 1962; NONNECKE 1989; KRUG 1991; VOGEL 1996), könnte das Verhältnis von Rinde zu Mark eine wichtige Rolle bei der Auswahl nitratarmer Sorten spielen, und eine gezielte Züchtung auf einen geringen Markanteil den Nitratgehalt verringern (PASCHOLD 1989b).

Tatsächlich wurde von PASCHOLD (1989b) bei der Sorte '*Lange Rote Stumpfe*' ein negativer Zusammenhang zwischen dem Rindenanteil und dem Nitratgehalt gefunden. In eigenen Versuchen konnte bei der Sorte '*Ingot*' kein Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Rinde zu Mark und dem Nitratgehalt nachgewiesen werden. Betrachtet man die Verteilung von Nitrat innerhalb der Rübe (Tabelle 16), ist jedoch aufgrund des hohen Frischgewichtsanteiles der Rinde der Einfluss des Nitratgehaltes im Mark auf den der ganzen Rübe eher gering. Auch in zahlreichen anderen Veröffentlichungen, z.B. von VULSTEKE und BISTON (1978), BLANC et al. (1979), GUTEZEIT und SCHEUNEMANN

(1995) und MOJE (1997) war der Nitratgehalt einer Sorte eher von anderen Bedingungen abhängig. Die Rangfolge verschiedener Sorten, die nach Nitratgehalt sortiert wurden, änderte sich in Abhängigkeit von Wachstumsbedingungen wie z.B. dem Stickstoffangebot, dem Standort oder dem Erntetermin. Ähnliche Ergebnisse fand auch WEDLER (1985) bei Roter Rübe.

Bei einigen Gemüsearten wurde eine negative Beziehung zwischen der Größe und dem Nitratgehalt gefunden, z.B. bei Kohlrabi (SCHAER 1989) und Roter Rübe (WEDLER 1980). Im Gegensatz zum Verhältnis von Rinde zu Mark ist bei Möhren die Rübengröße nicht allein sortentypisch, sondern vor allem durch Umweltbedingungen und Anbautechnik bestimmt. PASCHOLD (1989b) sortierte das Erntegut einer Möhrensorte nach Durchmesser, fand jedoch zwischen den Größenfraktionen keine signifikanten Unterschiede im Nitratgehalt. Dieses Ergebnis bestätigt eigene Untersuchungen, in denen Möhren jeweils nach Länge und Durchmesser sortiert wurden, und ebenfalls keine Beziehung zwischen Größe bzw. Länge und dem Nitratgehalt gefunden wurden (Ergebnisse nicht dargestellt).

Eine Ursache für kleine Rüben bei Möhren ist neben ungünstigen Wachstumsbedingungen eine hohe Bestandesdichte und daraus resultierende verstärkte Konkurrenz der Pflanzen untereinander. Je nach Konkurrenzsituation kann der Nitratgehalt sowohl niedrig als auch hoch sein: Konkurrieren die Pflanzen um begrenzt vorhandenen Stickstoff, hat das geringe Nitratgehalte zur Folge, bei Lichtkonkurrenz aufgrund gegenseitiger Beschattung treten hohe Nitratgehalte auf (PASCHOLD 1989b; VULSTEKE und BISTON 1978). Besonders bei nachlassender Strahlung im Herbst treten deshalb in Möhrenbeständen auf Standorten mit hohen Stickstoffgehalten im Boden vermehrt hohe Nitratgehalte auf.

Betrachtet man den Rübenertrag pro Fläche, fanden RÄBER und KOCHER (1982), RÄBER et al. (1982) und MOJE (1997) abnehmende Nitratgehalte bei steigenden Möhrenerträgen. MOJE (1997) führte dieses auf einen Verdünnungseffekt zurück, d.h. in der Pflanze ist die gleiche Nitratmenge bei hohem Ertrag weniger stark konzentriert. Niedrige Nitratgehalte bei hohen Erträgen können allerdings auch durch größeren Stickstoffentzug und daraus folgende geringere N_{\min} -Restwerte im Boden begründet sein. Wenn Möhren bei ungünstigen Wachstumsbedingungen weniger Ertrag bringen und

dadurch einen geringeren Stickstoffentzug aufweisen, sind zur Ernte höhere N_{\min} -Restwerte im Boden vorhanden, die einen höheren Nitratgehalt in den Möhren verursachen. Zusätzlich ist die Nitratassimilation bei schlechten Wachstumsbedingungen vermindert. Auch RÄBER und KOCHER (1982), RÄBER et al. (1982) und MOJE (1997) weisen auf den Einfluss des Stickstoffangebotes zum Zeitpunkt der Ernte hin.

Wachstum von Laub und Rübe

Möhren werden in Frischmarkt- und Industriesorten unterschieden. Letztere sind u. a. durch eine große Rübe und längere Kulturzeit charakterisiert. Da für Industriesorten eine geringere Bestandesdichte empfohlen wird, können die oben beschriebenen morphologischen Sortenunterschiede jedoch nicht nur genotypisch, sondern auch durch äußere Faktoren bedingt sein.

Tatsächlich erreichte die Frischmarktsorte '*Ingot*' bei geringer Bestandesdichte, d.h. geringerer Konkurrenz zwischen den Pflanzen, gleicher Kulturdauer und gleichen Wachstumsbedingungen eine ähnliche Rübengröße wie die Industriesorte '*Karotan*' (Abbildung 32).

Unterschiede im Wachstum zwischen den Sorten waren jedoch vorhanden: Bei gleichem Gesamtgewicht hatte die Frischmarktsorte '*Ingot*' ein wesentlich zügigeres Rübenwachstum. Dies wurde besonders zum Ende des Gefäßversuches deutlich, als das Verhältnis von Laub zu Rübe bei '*Ingot*' 1:4, bei '*Karotan*' jedoch nur 1:1 betrug (Abbildung 31). '*Karotan*' hatte ein geringeres Rübengewicht, aber deutlich mehr Laubmasse. Die Rübenbildung setzt bei '*Karotan*' erst bei höherer Laubmasse ein. Auch im Feldversuch waren diese Unterschiede im Laub- und Rübenwachstum bei geringer Bestandesdichte wieder zu erkennen, und hatte '*Karotan*' ein wesentlich engeres Verhältnis von Laub zu Rübe als '*Ingot*'.

Durch stärkeres Rübenwachstum erreichte die Frischmarktsorte tatsächlich früher die Erntereife. Die Erntereife wird durch die vom Anbauer gewünschte Größe, von Ausfärbung und Form der Rübe und auch vom Laubzustand bestimmt (KRUG 1991). Die physiologische Reife wird von DASSLER und HEITMANN (1991) als der biologische Abschluss der Entwicklung der Frucht nach Ausnutzung der gesamten Vegetations-

periode definiert. Bei der Möhre, bei der das vegetative Speicherorgan geerntet wird, ist eine exakte Festlegung der Erntereife deshalb schwierig. Eine Phaseneinteilung, bei der die Differenzierung und das Wachstum der vegetativen Organe zugrunde liegt, erscheint hier sinnvoller, da von diesen die Verteilung der Assimilate und die Erntereife vorrangig bestimmt wird (KRUG 1991).

BANGA (1962) unterscheidet beim vegetativen Wachstum der Rübe der Möhre zwei Phasen: das primäre vegetative Wachstum, d.h. die Bildung der Pfahlwurzel, und die sekundäre Phase oder Reifephase, in der sich das Reserveorgan ausbildet (Wurzelverdickung und Färbung). Beide Phasen können gleichzeitig aktiv sein und bilden ein sortentypisches, aber durch äußere Faktoren veränderbares Gleichgewicht. Von diesem Aktivitätsverhältnis hängen Form und Farbe der Rübe ab.

Der durch Größe der Rübe und Gehalt an Inhaltsstoffen bestimmte Zeitpunkt der Erntereife ist nach BANGA (1962) zwar sortentypisch, aber schwer zu definieren, weil sowohl der Gehalt an Inhaltsstoffen als auch Größe und Form einer Sorte je nach äußeren Einflüssen stark differieren können. Ein Beispiel dafür ist die Frischmarktsorte 'Ingot', deren Rübe bei geringer Bestandesdichte ähnlich groß wurde wie die der Industriesorte 'Karotan'. Auch HABBEN (1972) weist auf fehlende Reifekriterien bei Möhren hin, da Ertrag, Karotin-, Nitrat- und Zuckergehalt eine hohe umweltbedingte Variabilität aufweisen.

Bei Möhren wird oft auf eine negative Korrelation von Nitratgehalt und physiologischer Reife hingewiesen (z.B. GEYER 1978; HABBEN 1972; RÄBER und KOCHER 1982; PASCHOLD 1989a; GUTEZEIT und SCHEUNEMANN 1995; MOJE 1997). Der Zeitpunkt der Reife ist jedoch schwer zu bestimmen. Die Aussage, dass der Nitratgehalt bei Möhren im Verlauf der Kulturzeit absinkt und ein Zusammenhang zwischen physiologischer Reife und Nitratgehalt besteht, kann in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Der Nitratgehalt sank in den Klimakammern bei gleich bleibendem Stickstoffangebot nur zu Beginn der Hauptwachstumsphase, in der ein erhöhter Stickstoffbedarf besteht, und blieb danach auf gleichem Niveau. Im Freiland war keine einheitliche Tendenz vorhanden. Andere Autoren fanden zum Herbst ansteigende Nitratgehalte (HUNDT et al. 1986a; MOJE 1997).

Der abnehmende Nitratgehalt in der Rübe von Möhren im Verlaufe der Kulturzeit wird

vermutlich durch ein geringer werdendes Stickstoffangebot in Verbindung mit guten Assimilationsbedingungen, Wachstum sowie genotypischen Eigenschaften verursacht. Gegen Ende der Kulturzeit, wenn sich das Wachstum verringert und der Stickstoffbedarf sinkt, hängt die Höhe des Nitratgehaltes von einer Anzahl verschiedener Faktoren ab. Das Stickstoffangebot spielt immer noch eine große Rolle, obwohl die Beziehung zwischen Nitratgehalt und Stickstoffangebot kleiner wird. Bei gutem Wachstum wird auch bei hohem Stickstoffangebot während der Kulturzeit der gesamte aufgenommene Stickstoff assimiliert, und die Nitratgehalte bleiben gering. Möhren entleeren im Verlaufe der Kulturzeit den Stickstoffvorrat des Bodens oftmals sehr stark (MOJE 1997) und nutzen das vorhandene Stickstoffangebot zum großen Teil, so dass bei der Ernte nur geringe Restmengen im Boden sind. Wenn das Stickstoffangebot geringer wird, steigt jedoch der Einfluss anderer Faktoren, z.B. der Strahlung. Auch in den Untersuchungen von MOJE (1997) wirkte sich ein hohes Stickstoffangebot erst bei ungünstigen Assimilationsbedingungen negativ auf den Nitratgehalt aus. In älteren Blättern oder Geweben mit geringen Wachstumsraten sinkt außerdem die Nitratreduktaseaktivität stark ab. Folge ist eine träge Reaktion der Nitratgehalte in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen (VULSTEKE und BISTON 1978; BLANC et al. 1979; MARSCHNER 1985). Bei einem Verschieben der Erntezeit im Herbst mit dem Ziel, den Nitratgehalt zu verringern, besteht die Gefahr, dass bei nachlassendem Wachstum der Rübe und nachlassender Strahlung die Nitratgehalte ansteigen.

Wurzelwachstum

Unterschiede im Nitratgehalt können auch durch Eigenschaften der Feinwurzeln verursacht sein, da diese für die räumliche Erschließung des Nitrats im Boden und die Effizienz der Stickstoffaufnahme wichtig sind. Wesentliche Parameter sind dabei die Schnelligkeit der Tiefendurchwurzelung, die maximale Durchwurzelungstiefe und die Wurzellängendichte (WIESLER 1991; WIESLER und HORST 1994; REIDENBACH 1997). Eine zügigere und bessere Durchwurzelung des Bodens durch eine Sorte im Vergleich zu einer anderen hat einerseits für diese Sorte eine bessere Versorgung mit Wasser und Nährstoffen zur Folge, andererseits bedeutet mehr gebildete Wurzelmasse aber auch, dass weniger Kohlenhydrate und Assimilate für Spross oder Rübe genutzt

werden. Eine geringere Durchwurzelung kann bei Möhren also auch eine Förderung des Spross- und Rübenwachstums bedeuten.

Die in den Wurzelröhren für die Sorten '*Karotan*' und '*Ingot*' ermittelte Wurzellängendichte (Tabelle 17) war mit weniger als $1 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ relativ gering, jedoch ausreichend, um den Boden weitgehend an Nitrat zu verarmen (ROBINSON und RORISON 1983; REIDENBACH 1997). Möhren können den Boden im Verlauf der Kultur fast völlig entleeren und haben insgesamt eine gute Stickstoffnutzungseffizienz (Moje 1997).

Tabelle 17: Wurzellängendichte von '*Karotan*' und '*Ingot*' in Abhängigkeit von der Gefäßtiefe (G2)

Wurzellängendichte [$\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$]	' <i>Ingot</i> '	' <i>Karotan</i> '
0-25 cm	0.60	0.83
25-50 cm	0.60	0.84
50-75 cm	0.28	0.45
75-100 cm	0.06	0.22

'*Karotan*' hatte im Vergleich zu '*Ingot*' eine höhere Wurzellängendichte und auch eine größere maximale Durchwurzelungstiefe (Tabelle 17, Abbildung 28). Da eine höhere Wurzellängendichte zu einer stärkeren Verarmung des Bodens an Nitrat führt (REIDENBACH 1997), müsste '*Karotan*' den Boden mehr entleeren und geringere Restnitratmengen im Boden hinterlassen. Tatsächlich war der N_{\min} -Rest bei '*Karotan*' geringer als bei '*Ingot*' (Tabelle 18). Und auch MOJE (1997) fand in Freilandversuchen geringere N_{\min} -Reste bei '*Karotan*' als bei '*Ingot*'.

Bei Untersuchungen mit Mais von WIESLER und HORST (1992+1994) stand die Abnahme der Nitratgehalte im Boden und die Durchwurzelungsintensität außerdem in engem Zusammenhang zu genotypischen Unterschieden in der Aufnahmekapazität des Sprosses für Stickstoff, also dem Sprossertrag. Auch REIDENBACH (1997) führt eine positive Korrelation zwischen der Wurzellängendichte und der Abnahme der Nitratgehalte im Boden u.a. auf Unterschiede in der Stickstoffaufnahmekapazität des Sprosses

zurück. Im Vergleich zu 'Ingot' hatte 'Karotan' tatsächlich ein höheres Laubgewicht (Tabelle 18), größere Wurzellängendichte und geringere N_{\min} -Reste.

Im Freilandversuch hinterließ 'Karotan' geringere N_{\min} -Reste im Boden und nahm während der Vegetationszeit insgesamt eine größere Menge an Stickstoff auf als 'Ingot'. Die Verwertungseffizienz, d.h. die Ertragsbildung pro Einheit aufgenommenen Stickstoffes, war jedoch geringer, bei gleichzeitig höherem Nitratgehalt (Tabelle 18). Auch MOJE (1997) stellte bei Möhren eine negative Beziehung zwischen der Stickstoffverwertung und dem Nitratgehalt fest.

Tabelle 18: Frischgewicht, Trockengewicht, N-Gehalt, N-Aufnahme und N-Verwertungseffizienz (Gesamtertrag./N-Aufnahme) der Möhre (F3, N+, 4. Erntetermin)

	'Ingot'	'Karotan'
Frischgewicht		
Rübe [g/Pfl.]	138	120
Laub [g/Pfl.]	28	46
Trockengewicht		
Rübe [g/Pfl.]	17.1	14.6
Laub [g/Pfl.]	5.1	8.6
N-Aufnahme		
Rübe [g/Pfl.]	0.24	0.22
Laub [g/Pfl.]	0.10	0.17
Verwertungseffizienz		
Rübe [g FS/ g N]	575	545
Laub [g FS/ g N]	280	270
Nitratgehalt i. d. Rübe [mg/kg FS]	377	667
N_{\min}-Rest [kg N/ha]	83	30

Diese Ergebnisse können ein Hinweis auf Sortenunterschiede im Nitratgehalt von Möhren sein. Ob tatsächlich ein sortenspezifischer Zusammenhang zwischen Durchwurzelungsintensität, Stickstoffentleerung des Bodens, Sprossertrag, Stickstoffverwertung und Nitratgehalt besteht, wäre weiter zu überprüfen, zumal die verwendete

Sorte 'Karotan' in der Praxis später als im hier durchgeführten Versuch geerntet wird und dann höhere Rübenerträge als 'Ingot' und möglicherweise auch einen geringeren Nitratgehalt aufweisen könnte.

5.7 Anbautechnische Maßnahmen zur Verringerung des Nitratgehaltes

Bei vielen Gemüsearten ist es möglich, durch anbautechnische Maßnahmen den Nitratgehalt zu senken. Dazu gehören z.B. Verminderung und frühzeitige Beendigung der Nitraternährung, Vermeiden von Produktion oder Ernte bei geringer Belichtung, Verschieben des Erntetermins, Senkung des Stängelanteils bei der Ernte oder der Anbau nitratarmer Sorten (SCHARPF und BAUMGÄRTEL 1994). Einige dieser Maßnahmen sind bei Möhren nicht durchführbar, z.B. kann der Stängelanteil nicht vermindert und die Belichtung nicht beeinflusst werden. Auch bei der Wahl des Erntetermins sind dem Anbauer aufgrund der Verträge mit der möhrenverarbeitenden Industrie oft enge Grenzen gesetzt. Ebenso wurden bisher keine eindeutig nitratarmen Sorten bei Möhren gefunden (GUTEZEIT und SCHEUNEMANN 1995; MOJE 1997).

Speziell für Möhren werden darüber hinaus in der Literatur jedoch noch weitere Maßnahmen zur Senkung des Nitratgehaltes genannt.

Eine davon ist das Auswaschen von Stickstoff vor der Ernte durch eine einmalige Bewässerung. Um den Nitratgehalt von Möhren zum Zeitpunkt der Ernte zu senken, wird von den Anbauern in der Praxis manchmal versucht, durch eine einmalige hohe Bewässerung kurz vor der Ernte Stickstoff in tiefere Bodenschichten zu verlagern (=Auswaschung), und dadurch das Stickstoffangebot für die Möhren kurzfristig zu vermindern. Auch BLANC et al. (1980) empfiehlt diese Maßnahme, um den Nitratgehalt abzusenken. Da dieses Verfahren durch den hohen Wasserverbrauch sehr teuer und auch ökologisch nicht sinnvoll ist, sollte die Wirksamkeit überprüft werden. Die Auswaschung von Nitrat zur Senkung des Nitratgehaltes durch eine einmalige Bewässerung mit 20 mm kurz vor der Ernte senkte nur bei 'Karotan' den Nitratgehalt in der Möhre, jedoch nicht bei 'Ingot'. Aber auch bei 'Karotan' reichte die zusätzliche

Bewässerung nicht aus, um die N_{\min} -Restwerte ausreichend zu verringern und den Nitratgehalt auf unter 250 mg $\text{NO}_3^-/\text{kg FS}$ zu senken. Durch die einmalige Beregnung kann der Nitratgehalt auch unerwünscht erhöht werden, z.B. wenn durch die Wassergabe bei einem eher trockenen Boden die Verfügbarkeit von Nitrat erhöht würde und ein Mineralisationsschub stattfände (MOJE 1997). Wenn durch die Beregnung Nitrat und stickstoffhaltige Verbindungen aus den Blättern ausgewaschen werden (TUKEY 1970), könnte zwar vermehrt Nitrat aus der Rübe nachgeliefert werden und dadurch der Nitratgehalt in der Rübe sinken. Da die Mobilisierung von Nitrat aus dem Speicherpool jedoch eher langsam erfolgt, ist eine erhöhte Nitrataufnahme als Folge des Stickstoffbedarfes in den Blättern wahrscheinlicher.

Die Wirkung dieser Maßnahme ist also nicht abschätzbar und von zahlreichen anderen Faktoren, wie z.B. Bodenart, Witterung und die Verfügbarkeit von Stickstoff im Boden abhängig. Um Nitrat aus dem Boden auszuwaschen und so den Nitratgehalt zur Ernte zu senken, ist eine einmalige Beregnung kurz vor der Ernte ökonomisch und ökologisch nicht zu empfehlen, zumal in der Arbeit von MOJE (1997) andere und sicherere Maßnahmen empfohlen werden, um bei Möhren den Grenzwert des Nitratgehaltes nicht zu überschreiten.

Als weitere Möglichkeit wird das Unterschneiden der Rübe kurz vor dem Erntetermin empfohlen (MANß und MANß 1989). Durch das Unterschneiden soll die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanze unterbrochen werden. Ohne weitere Stickstoffaufnahme soll die Nitratreduktion und -verlagerung aus der Rübe in das Laub weiterhin stattfinden und als Folge der Nitratgehalt sinken. Diese Theorie konnte in den Versuchen dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Auch bei MOJE (1997) blieb der Nitratgehalt nach dem Unterschneiden unverändert. Sie führte das auf eine möglicherweise ungenügende Trennung von Rübe und Boden bei herbsthlicher Witterung zurück. Aber auch bei der hier durchgeführten Ernte im Sommer wurde der Nitratgehalt durch Unterschneiden nicht vermindert. Möglicherweise wurde durch das Abtrennen der Wurzeln die Stoffwechselaktivität der gesamten Pflanze und deshalb auch die Verlagerung und Reduktion des Nitrats aus der Wurzel beeinträchtigt. Bei dem von MANß und MANß 1989 empfohlenen Abstand von 5 Stunden vor der Ernte ist aufgrund der langsamen Mobilisierung von Nitrat aus dem Speicherpool in den metabolischen Pool nicht mit

einer Senkung des Nitratgehaltes in der Rübe in ausreichendem Umfang zu rechnen. Es kann eher davon ausgegangen werden, dass durch die Manipulation an einzelnen Teilen der Pflanze auch Funktionen in anderen Bereichen beeinträchtigt werden, da die Funktionen der einzelnen Pflanzenteile komplex miteinander verknüpft sind.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse des hier und in der Veröffentlichung von Moje 1997 vorgestellten gemeinsamen Projektes zeigen, dass es für den Anbauer möglich ist, unter bestimmten Voraussetzungen mit hoher Wahrscheinlichkeit einen geringen Nitratgehalt bei Möhren zu erreichen und den für Diät- und Babynahrung geforderten Grenzwert von 250 mg $\text{NO}_3^-/\text{kg FS}$ mit großer Sicherheit einzuhalten.

Hohe Nitratgehalte treten dann auf, wenn die Nitrataufnahme die Nitratreduktion übersteigt. Die Nitrataufnahme ist besonders groß, wenn das Stickstoffangebot hoch ist. Das sicherste Mittel für niedrige Nitratkonzentrationen in Möhren ist deshalb ein reduziertes Stickstoffangebot. Bereits die Anpassung der Stickstoffdüngung an das für Höchsterträge optimale Angebot von 70-80 kg N/ha aus Vorrat (0-90 cm) und Düngung bietet eine weitgehende Garantie für die Einhaltung des Grenzwertes, ohne den Rüben-ertrag zu mindern (MOJE 1997).

Durch die enge Verbindung zwischen Nitratreduktaseaktivität und Photosynthese ist die Höhe der Nitratreduktion und damit auch der Nitratakkumulation in erster Linie von der Einstrahlung abhängig. Bei Auftreten von hohen Nitratgehalten sollte die Ernte von Möhren deshalb in einer strahlungsintensiven Periode stattfinden und nicht zu weit in den Herbst verschoben werden. Die Tageszeit, zu der die Ernte stattfindet, ist aufgrund der relativ langsamen Reaktion der Möhren unwesentlich.

Für die Höhe der Nitratreduktion ist neben der Einstrahlung auch der Zustand der Blätter entscheidend. Die Nitratreduktaseleistung der Blätter sinkt bei schlechter Laubqualität, z.B. aufgrund von Mehltau, Alternaria oder anderen Pilzkrankheiten (BLANC et al. 1979). Obwohl besonders der Stickstoffbedarf des Sprosses die Aufnahme von

Nitrat regelt, wird bei nachlassendem Stickstoffbedarf der Blätter, z.B. aufgrund von Krankheiten, die Höhe der Nitrataufnahme nicht in gleichem Umfang verringert. So wurde auch bei vollständigem Verlust der Blätter weiter Nitrat aufgenommen (Abbildung 25) und der Nitratgehalt in der Möhre stieg an.

Die Laubqualität wird auch durch die im Herbst beginnende Abreife reduziert. Eine Folge ist auch hier die nachlassende Nitratreduktionsleistung. Die Abreife beginnt umso früher, je schlechter die Wachstumsbedingungen während der Kultur sind. Deshalb ist es wichtig, während der gesamten Kulturzeit das Wachstum der Pflanzen durch optimale Kulturbedingungen zu fördern. Eine wichtige Kulturmaßnahme ist in diesem Zusammenhang die Beregnung. Besonders Schwankungen in der Bodenfeuchte wirken sich negativ auf die Nitratgehalte aus (SRI AGUNG und BLAIR 1989; FRÖHLICH und HENKEL 1990; FRÖHLICH 1991; PRABHAKAR et al. 1991; SØRENSEN et al. 1997). Eine gleich bleibende Bodenfeuchte während der Kulturzeit gewährleistet außerdem eine gleichmäßige Verfügbarkeit des im Boden vorhandenen Stickstoffes und verhindert Mineralisationsschübe nach Trockenperioden, die auch noch kurz vor der Ernte einen plötzlichen Anstieg des Nitratgehalts verursachen können (MOJE 1997).

Bei gutem Wachstum wird auch bei hohem Stickstoffangebot während der Kulturzeit der gesamte aufgenommene Stickstoff assimiliert, und die Nitratgehalte bleiben gering. Erst bei ungünstigen Wachstumsbedingungen wirkt sich ein hohes Stickstoffangebot negativ auf den Nitratgehalt aus, da in älteren Blättern oder Geweben mit geringen Wachstumsraten die Nitratreduktaseaktivität stark absinkt. Bei hohem Wachstum ist der Stickstoffbedarf der Möhren dagegen groß, und hohe Nitratgehalte sind unwahrscheinlich.

Optimale Wachstumsförderung ist eine Voraussetzung für geringe Nitratgehalte. Die Gefahr des Auftretens hoher Nitratgehalte ist besonders hoch, wenn im Herbst bei nachlassendem Wachstum und geringer werdender Einstrahlung ein hohes Stickstoffangebot mit niedriger Nitratreduktaseleistung der Blätter z.B. aufgrund von Pilzkrankheiten und/oder Abreife zusammentrifft.

Bei der Kulturführung sollten Anbaumaßnahmen auf das Stickstoffangebot des Standortes abgestimmt werden. Aus den Ergebnissen des hier vorgestellten gemeinsamen Projektes erstellte MOJE (1997) eine Tabelle, mit deren Hilfe der

Anbauer die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung des Grenzwertes bei der Produktion von Industriemöhren abschätzen kann (Tabelle 19). Je höher das Stickstoffangebot (N_{\min} -Vorrat + Düngung) ist, desto sorgfältiger müssen Aussattermin, Bestandesdichte, Beregnung und Erntetermin gewählt werden, um den Grenzwert für Diät- und Baby-nahrung mit hoher Wahrscheinlichkeit einhalten zu können.

Unter Berücksichtigung von Klima- und Bodeneigenschaften des jeweiligen Standortes bei der Kulturführung, optimaler Wachstumsförderung und einem geringen Stickstoffangebot ist ein Überschreiten der Grenzwerte bei Möhren unwahrscheinlich (Abbildung 44).

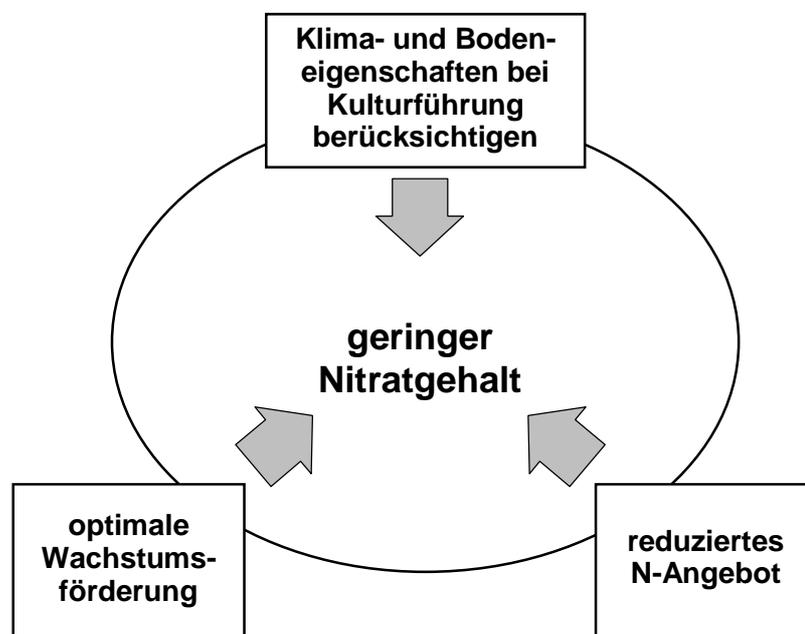


Abbildung 44: Voraussetzungen für einen Nitratgehalt in Möhren von weniger als 250 mg NO_3^- /kg FS

Tabelle 19: Anbaumaßnahmen zur Sicherung eines niedrigen Nitratgehaltes in Industriemöhren in Abhängigkeit vom N-Angebot (MOJE 1997)

N-Angebot	Maßnahmen	Überschreitung NO₃⁻-Grenzwert
niedriges N-Angebot N _{min} -Vorrat (0-90 cm) + Düngung < 70 kg N/ha	Saattermin: frei wählbar Bestandesdichte: frei wählbar Beregnung: vorteilhaft (Ertragssicherung) Erntetermin: frei wählbar Anstieg des Nitratgehaltes unwahrscheinlich*	sehr unwahrscheinlich
mittleres N-Angebot N _{min} -Vorrat (0-90 cm) + Düngung 70-100 kg N/ha	Saattermin: bis Anfang Mai Bestandesdichte: frei wählbar Beregnung: vorteilhaft (Ertragssicherung) Erntetermin: frei wählbar Anstieg des Nitratgehaltes unwahrscheinlich*	unwahrscheinlich
hohes N-Angebot N _{min} -Vorrat (0-90 cm) + Düngung 100-130 kg N/ha	Saattermin: bis Anfang Mai Bestandesdichte: > 70 Pfl./m ² Beregnung: erforderlich (Ertragssicherung) Erntetermin: September / Anf. Oktober Anstieg des Nitratgehaltes möglich	in Einzelfällen möglich
sehr hohes N-Angebot N _{min} -Vorrat (0-90 cm) + Düngung > 130 kg N/ha	Saattermin: bis Anfang Mai Bestandesdichte: > 70 Pfl./m ² Beregnung: erforderlich (Ertragssicherung) Erntetermin: September Anstieg des Nitratgehaltes wahrscheinlich	häufiger möglich, vor allem, wenn Einstrahlung vor der Ernte gering und/oder Ertrag niedrig

* Ausnahme: Wiederbefeuchtung nach Sommertrockenheit

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die industrielle Verwendung der Möhre für Diät- und Babynahrung erfordert in der Bundesrepublik Deutschland die Einhaltung des Grenzwertes für Nitrat von 250 mg NO_3^- /kg Frischsubstanz. Hohe Nitratgehalte treten in erster Linie bei einem hohen Stickstoffangebot auf. In der Praxis gibt es jedoch immer wieder Schwierigkeiten bei der Einhaltung des Nitratgrenzwertes, die nicht nur über das Stickstoffangebot zu erklären sind.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb, neben dem Stickstoffangebot weitere Faktoren zu prüfen, die die Nitratakkumulation beeinflussen, insbesondere Klimafaktoren und anbautechnische Maßnahmen. Die Versuche zum Einfluss von Klimafaktoren und anbautechnischen Maßnahmen wurden in Klimakammern, im Gewächshaus und im Freiland durchgeführt. Ein Vergleich von Sortenunterschieden erfolgte im Feldversuch und in Kunststoffröhren. Außerdem wurde das Speicherverhalten von Nitrat in Zellen der Rübe mit einer Druckmesssondentechnik untersucht, die zunächst modifiziert werden musste.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Nitratgehalt in der Möhre ist in den Blattstielen besonders hoch, gefolgt von der Blattspreite. In der Rübe ist er wesentlich geringer. Innerhalb der Rübe ist der Nitratgehalt im Mark sehr viel höher als in der Rinde. Der Rindenanteil liegt in der Regel bei >80 %. Innerhalb der Rübe gibt es zwischen den einzelnen Geweben deutliche Unterschiede in der zellulären Struktur und im Speichervermögen. Messungen der Nitratkonzentration mit einer Drucksonde in den Vakuolen von Einzelzellen ergaben die höchsten Werte in der Nähe der Xylemgefäße im kambiumnahen Gewebe. Für die Nitratkonzentration in der Vakuole ist neben der Distanz zu den Xylemgefäßen die Größe und das Alter der Zelle entscheidend. Auf eine Änderung des Nitratangebotes reagiert die Nitratkonzentration in den Vakuolen der Rinde nur sehr träge.
- Veränderungen im Nitratgehalt haben einen entgegengesetzten Verlauf des Gehalts an Saccharose zur Folge, obwohl der Anteil des Nitrats am osmotischen Potential nur gering ist.

- Mit abnehmender Strahlung steigt der Nitratgehalt. Temperatur und Nitratgehalt sind positiv korreliert. Das Sättigungsdefizit der Luft hat auf den Nitratgehalt keinen Einfluss. Abnehmende Bodenfeuchte verzögert das Wachstum und erhöht damit den Nitratgehalt.
- Eine Stickstoffdüngung erhöhte den Nitratgehalt der Möhre in allen Versuchen. Das Auswaschen des Stickstoffes durch eine starke Beregnung vor der Ernte senkt den Nitratgehalt nicht oder nur unzureichend und ist aus ökologischen Gründen und aufgrund der unsicheren Wirkung nicht zu empfehlen. Anbautechnische Maßnahmen, wie das Unterschneiden der Pflanzen oder das Entfernen des Laubes einige Tage vor der Ernte, verringern den Nitratgehalt nicht.
- Die träge Reaktion des Speicherpools und die stärkere Reaktion des Laubwachstums auf Veränderungen des Nitratangebotes sowie die Speicherung von Saccharose in der Rübe weisen darauf hin, dass die Nitratreduktion in der Möhre überwiegend im Blatt erfolgt und nur zu einem geringen Anteil in der Rübe. Ein gesunder Blattapparat ist deshalb Voraussetzung für einen Nitratabbau in der Rübe. Alle Faktoren, die die Assimilationsfläche negativ beeinflussen, erhöhen den Nitratgehalt. Alle wachstumsfördernden Maßnahmen begünstigen einen geringen Nitratgehalt.
- Die geprüften Sorten unterscheiden sich nicht nur in der Kulturdauer, sondern auch im Nitratgehalt. Die späte Industriesorte ‚*Karotan*‘ bildet mehr Wurzeln als die Frischmarktsorte ‚*Ingot*‘ und beginnt mit der Rübenbildung erst bei wesentlich höheren Laubgewichten. Ob tatsächlich ein sortenspezifischer Zusammenhang zwischen morphologischen Merkmalen und dem Nitratgehalt besteht, muss weiter geprüft werden.
- Möhren durchwurzeln den Boden tiefer als bisher angenommen worden ist. Eine Stickstoffentleerung des Bodens bis zu 1 m Tiefe ist möglich.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Anbauer bei der Kulturführung in jedem Fall die Klima- und Bodeneigenschaften des jeweiligen Standortes berücksichtigen sollte. Bei optimaler Wachstumsförderung und einem geringen Stickstoffangebot ist ein Überschreiten des Nitratgrenzwertes bei Möhren unwahrscheinlich.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Ackerson, R.C.; Krieg, D.R.; Haring, C.L.; Chang, N. (1977):** Effects of plant water status on stomatal activity, photosynthesis and nitrate reductase activity of field grown cotton. *Crop Science* 17, S.81-84
- Ali, I.A.; Kafkafi, U.; Sugimoto, Y.; Inanaga, S.; (1996):** Effects of low root temperature on sap flow rate, soluble carbohydrates, nitrate content and on cytokinin and gibberelin levels in root xylem exudate of sand-grown tomato. *Journal of Plant Nutrition* 19, S.619-634
- Andrews, M. (1986):** The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants. *Plant, Cell, Environment* 9, S.511-519
- Anonym (1994a):** Nitrat. Methoden der enzymatischen BioAnalytik und Lebensmittelanalytik. Boehringer, Mannheim
- Anonym (1994b):** Glucose, Fructose, Saccharose. Methoden der enzymatischen BioAnalytik und Lebensmittelanalytik. Boehringer, Mannheim
- Aslam, M.; Huffaker, R.C. (1982):** In vivo nitrate reduction in roots and shoots of barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings in light and darkness. *Plant Physiology* 70, S.1009-1013
- Aslam, M.; Oaks, A.; Huffaker, R.C. (1976):** Effect of light and glucose on the induction of nitrate reductase and on the distribution of nitrate in etiolated barley leaves. *Plant Physiology* 58, S.558-591
- Avery, A.A. (1999):** Infantile methemoglobinemia: Reexamining the role of Drinking Water Nitrates. *Environmental Health Perspectives* 107, S.583-586
- Baker, A. S.; Smith, R. (1969):** Extracting solution for potentiometric determination of nitrate in plant tissue. *Journal of agricultural food and chemistry* 17, S.1284-1287
- Banga, O. (1962):** Gemüse-Züchtung. Wurzel-, Rüben- und Knollengemüse: Möhre (*Daucus carota* L.). *Handbuch der Pflanzenzüchtung, Band VI.* Kappert, H.; Rudolf, W. (Hrsg.), Parey, Berlin, Hamburg

- Behr, U. (1988):** Sortenvergleich zum Gehalt an Nitrat und anderen qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen in Kopfsalat (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.) und Spinat (*Spinacia oleracea* L.). Dissertation, Hannover
- Behr, U.; Wiebe, H.-J. (1988):** Beziehungen zwischen dem Gehalt an Nitrat und anderen Osmotika des Zellsaftes bei Kopfsalatsorten (*Lactuca sativa* L.). Gartenbauwissenschaft 53, S.206-210
- Behr, U.; Wiebe, H.J. (1992):** Relation between photosynthesis and nitrate content of lettuce cultivars. *Scientia Horticulturae* 49, S.175-179
- Benjamin, L.R.; Wren, M.J. (1978):** Root development and source-sink relations in carrot (*Daucus carota* L.). *Journal of Experimental Botany* 29, S.425-433
- Benjamin, N.; McKnight, G. (1997):** Metabolism of nitrate in humans: Implications for nitrate intake. *Managing risks of nitrates to humans and the environment.*, Wilson, W.S.; Ball, A.S.; Hinton, R.H. (Hrsg.), Royal Society of Chemistry, Cambridge. S.281-288
- Bergmann, W. (1993):** Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer, Jena, Stuttgart
- Beutler, H.-O.; Wurst, B.; Fischer, S. (1986):** Eine neue Methode zur enzymatischen Bestimmung von Nitrat in Lebensmitteln. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* 82, S.283-289
- Bigot, J.; Boucaud, J. (1994):** Low-temperature pretreatment of the root system of *Brassica rapa* L. plants. Effects on the xylem sap exudation and on the nitrate absorption rate. *Plant Cell Environment* 17, S.721-729
- Bigot, J.; Boucaud, J. (1996):** Short-term responses of *Brassica rapa* plants to low root temperature: Effects of nitrate uptake and its translocation to the shoot. *Physiologia Plantarum* 96, S.646-654
- Blanc, D. ; Otto, C.; Mars, S. (1980):** Etude de l'accumulation des nitrates dans la racine de carotte conséquences agronomiques. *Annuaire Nutrition et Alimentation* 34, S.963-968
- Blanc, D.; Mars, S.; Otto, C. (1979):** The effect of some exogenous and endogenous factors on the accumulation of nitrate ions by carrot root. *Acta Horticulturae* 93, S.173-185

- Blom-Zandstra, M. (1989):** Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Annals of Applied Biology* 115, S.553-561
- Blom-Zandstra, M.; Jupjin, G.L. (1987):** A computer-controlled multi-titration system to study transpiration, OH-efflux and nitrate uptake by intact lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) under environmental conditions. *Plant, Cell and Environment* 10, S.545-550
- Blom-Zandstra, M.; Lampe, J.E.M. (1985):** The Role of nitrate in the osmoregulation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown at different light intensities. *Journal of Experimental Botany* 36, S.1043-1052
- Blumwald, E.; Gelli, A. (1997):** Secondary inorganic ion transport. *Advances in Botanical Research Incorporating Advances in Plant Pathology* 25, S.401-417
- Boeing, H. (1991):** Epidemiological research in stomach cancer: progress over the last ten years. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology* 117, S.133-143
- Boon, J. van der; Steenhuizen, J.W.; Steingröver, E.G. (1990):** Growth and Nitrate Concentration of Lettuce as Affected by Total Nitrogen and Chloride Concentration, NH_4/NO_3 Ratio and Temperature of the Recirculating Nutrient Solution. *Horticultural Science* 65, S.309-321
- Bray, E.A. (1997):** Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science* 2, S.48-54
- Breimer, T. (1982):** Environmental factors and cultural measures affecting the nitrate content in spinach. *Fertilizer Research* 3, S.191-292
- Brouquisse, R.; James, F.; Pradet, A.; Raymond, P. (1992):** Asparagin metabolism and nitrogen distribution during protein degradation in sugar-starved maize root tips. *Planta* 188, S.384-395
- Brückner, U.; Hartmann, H.D. (1985):** Nitratgehalte und Ertrag von Industriemöhren bei unterschiedlicher N-Düngung. *Landwirtschaftliche Forschung. Kongressband, Sonderheft 41.* S.239-249
- Cantliffe, D.J. (1972a):** Nitrate accumulation in spinach grown at different temperatures. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 97, S.674-676

- Cantliffe, D.J. (1972b):** Nitrate accumulation in spinach under different light intensities. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 97, S.152-154
- Carvajal, M.; Cooke, D.T.; Clarkson, D.T.(1996):** Plasma membrane fluidity and hydraulic conductance in wheat roots: Interactions between root temperature and nitrate or phosphate deprivation. *Plant, Cell and Environment* 1996, S.1110-1114
- Champigny, M.L. (1995):** Integration of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in higher plants. *Photosynthesis Research* 46, S.117-127
- Clarkson, D.T. (1988):** Movements of ions across roots. Solute transport in plant cells and tissues. Baker, D. A.; Hall, J. L. (Hrsg.), Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex
- Clarkson, D.T. (1986):** Regulation of the absorption and release of nitrate by plant cells: A review of current ideas and methodology. *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Lambers, H.; Neeteson, J.J.; Stulen, I. (Hrsg.), Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Boston, Lancaster
- Cochran, W.D. (1954):** Some methods for strengthening the common chi-square-tests. *Biometrics* 13, S.417-451
- Comly, H.H. (1945):** Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. *Journal of the American Medical Association* 129, S.112-116
- Daie, J. (1984):** Characterization of sugar transport in storage tissue of carrots. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 109, S.718-722
- Danek-Jezik, K. (1986):** Nitratvergleiche bei Treibsalatsorten in verschiedenen Entwicklungsstadien. *Gartenbauwissenschaft* 51, S.190-192
- Daßler, E.; Heitmann, G. (1991):** *Obst und Gemüse: Eine Warenkunde*. Parey, Berlin, Hamburg
- Devienne, F.; Mary, B.; Lamaze, T. (1994b):** Nitrate transport in intact wheat roots. II. Long term effects of NO_3^- concentration in the nutrient solution on NO_3^- unidirectional fluxes and distribution within tissues. *Journal of Experimental Botany* 45, S.677-684

- Devienne, F.; Mary, B.; Lamaze, T. (1994a):** Nitrate transport in intact wheat roots. I. Estimation of cellular fluxes and NO_3^- distribution using compartmental analysis from data of 15NO_3^- -efflux. *Journal of Experimental Botany* 45, S.667-676
- Diätverordnung (1996):** Verordnung über diätetische Lebensmittel vom 25. August 1988. *Bundesgesetzblatt Teil I*, S.1713, zuletzt geändert am 24.6.1994
- Diest, A. van (1990):** Accumulation of nitrate in higher plants - Its causes and prevention. *Nitrogen in higher plants*. Abrol, Y. P. (Hrsg.), Research Studies Press, UK. S.411-460
- Dorchies, V.; Rambour, S. (1985):** Activité nitrate réductase chez *Cichorium intybus* (var. Witloof) à différents stades de développement et dans les tissus cultivés in vitro. *Physiologie Végétale* 23, S.25-35
- Dragland, S. (1978):** Nitrogen and water requirements for carrots. *Forsking Fors Landbruks* 29, S.139-159
- Dressel, J. (1976):** Über die Einsatzmöglichkeit ionensensitiver Elektroden in der Boden- und Pflanzenanalyse. *Landwirtschaftliche Forschung Sonderheft* 33, S.67-75
- Duncan, C.; Li, H.; Dykhuizen, R.; Frazer, R.; Johnston, P.; McKnight, G.; MacKenzie, H.; Batt, L.; Golden, M.; Benjamin, N.; Leifert, C. (1997):** Protection against oral and gastrointestinal diseases: Importance of dietary nitrate intake, oral nitrate reduction and enterosalivary nitrate circulation. *Comparative Biochemistry and Physiology* 118, S.939-948
- Dykhuizen, R.S.; Fraser, A.; Duncan, C.; Golden, M.; Benjamin, N.; Leifert, C. (1997):** Antimicrobial effect of acidified nitrite on gut pathogens: the importance of dietary nitrate in host defense. *Managing risks of nitrates to humans and the environment.*, Wilson, W.S.; Ball, A.S.; Hinton, R.H. (Hrsg.), Royal Society of Chemistry, Cambridge. S.295-316
- Dykhuizen, R.S.; Fraser, A.; Duncan, C.; Smith, C.C.; Golden, M.; Benjamin, N.; Leifert, C. (1996):** Antimicrobial effect of acidified nitrite on gut pathogens: importance of dietary nitrate in host defense. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 40, S.1422-1425

- Dykhuisen, R.S.; Fraser, A.; MacKenzie, H.; Golden, M.; Benjamin, N.; Leifert, C. (1998):** Helicobacter pylori is killed by nitrite under acidic conditions. Gut 42, S.334-337
- Engels, C.; Marschner, H. (1996):** Effect of root zone temperature and shoot demand on nitrogen translocation from the roots to the shoots in maize supplied with nitrate or ammonium. Plant Physiology and Biochemistry 34, S.735-742
- Engels, C.; Mönkle, L.; Marschner, H. (1992):** Effect of root zone temperature and shoot demand on uptake and xylem transport of macronutrients in maize (Zea mays L.). Journal of Experimental Botany 43, S.537-547
- Esau, K. (1940):** Developmental anatomy of the fleshy storage organ of Daucus carota. Hilgardia 13, S.175-226
- Evers, A.-M. (1989):** Effects of different fertilization practices on the NO₃-N, N, P, K, Ca, Mg, ash and dietary fibre contents of carrots. Journal of Agricultural Science in Finland 61, S.99-111
- Ferrari, T.E.; Yoder, O.C.; Filner, P. (1973):** Anaerobic nitrite production by plant cells and tissues: Evidence for two nitrate pools. Plant Physiology 51, S.423-431
- Franke, W. (1997):** Nutzpflanzenkunde. Georg Thieme, Stuttgart, New York
- Fröhlich, H. (1991):** Einflüsse von Niederschlag und Beregnung auf Ertrag, N-Freisetzung, -Transport und -Auswaschung. Bedarfsgerechte Gestaltung der Bodenfeuchtigkeit bei Speisemöhren. Gartenbau 38, S.18-19
- Fröhlich, H.; Henkel, A. (1990):** Fruchtartenspezifische Bewertung der Ergebnisse bedarfsgerechter Beregnungsgaben in der Feldgemüseproduktion. Gartenbau 7, S.102-105
- Fröhlich, H.; Henkel, A.; Zanner, L.; Lehmann, M. (1990):** Untersuchungen zum Wasserverbrauch und zur Effektivität der Beregnung von Speisemöhren unter den Produktionsbedingungen des Trockenjahres 1989. Gartenbau 37, S.129-132
- Frota, J.N.E.; Tucker, T.C (1978):** Salt and water stress influences on nitrogen metabolism in Red Kidney Beans. Soil Science Society of America Journal 42, S.743-746

- Geyer, B. (1978):** Untersuchungen zur Wirkung hoher Stickstoffgaben auf den Nitratgehalt von Freilandgemüse. *Archiv für Gartenbau* 26, S.1-13
- Golden, M.; Leifert, C. (1997):** Potential risks and benefits of dietary nitrate. *Managing risks of nitrates to humans and the environment.*, Wilson, W.S.; Ball, A.S.; Hinton, R.H. (Hrsg.), Royal Society of Chemistry, Cambridge. S.269-280
- Granges, A.; Darbelley, Ch. (1994):** Nitratakkumulation in Gewächshauskopfsalat. *Der Gemüsebau / Le Maraicher* 57, S.14-15
- Granstedt, R.C.; Huffaker, R.C. (1982):** Identification of the leaf vacuole as a major nitrate storage pool. *Plant physiology* 70, S.410-413
- Greenwood, D.J.; Hunt, J. (1986):** Effect of nitrogen fertilizer on the nitrate content of field vegetables grown in Britain. *Journal of Science Food and Agriculture* 37, S.373-383
- Grubb, P.J. (1977):** Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains. With special reference to mineral nutrition. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8, S.83-107
- Gutezeit, B.; Scheunemann, C. (1995):** Späte Möhrenernte sicherstes Mittel gegen hohe Nitratgehalte. *TASPO-Gartenbaumagazin*, S.42-44
- Gutezeit, B.; Scheunemann, C. (1994):** pers. Mitteilung, zitiert in: Moje (1997)
- Habben, J. (1972):** Einfluss von Düngung und Standort auf die Bildung wertgebender Inhaltsstoffe in Möhren (*Daucus carota* L.). Dissertation, TU München-Weihenstephan
- Hähndel, R. (1984):** Beeinflussung des Nitratgehaltes von Spinat sowie von Kopfsalat, Rote Bete und Radies durch variierte N- und Cl-Ernährung. Dissertation, Hannover
- Hain, B. (1995):** Speicherphysiologie und Wasserhaushalt der Zuckerrübe unter dem Einfluss von Kalium und Natrium. Dissertation, Hannover
- Hanson, A.D.; Hitz, W.D. (1982):** Metabolic response of mesophytes to plant water deficits. *Annual Review of Plant Physiology* 33, S.163-203

- Hartmann, H.D.; Werum, H., Brückner, U.; Zengerle, K.H. (1986):** Einfluss der Bewässerung auf den Ertrag von Möhren. *Gemüse* 22, S.62-65
- Havis, L. (1939):** Anatomy of the hypocotyl and roots of *Daucus carota*. *Journal of Agricultural research* 58, S.557-564
- Hedge, D.M. (1987):** Effect of soil matric potential, method of irrigation and nitrogen fertilization on yield, quality, nutrient uptake and water use of radish (*Raphanus sativus* L). *Irrigation Science* 8, S.13-22
- Heimer Y.; Filner, P. (1971):** Regulation of the nitrate assimilation pathway in cultured tobacco cells. III. The nitrate uptake system. *Biochimica et Biophysica Acta* 230, S.362-372
- Henriksen, G.H.; Raman, D.R.; Walker, L.P.; Spanswick, R.M. (1992):** Measurement of net fluxes of ammonium and nitrate at the surface of barley roots using ion-selective microelectrodes. *Plant Physiology* 99, S.734-747
- Hernandez, L.E.; Ramon, A.M.; Carpena-Ruiz, R.O.; Garate, A. (1995):** Evaluation of nitrate nutrition indexes in maize leaves: Metabolic nitrate content and nitrate reductase activity. *Journal of Plant Nutrition* 18, S.869-887
- Hole, C.; Morris, G.E.L.; Cowper, A.S. (1987):** Distribution of Dry Matter between Shoot and Storage Root of Field-Grown Carrots. III. Development of phloem and xylem parenchyma and cell numbers in the storage root. *Journal of Horticultural Sciences* 62, S.351-358
- Hole, C.C. (1996):** Carrots. Photoassimilate distribution in plants and crops. Source-Sink Relationships. Series: Books in Soils, Plants and the Environment. E. Zamski; A.A. Schaffer (Hrsg.), S.671-690
- Hucklesby, D.P.; Blanke, M.M. (1993):** Regulierung der Nitrataufnahme der Pflanze. *Nitrat in Boden und Pflanze*. Zakosek, H.; Lenz, F. (Hrsg.), Ulmer, Stuttgart
- Huffaker, R.C.; Radin, T.; Kleinkopf, G.E.; Cox, E.L. (1970):** Effects of mild water stress on enzymes of nitrate assimilation and of the carboxylative phase of synthesis in barley. *Crop Science* 10, S.471-474
- Hundt, I.; Paschold, P.J.; Podlesak, W. (1986a):** Untersuchungen zum Einsatz der Pflanzenanalyse für die Vorausschätzung des Nitratgehaltes von Spinat und Möhre zur Ernte. *Archiv für Gartenbau* 34, S.253-261

- Hundt, I.; Paschold, P.J.; Podlesak, W. (1986b):** Untersuchungen über Ursachen für einen Anstieg der Nitratgehalte in der Möhre vor der Ernte. *Archiv für Gartenbau* 34, S.351-360
- Hwang, H.; Dwyer, J.; Russell, R.M. (1994):** Diet, Helicobacter Pylorum infection, food preservation and gastric cancer risk: Are there new roles for preventative factors?. *Nutritional Review* 52, S.75-81
- Imssande, J.; Touraine, B. (1994):** N-demand and the regulation of nitrate uptake. *Plant Physiology* 105, S.3-7
- Ivashikina, N.V.; Sokolov, O.A. (1997):** Regulation of nitrate uptake and distribution in maize seedlings by nitrate, nitrite, ammonium and glutamate. *Plant Science* 123, S.29-37
- Kage, H. (1997):** Zur relativen Bedeutung von Massenfluss und Diffusion beim Nitrattransport zur Wurzel. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160, S.171-178
- Key, T.J.A.; Thorogood, M.; Appleby, P.N.; Burr, M.L. (1996):** Dietary habits and mortality in 11000 vegetarians and health conscious people: results of 17 years follow up. *British Medical Journal* 313, S.775-778
- Kick, H.; Große-Brauckmann, E. (1961):** Über die Konstruktion eines Vegetationsgefäßes aus Kunststoff. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 95, S.52-55
- Kniel, B.; Rauh, J.; Gnoth, K. (1992):** Potentiometrische Nitratbestimmung in Rote-Bete-Säften als routinemäßig anwendbare Methode für die Qualitätssicherung. *Die industrielle Obst- und Gemüseverwertung* 77, S.450-453
- Knipmeyer, J.W.; Hageman, R.H.; Early, E.B.; Seif, R.D. (1962):** Effect of light intensity on certain metabolites of the corn plant (*Zea mays* L.). *Crop Science* 2, S.1-5
- Köhler, W.; Schachtel, G.; Voleske, P. (1984):** *Biometrie*. Springer, Berlin
- Kolbe, H.; Müller, K. (1984):** Über die quantitative Bestimmung von Nitrat mit Hilfe einer nitratsensitiven Elektrode (für Serienanalysen, aufgezeigt am Beispiel von Kartoffelknollen). *Landwirtschaftliche Forschung* 37, Kongressband 1984

- Kolbe, H.; Zhang, W.-L.; Schärer, H.; Wathsack, T.; Künsch, U. (1993):** Nitrate determination in plant, mushroom and algae species using an ion-selective electrode. *Agribiological research* 46, S.89-99
- Kolbe, H.; Müller, K. (1984):** Über die quantitative Bestimmung von Nitrat mit Hilfe einer nitratsensitiven Elektrode (für Serienanalysen, aufgezeigt am Beispiel von Kartoffelknollen). *Landwirtschaftliche Forschung* 37. Kongressband 1984
- Krug, H. (1991):** Gemüseproduktion. Paul Parey, Berlin, Hamburg
- Krug, H.; Wiebe, H.-J. (1972):** Klimakammern mit indirekter Solekühlung und Taupunktkühler. Konstruktion, Funktion, Leistungen und Erfahrungen. *Gartenbauwissenschaft* 37, S.331-344
- Künsch, U.; Schärer, H.; Temperli, A. (1981):** Eine Schnellmethode zur Bestimmung von Nitrat in Frischgemüsen mit Hilfe der ionensensitiven Elektrode. *Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau Wädenswil, Flugschrift* 106
- Lange, E. (1981):** Nitratbestimmung in Produkten aus Möhren mit einer nitratsensitiven Elektrode. *Lebensmittelindustrie* 28, S.269-272
- Leifert, C.; Golden, M.H. (2000):** A re-evaluation of the beneficial and other effects of dietary nitrate. Paper presented to the International Fertiliser Society, Meeting in London, Nov. 2000. S.1-22
- Lenz, F. (1983):** Nitrat in Gemüse und Grundwasser. *Forschung und Beratung, Reihe C.*, S.7-19
- Lillo, C.; Henriksen, A. (1984):** Comparative studies of diurnal variation of nitrate reductase activity in wheat, oat and barley. *Physiologia Plantarum* 62, S.89-94
- Lorenz, H.-P.; Wiebe, H.-J. (1980):** Effect of temperature on photosynthesis of lettuce adapted to different light and temperature conditions. *Scientia Horticulturae* 13, S.115-123
- Macduff, J.H.; Jackson, S.B. (1992):** Influx and efflux of nitrate and ammonium in Italian Ryegrass and White clover roots: Comparisons between effects of darkness and defoliation. *Journal of Experimental Botany* 43, S.525-535
- Manß, H.; Manß, F. (1989):** Absenkung des Nitratgehaltes in Wurzelgemüse. *Gemüse* 25, S.377-379

- Marsh, P.; Martin, M. (1992):** Oral Microbiology. Chapman & Hall, London, UK
- Marschner, H. (1985):** Einfluss von Standort- und Wirtschaftsbedingungen auf Nitratgehalte in verschiedenen Pflanzenarten. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 41, S.16-33
- Marschner, H. (1995):** Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London
- Martinoia, E.; Heck, U.; Wiemken, A. (1981):** Vacuoles as storage compartments for nitrate in barley leaves .Nature 289, S.229-293
- Maynard, D.N.; Barker, A.V. (1979):** Regulation of nitrate accumulation in vegetables. Acta Horticulturae 93, S.153-162
- Maynard, D.N.; Barker, A.V.; Minotti, P.L.; Peck, N.H. (1976):** Nitrate accumulation in vegetables. Advanced Agronomy 28, S.71-118
- McDonald, A.J.S.; Davies, W.J. (1996):** Keeping in touch: Responses of the whole plant to deficits in water and nitrogen supply. Advances in Botanical Research 22, S.229-330
- McKinney, P.A.; Parslow, R.; Bodansky, H.J. (1997):** Nitrate exposure and childhood diabetes. Managing risks of nitrates to humans and the environment. Wilson, W.S.; Ball, A.S.; Hinton, R.H. (Hrsg.), Royal Society of Chemistry, Cambridge. S.327-339
- McKnight, G.M.; Duncan, C.W.; Leifert, C.; Golden, M.H. (1999):** Dietary nitrate in man: friend or foe?. British Journal of Nutrition 81, S.349-358
- Mengel, K. (1979):** Influence of exogenous factors on the quality and chemical composition of vegetables. Acta Horticulturae 93, S.133-151
- Mengel, K. (1991):** Ernährung und Stoffwechsel der Pflanzen. G. Fischer, Jena
- Mengel, K.; Casper, C. (1980):** Der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Verfügbarkeit von Nitratstickstoff im Boden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 143, S.617-626
- Mifflin, B.J. (1980):** Nitrogen metabolism and amino acid biosynthesis in crop plants. The biology of plant productivity., Carlson, P.S. (Hrsg.), Academic Press, London. S.225-296

- Milford, G.F.J. (1973):** The growth and development of the storage root of sugar beet. *Annals of Applied Biology* 75, S.427-438
- Milham, P.J.; Award, A.S.; Paul, R.E.; Bull, J.H. (1970):** Analysis of plants, soils and waters for nitrate by using an ion-selective electrode. *Analyst* 95, S.751-757
- Millard, P. (1988):** The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment* 11, S.1-8
- Minotti, P.L.; Stankey, D.L. (1973):** Diurnal variation in the nitrate concentration of beets. *Horticultural Science* 8, S.33-34
- Moje, C. (1997):** Möglichkeiten zur Absenkung des Nitratgehaltes in Möhren unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffangebotes. Dissertation, Hannover
- Morilla, C.A.; Boyer, J. S.; Hagemann, R.H. (1973):** Nitrate reductase activity and polyribosomal content of corn (*Zea mays* L.) having low leaf water potentials. *Plant Physiology* 51, S.817-824
- Müntz, K. (1984):** Stickstoffmetabolismus der Pflanzen. G. Fischer, Stuttgart
- Munzert, M. (1992):** Einführung in das pflanzenbauliche Versuchswesen. Parey, Berlin, Hamburg
- Nelson, D.W.; Sommers, L.E. (1973):** Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal* 65, S.109-112
- Nicolaisen, W.; Haar, R. (1964):** Untersuchungen über den Einfluss einer Nitratdüngung auf den Gesamtstickstoff- und Nitratgehalt von Möhren. *Gartenbauwissenschaft* 29, S.463-480
- Nicolaisen, W.; Zimmermann, H. (1968):** Der Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Nitratgehalt von Spinat unter wechselnden klimatischen Bedingungen. *Gartenbauwissenschaft* 33, S.353-380
- Nieuwhof, M. (1994):** Effects of temperature and light on nitrate content of radish (*Raphanus sativus* L.). *Gartenbauwissenschaft* 59, S.220-224
- Nieuwhof, M.; Jansen, R.C. (1993):** Effect of nitrogen fertilization on nitrate content of radish (*Raphanus sativus* L.). *Gartenbauwissenschaft* 58, S.130-134
- Nonnecke, I.L. (1989):** Vegetable production. AVI Book, New York

- Notton, B.A.; Hucklesby, D.P. (1983):** Assimilation and accumulation of nitrate by plants. Nitrat in Gemüse und Grundwasser, Vortragstexte. Fritz, D.; Lenz, F.; Venter, F.; Wendt, T. H. (Hrsg.), Universitätsdruckerei Bonn
- Oertli, J.J. (1987):** Interaktive Wirkung von Temperatur und Licht auf den Nitratgehalt von Gemüsepflanzen. Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung 26, S.483-489
- Oscarson, P. Ingemarsson, B.; Larsson, C.-M. (1989a):** Growth and nitrate uptake properties of plants grown at different relative rates of nitrogen supply. I. Growth of Pisum and Lemna in relation to nitrogen. Plant, Cell and Environment 12, S.779-785
- Oscarson, P. Ingemarsson, B.; Larsson, C.-M. (1989b):** Growth and nitrate uptake properties of plants grown at different relative rates of nitrogen supply. II. Activity and affinity of the nitrate uptake system in Pisum and Lemna in relation to nitrogen. Plant, Cell and Environment 12, S.787-794
- Padgett, P.E.; Leonhard, R.T. (1994):** Nitrate transport in Zea mays cell suspension cultures: The effect of solution composition and cell age. Journal of Experimental Botany 45, S.1387-1396
- Park, K.-W. (1981):** Einflüsse von Jahreszeit, Nährstoffangebot und Erntetermin auf die Qualität des Rettichs (*Raphanus sativus* L. var. *niger* (Mill.) S. Kerner). Dissertation, Technische Universität München, Weihenstephan
- Paschold, P.-J. (1988):** Einfluss ausgewählter pflanzenbaulicher Maßnahmen auf den Nitratgehalt von Spinat. I. Einfluss von Anbauzeitraum und Witterung. Archiv für Gartenbau 36, S.157-167
- Paschold, P.-J. (1989a):** Einfluss ausgewählter pflanzenbaulicher Faktoren auf den Nitratgehalt von Spätmöhren. 1. Mitteilung: Einfluss der Bodendichte, des Anbauzeitraumes und der Witterung. Archiv für Gartenbau 37, S.215-223
- Paschold, P.-J. (1989b):** Einfluss ausgewählter pflanzenbaulicher Faktoren auf den Nitratgehalt von Spätmöhren. 2. Mitteilung: Einfluss der Bestandesdichte, Beregnung, Sorte und weiterer Faktoren. Archiv für Gartenbau 37, S.423-432
- Paschold, P.-J.; Hundt, I. (1986):** Produktion von Spinat und Möhren mit reduziertem Nitratgehalt. Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, Heft 24, S.2-40

- Pate, J. S. (1973):** Uptake, assimilation and transport of nitrogen compounds by plants. *Soil Biology and Biochemistry* 5, S.109-119
- Pate, J.S.; Layzell, D.B.; McNeil, D.L. (1979):** Modelling the transport and utilisation of carbon and nitrogen in a nodulated legume. *Plant Physiology* 63, S.730-737
- Paul, J.L.; Carlson R.M. (1968):** Nitrate determination in plant extracts by the nitrate electrode. *Journal of agricultural food and chemistry* 16, S.766-768
- Peuke, A.D.; Kaiser, W.M. (1996):** Nitrate or ammonium uptake and transport, and rapid regulation of nitrate reduction in higher plants. *Progress in Botany* 57, S.93-113
- Pfeiffenschneider, Y. (1990):** Messungen zum Wasserhaushalt in wachsendem Möhrengewebe mittels Druckmess-Sonde unter dem Einfluss der Kaliumernährung. Dissertation, Bonn
- Phan, C.T.; Hsu, H. (1973):** Physical and chemical changes occurring in the carrot root during growth. *Canadian Journal of Plant Sciences* 53, S.629-634
- Pimpini, F.; Venter, F.; Wunsch, A. (1971):** Der Einfluss verschiedener Stickstoff-Formen und steigender Stickstoff-Mengen auf den Gehalt an Gesamt-Stickstoff und Nitrat in Blumenkohlpflanzen. *Gartenbauwissenschaften* 36, S.511-523
- Pitman, M.G. (1988):** Whole plants. Solute transport in plant cells and tissues. Baker, D. A.; Hall, J. L. (Hrsg.), Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex
- Pieters, J.H.; van der Boon, J. (1983):** N-Angebot aus Boden und Düngung - Nitrat in Spinat. Nitrat in Gemüse und Grundwasser. Fritz, D.; Lenz, F.; Venter, F.; Wendt, T.H. (Hrsg.), Universitätsdruckerei Bonn, S.88-93
- Prabhakar, M.; Srinavas, K.; Hedge, D.M. (1991):** Effect of irrigation regimes and nitrogen fertilization on growth, yield, N uptake and water use of carrot (*Daucus carota* L.). *Gartenbauwissenschaft* 56, S.206-209
- Räber, F.; Kocher, H.P. (1982):** Der Nitratgehalt von Karotten. *Gemüse* 18, S.156-158
- Räber, F.; Künsch, U.; Kocher, H.P. (1982):** Über den Einfluss des Erntezeitpunktes auf den Nitratgehalt von Karotten. *Industrielle Obst- und Gemüseverwertung* 67, S.5-9

- Raven, J.A. (1985):** Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: A cost-benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytologist* 101, S.25-77
- Reidenbach, G. (1997):** Bedeutung von Wurzelwachstum und Wurzelaktivität für die Nutzung des Nitratangebots des Bodens durch Mais (*Zea mays* L.). Ulrich E. Grauer, Stuttgart
- Robinson, D.; Rorison, I.H. (1983):** Relationships between root morphology and nitrogen availability in a recent theoretical model describing nitrogen uptake from soil. *Plant, Cell and Environment* 6, S.641-647
- Sawhney, S.K.; Naik, M.S. (1990):** Role of light in nitrate assimilation in higher plants. *Nitrogen in higher plants*. Abrol, Y. P. (Hrsg.), Research Studies Press, UK. S.93-128
- Schaer, T. (1989):** Einfluss der Temperatur im Gewächshaus auf den Gehalt an qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen von Kopfsalat und Kohlrabi. Dissertation, Hannover
- Scharpf, H.-C. (1991b):** Stickstoffdüngung im Gemüsebau. *AID*, 1223
- Scharpf, H.-C.; Baumgärtel, G. (1994):** Nitrat in Grundwasser und Nahrungspflanzen. *AID-Heft* 1136
- Scharrer, K.; Seibel, W. (1956):** Über den Einfluss der Ernährung und Belichtung auf den Nitratgehalt von Futterpflanzen. *Landwirtschaftliche Forschung* 9, S.168-178
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1998):** Lehrbuch der Bodenkunde. Enke, Stuttgart
- Schenk, M.K. (1996):** Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level. *Plant and Soil* 181, S.131-137
- Schrage, R. (1990):** Methoden zur Bestimmung des N-Düngerbedarfes von Gemüsekulturen mit geringem analytischem Aufwand. Dissertation, Hannover
- Schuphan, W. (1965):** Ertragsbildung und Erzeugung wertgebender Inhalts- und Schadstoffe in Abhängigkeit von der N- und P-Düngung. *Landwirtschaftliche Forschung Sonderheft* 19, S.195-205

- Schuphan, W.; Bengtson, B.; Bosund, I.; Hylmö, B. (1967):** Nitrate accumulation in spinach. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles* 14, S.317-330
- Shaner, D.L.; Boyer, J. S. (1976a):** Nitrate reductase activity in maize (*Zea mays* L.) leaves. II. Regulation by nitrate flux at low leaf water potential. *Plant Physiology* 58, S.505-509
- Shaner, D.L.; Boyer, J. S. (1976b):** Nitrate reductase activity in maize (*Zea mays* L.) leaves. I. Regulation by nitrate flux. *Plant Physiology* 58, S.499-504
- Sivasankar, S.; Oaks, A. (1996):** Nitrate assimilation in higher plants: The effects of metabolites and light. *Plant Physiology and Biochemistry* 34, S.609-620
- Smirnoff, N.; Stewart, G.R. (1985):** Nitrate assimilation and translocation by higher plants: Comparative physiology and ecological consequences. *Physiologia Plantarum* 64, S.133-140
- Smith, J.A.C. (1991):** Ion transport and the transpiration stream. *Botanica Acta* 104, S.416-421
- Sommer, C. (1978):** Eine Methode zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Vegetationsgefäßen nach dem Bodenwasserpotential. *Landbauforschung Völkenrode* 28, S.17-20
- Sommer, C.; Bramm, A. (1978):** Wasserverbrauch und Pflanzenwachstum bei Zuckerrüben in Abhängigkeit von der Wasserversorgung. *Landbauforschung Völkenrode* 28, S.151-158
- Sommer, C.; Tanasescu, O. (1981):** Weiterentwicklung der Methode zur kontinuierlichen Wasserversorgung von Versuchsgefäßen nach dem Bodenwasserpotential. *Landbauforschung Völkenrode* 31, S.59-61
- Sørensen, J.N.; Jorgensen, U.; Kuhn, B.F. (1997):** Drought effects on the marketable and nutritional quality of carrots. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 74, S.379-391
- Sprent, J.I.; Thomas, R.J. (1984):** Nitrogen nutrition of seedling grain legumes: some taxonomic, morphological and physiological constraints. *Plant, Cell and Environment* 7, S.637-645

- Sri Agung, I.G.A.M.; Blair, G.J. (1989):** Effects of soil bulk density and water regime on carrot yield harvested at different growth stages. *Journal of Horticultural Science* 64, S.17-25
- Srivastava, H, S. (1980):** Regulation of nitrate reductase activity in higher plants. *Phytochemistry* 19, S.725-733
- Steingröver, E. (1983):** Nitrate accumulation in spinach. Dissertation
Rijksuniversiteit Groningen, Niederlande
- Steingröver, E. (1986):** Storage of osmotically active compounds in the taproot of *Daucus carota* L. *Journal of Experimental Botany* 34, S.425-433
- Steingröver, E.; Oosterhuis, R.; Wieringa, F. (1982):** Effect of light treatment on nitrate accumulation in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie* 107, S.97-102
- Steingröver, E.; Woldendorp, J.; Sijtsma, I. (1986c):** Nitrate accumulation and its relation to leaf elongation in spinach leaves. *Journal of Experimental Botany* 37, S.1093-1102
- Steingröver, E.; Siesling, J.; Ratering, P. (1986a):** Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity. *Physiologia Plantarum* 66, S.550-556
- Steingröver, E.; Siesling, J.; Ratering, P. (1986b):** Effect of one night with 'low light' on uptake, reduction and storage of nitrate in spinach. *Physiologia Plantarum* 66, S.557-562
- Tannenbaum, S. R.; Sinskey, A.J.; Weisman, M.; Bishop, W. (1974):** Nitrite in human saliva. Its possible relationship to nitrosamine formation. *Journal of the National Cancer Institute* 53, S.79-84
- Tanner, W.; Beevers, H. (1990):** Does transpiration have an essential function in long-distance ion transport in plants? *Plant, Cell and Environment* 13, S.745-750
- Temperli, A. (1983):** Die Bestimmung von Nitrat in Frischgemüse. Nitrat in Gemüse und Grundwasser. Fritz, D.; Lenz, F.; Venter, F.; Wendt, T. H. (Hrsg.), Universitätsdruckerei Bonn

- Temperli, A.; Künsch, U.; Schärer, H.; Konrad, P.; Suter, H.; Ott, P.; Eichenberger, M.; Schmid, O. (1983):** Einfluss zweier Anbauweisen auf Nitrat im Kopfsalat. *Gemüse* 19, S.348-350
- Tennant, D. (1975):** A test of modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63, S.995-1001
- Thorogood, M. (1995):** Vegetarianism and health. *Nutritional Research Review* 8, S.179-183
- Tukey, H.B. (1970):** The leaching of substances from plants. *Annual Review of Plant Physiology* 21, S.305-324
- Veen, B.W.; Kleinendorst, A. (1985):** Nitrate accumulation and osmotic regulation in italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). *Journal of Experimental Botany* 36, S.211-218
- Venter, F. (1978):** Untersuchungen über den Nitratgehalt in Gemüse. *Der Stickstoff* 12, S.31-38
- Venter, F. (1979):** Nitrate contents in carrots (*Daucus carota* L.) as influenced by fertilization. *Acta Horticulturae* 93, S.163-172
- Venter, F. (1984):** Nitrat in der Möhre. *Industrielle Obst- und Gemüseverwertung* 69, S.122-123
- Venter, F.; Fritz, P.D. (1978):** Nitrate contents of kohlrabi (*Brassica oleracea* L. var. *Gongylodes* Lam.) as influenced by fertilization. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles* 28, S.179-186
- Vogel, G. (1986):** Handbuch des speziellen Gemüsebaus. Eugen Ulmer, Stuttgart
- Vulsteke, G.; Biston, R. (1978):** Factors affecting Nitrate Content in field grown Vegetables. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles* 28, S.71-87
- Vuylstekker, C., Huss, B.; Rambour, S. (1997):** Nitrate reductase activity in chicory roots following excision. *Journal of Experimental Botany* 48, S.59-65
- Walker, R. (1997):** The metabolism of dietary nitrates and nitrites. Managing risks of nitrates to humans and the environment., Wilson, W.S.; Ball, A.S.; Hinton, R.H. (Hrsg.), Royal Society of Chemistry, Cambridge. S.250-258

- Wedler, A. (1980):** Untersuchungen über Nitratgehalte in einigen ausgewählten Gemüsearten. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 36. S.128-137
- Wedler, A. (1985):** Nitratgehalt pflanzlicher Nahrungsmittel - Variation durch Anbau und Standort. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 41. S.266-277
- Wehrmann, J.; Hähndel, R. (1984):** Relationship between N- and Cl-nutrition and NO₃⁻-content of vegetables. VIth Intern. colloquium for the optimization of plant nutrition, Montpellier. Proceedings Volume 2, S.109-127
- Wehrmann, J.; Scharpf, H.C. (1988):** Nitrat in Grundwasser und Nahrungspflanzen. AID-Heft 1136
- Weier, U. (1991a):** Stickstoffaufnahme und Frischmasseproduktion bei Möhren. Versuche im deutschen Gartenbau, S.109
- Weier, U. (1991b):** N-Sollwert für Möhren unter 100 kg N/ha in 0-60 cm. S.110. Versuche im deutschen Gartenbau,
- Wiebe, H.-J. (1987a):** Effects of plant densities and nitrogen supply on yield harvest date and quality of carrots. Acta Horticulturae 198, S.191-198
- Wiebe, H.-J. (1987b):** Einfluss der Tageslänge auf Entwicklung, Wachstum und Nitratgehalt von Spinatsorten. Gartenbauwissenschaft 52, S.103-108
- Wiebe, H.-J.; Behr, U. (1987):** Nitratverteilung in wichtigen Gemüsearten. AID-Verbraucherdienst, Heft 32. S.135-138
- Wiebe, H.-J.; Lorenz, H.-P. (1982):** Temperaturführung bei Kopfsalat im Gewächshaus. Deutscher Gartenbau 36, S.146-148
- Wiesler, F. Horst, W.J. (1992):** Differences between maize cultivars in yield formation, nitrogen uptake and associated depletion of nitrate. Journal of Agronomy and Crop Science 168, S.226-237
- Wiesler, F. (1991):** Sortentypische Unterschiede im Wurzelwachstum und in der Nutzung des Nitratangebotes des Bodens bei Mais. Ulrich E. Grauer, Wendlingen
- Wiesler, F.; Horst, W.J. (1994):** Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. Plant Soil 163, S.267-277

Wright, M.J.; Davison, K.L. (1964): Nitrate Accumulation in Crops and Nitrate Poisoning in Animals. *Advanced Agronomy* 16, S.197-242

Wyse, R.E. (1979): Parameters controlling sucrose content and yield of sugarbeets roots. *Journal of American Society of Sugar Beet Technology* 20, S.368-385

Zhen, R.-G.; Koyro, H.-W.; Leigh, R.A.; Tomos, A.D.; Miller, A.J. (1991): Compartmental nitrate concentrations in barley root cells measured with nitrate-selective microelectrodes and by single-cell sap sampling. *Planta* 185, S.356-361

ZMP (Hrsg.) (2001): Bilanz 2000, „Gemüse“

Zurhake, F. (1983): Einfluss von Umweltfaktoren auf den Nitratgehalt von Gemüse. Nitrat in Gemüse und Grundwasser, Vortragstexte. Fritz, D.; Lenz, F.; Venter, F.; Wendt, T. H. (Hrsg.), Universitätsdruckerei Bonn. S.118-123

Lebenslauf

Name	Maria-Theresia Bernhold
Geburtstag	4.1.1965
Familienstand	verheiratet, zwei Kinder
1971 - 1975	Grundschule, Oldenburg
1975 - 1984	Gymnasium Eversten, Oldenburg Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
1984 - 1986	Ausbildung zur Gärtnerin Gärtnerei Tuinmann, Oldenburg
1986 - 1991	Studium der Gartenbauwissenschaften, Universität Hannover Abschluss: Diplom-Agraringenieurin
1991 - 1995	Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut für Gemüsebau, Universität Hannover

Curriculum Vitae

Name	Maria-Theresia Bernhold
Date of birth	4.1.1965
Marital status	Married, two children
1971 - 1975	Primary school, Oldenburg
1975 - 1984	Gymnasium Eversten, Oldenburg (high school) Abitur (university entrance qualification)
1984 - 1986	Apprenticeship as horticulturist Gärtnerei Tuinmann, Oldenburg
1986 - 1991	Study of horticulture, University of Hannover Graduation: Diplom-Agraringenieurin
1991 - 1995	Research assistant Institute of vegetables production, University of Hannover

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H.-J. Wiebe für seine Anregungen, Diskussionsbereitschaft, Geduld und Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr. H.-C. Scharpf, Frau C. Moje, Herrn Dr. B. Gutezeit und Frau Dr. C. Scheunemann danke ich für die gute Zusammenarbeit, das Interesse und die Unterstützung, mit denen sie den Verlauf unseres gemeinsamen Projektes begleitet haben.

Für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und große Hilfsbereitschaft möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Gemüsebau, insbesondere bei Frau M. Lehmann und Herrn H.-B. Rose, herzlich bedanken.

Den Mitarbeitern des Institutes für Botanik der Tierärztlichen Hochschule Hannover danke ich für die Unterstützung bei der Arbeit an der Druckmesssonde, besonders aber Herrn Dr. H.-W. Koyro und Herrn Dr. B. Hein, die mit großem Interesse und vielen Ideen diesen Teil meiner Arbeit begleitet haben.

Dem Institutes für Tierphysiologie der Tierärztlichen Hochschule Hannover danke ich für die Bereitstellung des Fluoreszenzanalytiksystem und der Mikrokapillarenschmiede.

Herzlich danke ich Frau Dr. B. Hahn, Herrn Dr. A. Ulbrich, Heike und Dr. Werner Ulrich und Margit Munz.

Meinen Eltern, Asger, Anne und Birger danke ich für die große Unterstützung und die Geduld in den letzten Jahren.

Die vorliegende Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.