

Aromarelevante Inhaltsstoffe in Früchten der Erdbeere (*Fragaria x ananassa* Duch.) in Abhängigkeit von der Ernährung

DANIELA NAUJOKS



DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades der
Agrarwissenschaften im Fachbereich 09
Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie
und Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Giessen



edition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors
oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für
Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen
und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch
elektronische Systeme.

1. Auflage 2009

All rights reserved. No part of this publication may be
reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted,
in any form or by any means, electronic, mechanical,
photocopying, recording, or otherwise, without the prior
written permission of the Author or the Publishers.

1st Edition 2009

© 2009 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus-Liebig-Universität Giessen
Prof. Dr. Sven Schubert

Aromarelevante Inhaltsstoffe in Früchten der
Erdbeere (*Fragaria x ananassa* Duch.)
in Abhängigkeit von der Ernährung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften
im Fachbereich 09
Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement
der Justus-Liebig-Universität Giessen

vorgelegt von

Daniela Naujoks

2009

Tag der Disputation: 13. Juli 2009

Bestätigt durch die Prüfungskommission

Vorsitzender: Prof. Dr. Steffen Hoy

1. Gutachter: Prof. Dr. Sven Schubert

2. Gutachter: Prof. Dr. Bernd Honermeier

Prüfer: Prof. Dr. Diedrich Steffens

Prüfer: Prof. Dr. Günter Leithold

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Die Erdbeere.....	1
1.2	Bedeutung für den Anbau.....	2
1.3	Qualitätsaspekte und Problemstellung.....	3
2	MATERIAL UND METHODEN.....	7
2.1	Pflanzenmaterial.....	7
2.2	Inkulturnahme der Erdbeerfrühpflanzen.....	7
2.3	Wasserkulturversuche.....	8
2.3.1	Wasserkulturversuch I.....	8
2.3.1.1	Kulturdaten.....	8
2.3.1.2	Chronologischer Versuchsablauf.....	10
2.3.2	Wasserkulturversuch II.....	11
2.3.2.1	Kulturdaten.....	11
2.3.2.2	Chronologischer Versuchsablauf.....	13
2.3.3	Wasserkulturversuch III.....	14
2.3.3.1	Kulturdaten.....	14
2.3.3.2	Chronologischer Versuchsablauf.....	15
2.4	Bodenkulturversuche.....	16
2.4.1	Bodenkulturversuch I.....	16
2.4.1.1	Eigenschaften der verwendeten Stickstoffdünger.....	17
2.4.1.2	Chronologischer Versuchsablauf.....	18
2.4.1.3	Bodenkulturversuch II.....	19
2.4.1.4	Eigenschaften der verwendeten Stickstoffdünger.....	19
2.4.1.5	Chronologischer Versuchsablauf.....	21
2.5	Ernteablauf und Verarbeitung.....	22
2.6	Chemische Analysen des Sprosses und der Wurzel.....	22
2.6.1	Bestimmung von K, Ca, Mg und Na mittels Atom-Absorptions-Spektralphotometrie.....	22

2.6.2	Bestimmung der Mikronährstoffe Cu, Fe, Mn und Zn mittels Atom-Absorptions-Spektralphotometrie	23
2.6.3	Alkalität der pflanzlichen Asche.....	24
2.6.4	Bestimmung des Stickstoffs nach Kjeldahl.....	24
2.6.5	Bestimmung von Nitrat, Sulfat, Phosphat und Chlorid mittels Ionenchromatographie	25
2.7	Bodenanalysen	26
2.7.1	Aufbereitung der Bodenproben	26
2.7.2	pH-Wert des Bodens	26
2.8	Analyse der Früchte.....	26
2.8.1	Zuckerbestimmung.....	26
2.8.2	Bestimmung der titrierbaren Säure.....	27
2.8.3	Bestimmung der Hauptsäuren mittels High Performance Liquid Chromatography (HPLC).....	28
2.8.4	Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten.....	29
2.9	Statistische Auswertung.....	30
3	ERGEBNISSE.....	31
3.1	Wasserkulturversuch I	31
3.1.1	Untersuchungen von Wurzel und Spross	31
3.1.1.1	Wurzeltrockenmasse und Wurzelmorphologie	31
3.1.1.2	Sprosstrockenmasse und Sprosshabitus	33
3.1.1.3	Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	34
3.1.1.4	Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross.....	35
3.1.2	Untersuchungen der Früchte.....	36
3.1.2.1	Fruchtfrischmasse.....	36
3.1.2.2	Zuckerkonzentrationen.....	37
3.1.2.3	Titrierbare Säure	38
3.1.2.4	Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten	39
3.2	Wasserkulturversuch II	40
3.2.1	Untersuchungen von Wurzel und Spross	40
3.2.1.1	Wurzeltrockenmasse und Trockensubstanzgehalt.....	40
3.2.1.2	Sprosstrockenmasse.....	42

3.2.1.3	Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	43
3.2.1.4	Kjeldahl-N im Spross.....	45
3.2.1.5	Anionenkonzentrationen in Wurzel, Spross und Früchten	46
3.2.1.6	Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross.....	47
3.2.1.7	Zuckerkonzentrationen im Spross	49
3.2.2	Untersuchungen der Früchte.....	50
3.2.2.1	Fruchtfrischmasse.....	50
3.2.2.2	Zuckerkonzentrationen in den Früchten.....	51
3.2.2.3	Titrierbare Säure	52
3.2.2.4	Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten	53
3.3	Wasserkulturversuch III	54
3.3.1	Untersuchungen von Wurzel und Spross	54
3.3.1.1	Wurzelrockenmasse und Wurzelrockensubstanzgehalt.....	54
3.3.1.2	Sprossrockenmasse und Trockensubstanzgehalt.....	55
3.3.1.3	Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	57
3.3.1.4	Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross.....	58
3.3.2	Untersuchungen der Früchte.....	60
3.3.2.1	Fruchtfrischmasse.....	60
3.3.2.2	Zuckerkonzentrationen.....	61
3.3.2.3	Titrierbare Säure	62
3.3.2.4	Hauptsäuren.....	63
3.3.2.5	Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten.....	64
3.4	Bodenkulturversuch I	65
3.4.1	Untersuchungen des Sprosses	65
3.4.1.1	Sprossrockenmasse.....	65
3.4.1.2	Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	67
3.4.1.3	Anionenkonzentrationen im Spross und in den Früchten.....	68
3.4.1.4	Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross.....	69
3.4.2	Ergebnisse der Bodenanalysen	70
3.4.2.1	pH-Wert des Bodens	70
3.4.3	Untersuchungen der Früchte.....	71
3.4.3.1	Fruchtfrischmasse.....	71
3.4.3.2	Zuckerkonzentrationen.....	72

3.4.3.3	Titrierbare Säure	73
3.4.3.4	Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten.....	74
3.5	Bodenkultur II.....	
3.5.1	Ergebnisse der Wurzel- und Sprossanalysen	75
3.5.1.1	Wurzeltrockenmasse und Trockensubstanzgehalte.....	75
3.5.1.2	Sprosstrockenmasse.....	77
3.5.1.3	Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	78
3.5.1.4	Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross.....	80
3.5.2	Bodenanalysen	82
3.5.2.1	pH-Wert im Boden.....	82
3.5.2.2	Beziehung zwischen pH-Wert des Bodens und Mn-Konzentratione im Spross	83
3.5.3	Untersuchungen der Früchte.....	84
3.5.3.1	Fruchtfrischmasse.....	84
3.5.3.2	Zuckerkonzentrationen.....	85
3.5.3.3	Titrierbare Säure	87
3.5.3.4	Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten	88
4	DISKUSSION	89
4.1	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Wurzeln der Erdbeerpflanzen	90
4.2	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf den Spross der Erdbeerpflanzen..	92
4.3	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Kationenkonzentrationen im Spross.....	94
4.4	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Mikronährstoffkonzentrationen im Spross	96
4.5	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross	97
4.6	Einfluss der NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf den Ertrag der Erdbeerfrüchte ...	99
4.7	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Zuckerkonzentrationen in Erdbeerfrüchten	100

4.8	Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Konzentration organischer Säuren in Erdbeerfrüchten	102
5	ZUSAMMENFASSUNG	107
6	SUMMARY	110
7	LITERATUR	112

1 Einleitung

1.1 Die Erdbeere

Die Kulturform der Erdbeere *Fragaria x ananassa* ist beliebt wegen ihres vorzüglichen Geschmacks und gehört weltweit zur Ernährung der Menschen. Die in Europa heimische Walderdbeere (*Fragaria vesca*) hat für den Erdbeeranbau jedoch kaum Bedeutung. Die für den Anbau wichtige Erdbeere *Fragaria x ananassa* ist durch Kreuzung der Chile-Erdbeere (*Fragaria chiloensis*) mit der Scharlacherdbeere (*Fragaria virginiana*) entstanden. Diese Kreuzung trägt von ihren Eltern zwei positive Eigenschaften, die Großfrüchtigkeit der Chile-Erdbeere und die rote Farbe der Scharlacherdbeere in Kombination mit einem angenehmen Aroma. Diesem Hybriden entstammt eine Vielzahl von heute angebauten Kultursorten.

Erdbeeren der Gattung *Fragaria* gehören zur Familie der Rosengewächse (*Rosaceae*). Die krautigen Erdbeerpflanzen sind mehrjährig und besitzen einen Vegetationskegel, aus dem Blätter, Wurzeln und Blütenstände hervorgehen. Letztere sind umgewandelte Sprossachsen, die mit mehreren Blüten abschließen. Die Blüten bestehen in der Regel aus zehn Kelchblättern, fünf Blütenblättern, 20–30 Staubblättern und vielen Fruchtblättern. Die Früchte gehören zu den Sammelnussfrüchten. Das bedeutet, dass die Fruchtblätter sich zu kleinen Nüsschen entwickeln, den eigentlichen Früchten der Erdbeere. Sie sitzen nach der Blüte im stark vergrößerten Blütenboden, dem genießbaren Teil der Sammelnussfrucht (Hancock 1999). Der Blütenboden ist untergliedert in den weißlichen Zentralzylinder und die von Anthocyanen rot gefärbte Rinde. Die Nüsschen werden durch Leitbündel mit Nährstoffen versorgt. Beim Wachstum der Erdbeerfrucht wird differenziert in das Wachstum der Nüsschen und das Wachstum des Blütenbodens, wobei die Entwicklung der Nüsschen zuerst erfolgt. Nach dem Ausreifen der Nüsschen schwillt

der Blütenboden stark an, wodurch dann die Reifung der Früchte ausgelöst wird.

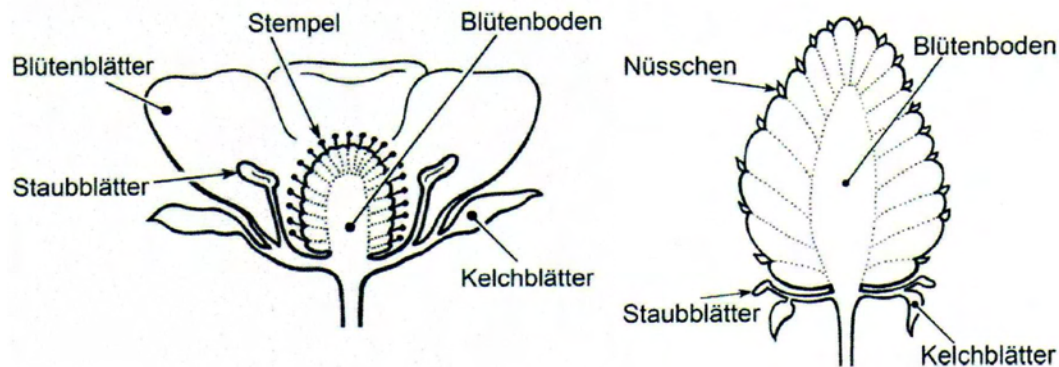


Abb. 1: Erdbeerblüte und Erdbeerfrucht (Hancock 1999)

Das maximale Gewicht erreichen die Früchte in reifem und rotem Zustand. Durch den geringen Gehalt an Chlorophyll ist die Frucht auf die Anlieferung von Assimilaten angewiesen, die aus den vegetativen Pflanzenteilen hauptsächlich in die Frucht und weniger in die Nüsschen transportiert werden (Perkins-Veazie 1995).

1.2 Bedeutung für den Anbau

Da Erdbeeren zu den beliebtesten Früchten in Europa zählen, konnte der Erdbeeranbau in Deutschland innerhalb der vergangenen Jahre kontinuierlich ausgeweitet werden. So wurde innerhalb der letzten 13 Jahre ein Zuwachs von 72% verzeichnet. Allerdings sind die Zukunftsaussichten für den Erwerbsanbau in Deutschland nicht uneingeschränkt positiv zu bewerten, denn die Konkurrenz ausländischer Erzeuger auf dem deutschen Markt ist sehr groß. Im Jahre 2007 kam es sogar zu einem Rückgang des Verbrauches an heimischen Erdbeeren um 4% bei einem zeitgleichen Anstieg des allgemeinen Erdbeerkonsums pro Haushalt

(Zentralverband Gartenbau 2008). Aus diesem Grund tritt für den Anbau von Erdbeeren die Erzeugung qualitativ hochwertiger Früchte immer mehr in den Vordergrund. Hierbei ist es besonders schwierig, die Merkmalsausprägung des Geschmacks, die sich aus der Konzentration an Zuckern und organischen Säuren zusammensetzt, zu bearbeiten (Sweeney et al. 1970, Perez et al. 1997, Keutgen und Pawelzik 2007). Die sensorische Qualität wird polygen vererbt und unterliegt dementsprechend komplizierten Vererbungsgesetzmäßigkeiten (Ulrich et al. 2006). Da es der Züchtung gelungen ist, einige leistungsfähige und schmackhafte Erdbeersorten hervorzubringen, ist es von großer Bedeutung, die genetischen Eigenschaften vorhandener Erdbeersorten durch optimale Anbautechniken zur vollen Entfaltung zu bringen.

1.3 Qualitätsaspekte und Problemstellung

Die Qualität von Nahrungspflanzen lässt sich auf vielfältige Weise beeinflussen, wobei der Stickstoffdüngung eine besondere Bedeutung zukommt. Stickstoff (N) zählt zu den Hauptnährstoffen der Pflanze und ist Strukturbaustein der Amino- und Nukleinsäuren, der Proteine, des Chlorophylls sowie verschiedener sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe. Er ist der einzige Pflanzennährstoff, der als Anion (NO_3^-) und als Kation (NH_4^+) von den Pflanzen aufgenommen werden kann (Mengel und Pilebeam 1992). Die Form des N hat Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Pflanze, den Stoffwechsel sowie auf den Kurz- und Langstreckentransport von Metaboliten (Mengel und Kirkby 2001). Als Hauptnährstoff beeinflusst N maßgeblich verschiedene physiologische Prozesse, welche die Qualität pflanzlicher Produkte bestimmen. Durch die Aufnahme unterschiedlicher N-Formen können große Mengen an H^+ oder OH^- in der Zelle produziert werden. Unterschiedliche intrazelluläre Prozesse werden hierdurch in Gang gesetzt, um diese überschüssigen

Ionen entweder zu neutralisieren oder aus der Zelle auszuscheiden. Wenn größere Mengen an H^+ oder OH^- in der Zelle produziert und nicht ausgeschieden werden, so wird der intrazelluläre pH-Wert durch Carboxylierungs- oder Decarboxylierungsreaktionen, dem so genannten biochemischen pH-Stat-Mechanismus, in engen physiologischen Grenzen gehalten. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Aufnahme von Ammonium-N (NH_4^+ -N) physiologisch versauernd und die Aufnahme von Nitrat-N (NO_3^- -N) physiologisch alkalisierend wirkt (Raven und Smith 1976). Dennoch schwankt der pH-Wert im Cytosol kaum. Dies ist sehr wichtig, da sonst die Aktivität der verschiedenen cytosolischen Enzyme beeinträchtigt wird. Für die Stabilisierung des pH-Wertes gibt es verschiedene Puffersysteme. Unsere besondere Aufmerksamkeit richtet sich in dieser Arbeit auf den biochemischen PEP-Malat-Puffer, der durch den Auf- und Abbau organischer Säuren den cytosolischen pH-Wert reguliert.

NH_4^+ -N wird passiv über die Wurzeln aufgenommen, dort assimiliert und in Form von Aminosäuren weiter in der Pflanze transportiert. Es werden verstärkt Kohlenstoff-Skelette für die Produktion von Aminosäuren zur N-Assimilation benötigt (Wiesler 1997). Hierbei werden vorwiegend Malat und Oxalacetat aus dem Tricarbonsäurezyklus verbraucht, wobei das Malatenzym durch NH_4^+ aktiviert wird (Pasqualini et al. 2001).

Die bei NH_4^+ -Ernährung verstärkte Protonen (H^+) -Abgabe in die Rhizosphäre über eine Plasmalemma-ATPase spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, wobei eine Limitierung durch einen extrem niedrigen pH-Wert und eine geringe Pufferkapazität des Nährmediums gegeben ist (Yan et al. 1992).

Im Gegensatz zu NH_4^+ -N erfolgt die Aufnahme von NO_3^- -N aktiv im Co-Transport mit zwei H^+ . Dies führt je nach Pflanzenart mehr oder weniger

zu einer Alkalisierung des Nährmediums. Auch durch die Reduktion von NO_3^- über Nitrit (NO_2^-) zu Ammoniak (NH_3) erfolgt eine Anreicherung von Hydroxylionen (OH^-) im Cytosol. Da NO_2^- nur als ungeladenes Molekül in Form von Salpetriger-Säure (HNO_2) die Chloroplastenmembran überwinden kann, bleibt OH^- im Cytosol zurück (Raven und Smith 1976, Mengel und Kirkby 2001). Die Anreicherung von OH^- erhöht die Carboxylierung von Phosphoenolpyruvat (PEP), indem das Enzym PEP-Carboxylase aktiviert wird. PEP, welches nur eine Carboxylgruppe besitzt, wird in Oxalacetat mit zwei Carboxylgruppen umgeformt. Oxalacetat kann dann weiter zu Malat reduziert werden. Malat wird bei hohen Konzentrationen in der Vakuole gespeichert oder, wenn es zu den Mitochondrien transportiert wird, über den Tricarbonsäurezyklus zu organischen Anionen wie Citrat, Isocitrat oder Succinat transformiert. Ein Anstieg der Konzentration an H^+ im Cytosol hingegen, wie er bei NH_4^+ -Ernährung erfolgt, führt dazu, dass das Malatenzym aktiviert und somit Malat mit zwei Carboxylgruppen zu Pyruvat decarboxyliert wird (Davies 1986).

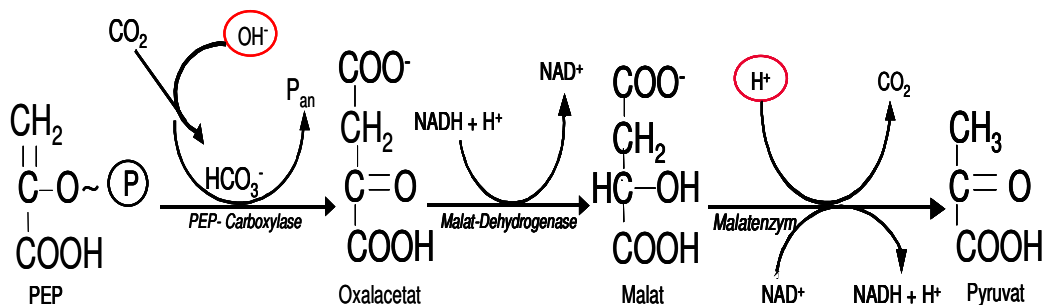


Abb. 2: PEP-Malat-Puffersystem nach Smith und Raven (1976) verändert

Nitrat-N kann in den Wurzeln und im Spross reduziert werden. Außerdem hat die Pflanze die Möglichkeit, NO_3^- in der Vakuole zu speichern und nur bei Bedarf zu assimilieren. In Pflanzen, die mit NO_3^- -N ernährt werden, kann es bei hohen NO_3^- -Konzentrationen im Nährmedium zu

einem Efflux von OH^- aus der Wurzel kommen (Van Beusichem et al. 1988). Dies führt zu einem Anstieg des pH-Wertes im Nährmedium.

Da die Konzentration an organischen Säuren die Geschmacksqualität der Erdbeerfrüchte beeinflusst, sind folgende Fragestellungen für diese Arbeit von Bedeutung:

1. Werden auch in Erdbeerpflanzen bei NO_3^- -Ernährung organische Säuren in den Wurzeln und im Spross angereichert?
2. Wird eine Anreicherung von organischen Säuren in den vegetativen Pflanzenteilen an die Früchte weitergegeben und kann dadurch der Geschmack der Erdbeerfrüchte, der für den Verbraucher entscheidend ist, beeinflusst werden?

2 Material und Methoden

2.1 Pflanzenmaterial

Für die Untersuchungen wurden Erdbeerfrigopflanzen (*Fragaria x ananassa* Duch cv. Elsanta) in A⁺-Qualität verwendet. Frigopflanzen sind die nach der Fruchternte von den Mutterpflanzen gebildeten Jungpflanzen, die frühestens im Dezember nach dem Eintreten der Winterruhe gerodet werden. Nach dem Putzen wird das Pflanzenmaterial in Kunststofftüten bei -2°C bis zur nächsten Pflanzperiode gelagert (Neumann und Seipp 1989). Sorteninhaber der Erdbeersorte Elsanta ist Plant Research International B.V. Wageningen/NL. Diese Sorte gilt, trotz hoher Empfindlichkeit für Krankheiten an Wurzel, Rhizom und an den Früchten, als Referenzsorte für viele Erdbeerneuzüchtungen. Sie bringt im Vergleich zu anderen Erdbeersorten hohe Erträge, mit großen, festen, mittelroten glänzenden Früchten. Der Geschmack ist gut, die Haltbarkeits- und Transporteigenschaften sind sehr gut.

2.2 Inkulturnahme der Erdbeerfrigopflanzen

Die gelieferten Frigopflanzen wurden gewaschen und die Wurzeln eingekürzt, so dass alle Versuchspflanzen die gleiche Wurzellänge hatten (Abb. 3). Für die Wasserkulturversuche wurden die vorbereiteten Pflanzen über Nacht in eine 1 mM Ca(SO₄)₂-Lösung gestellt und am nächsten Tag in schwarze 5 L-Kulturgefäße mit Styropordeckel eingesetzt, bei späteren Versuchen wurden 60 L-Kulturwannen mit Kunststoffdeckel verwendet. Innerhalb der folgenden zwei Wochen wurde die Nährlösung kontinuierlich von ¼ konzentriert auf die volle Konzentration gesteigert (Tab. 1). Alle Pflanzen bekamen NO₃⁻-N, bis sich die ersten Blütenspitzen im Vegetationskegel zeigten. Ab dann bekam ein Teil der Pflanzen nur noch NH₄⁺-N, die anderen Pflanzen erhielten weiterhin NO₃⁻-N. Die

Pflanzen der Wasserkulturversuche wurden dreimal wöchentlich randomisiert.

Bei den Bodenkulturversuchen wurden die Wurzeln der Frigopflanzen ebenfalls auf die gleiche Länge gekürzt. Danach wurden die Pflanzen mit entsprechend aufgedüngtem Boden (Tab. 6, Tab. 9) in Mitscherlichgefäße getopft. Die Variation begann hier schon mit dem Tag der Pflanzung. Die Bodenkulturversuche wurden einmal pro Woche randomisiert.



Abb. 3: Für die Wasserkulturversuche vorbereitete Erdbeerfrigopflanzen mit eingekürzten Wurzeln

2.3 Wasserkulturversuche

2.3.1 Wasserkulturversuch I

2.3.1.1 Kulturdaten

Die vorbereiteten Frigopflanzen wurden in 5 L-Wasserkulturgefäße mit Styropordeckel gesetzt und die Nährlösung (Tab. 1) kontinuierlich belüftet. Dieser Versuch fand in einem beheizten Gewächshaus mit Zusatzbelichtung statt. Als zusätzliche Lichtquelle wurden Hochdruck-Natriumdampf-Lampen Typ SON-T 400 W mit einer Strahlungsintensität von $45\,000\text{ mWm}^{-2}$ verwendet. Die Belichtungsdauer betrug bis zum Er-

scheinen der ersten Blütenknospen 12 h d^{-1} und wurde dann bis auf 16 h d^{-1} gesteigert.

Tab. 1: Nährstoffkonzentrationen in der Nährlösung

Makronährstoffe als:			Mikronährstoffe als:		
N	2,0 mM	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	B	10,0 μM	H_3BO_3
		oder als	Cl	10,0 μM	NaCl
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Mn	1,0 μM	MnSO_4
Ca	1,0 mM	CaSO_4	Zn	1,0 μM	ZnSO_4
K	2,0 mM	K_2SO_4	Cu	0,5 μM	CuSO_4
Mg	0,5 mM	MgSO_4	Mo	0,01 μM	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$
P	0,1 mM	KH_2PO_4	Fe	100,0 μM	Fe EDTA

In diesem Versuch wurde die Nährlösung täglich mit Natriumhydroxid (NaOH) auf pH-Werte zwischen 5,5 und 6,0 eingestellt. Ein Hauptproblem dieser Nährlösungskultur stellte die starke pH-Absenkung durch die Nettoprotonenabgabe der Wurzeln bei den mit NH_4^+ -N ernährten Pflanzen dar. Mit zunehmendem Alter und Größe der Pflanzen konnte trotz täglicher Titration eine starke Ansäuerung der Nährlösung auf Werte um pH 3,0 nicht verhindert werden. Aus diesem Grund wurden die folgenden Wasserkulturversuche in Kulturwannen mit pH-Stat-Anlagen zur Stabilisierung des pH-Wertes durchgeführt.

2.3.1.2 Chronologischer Versuchsablauf

Die gesamte Versuchsdauer betrug 96 Tage. Dieser Versuch wurde im Jahre 2005, vom 11. Februar bis zum 18. Mai (Tab. 2) durchgeführt.

Tab. 2: Chronologischer Versuchsablauf 2005

11. Februar	Frigopflanzen wurden in Wasserkulturgefäße mit Styropordeckel gepflanzt. Die Ernährung beider Varianten mit NO_3^- -N war noch gleich.
11. März	Die ersten Blütenknospen zeigten sich. Die Ernährung wurde variiert, das heißt, die Hälfte der Versuchspflanzen bekam ab jetzt Stickstoff in Form von NH_4^+ . Der pH-Wert wurde bei den mit NH_4^+ -N ernährten Pflanzen täglich mit NaOH auf Werte zwischen 5,5 und 6,0 eingestellt.
22. April bis 18. Mai	In diesem Zeitraum erfolgten sieben Fruchternten. Die Früchte wurden in flüssigem Stickstoff schockgefroren und dann gefriergetrocknet.
18. Mai	Wurzel und Spross wurden geerntet und im Trockenschrank bei 80 °C getrocknet.

2.3.2 Wasserkulturversuch II

2.3.2.1 Kulturdaten

Dieser Versuch sollte Erkenntnisse darüber bringen, ob die Ergebnisse der Analysen des Wasserkulturversuches I aufgrund des niedrigen pH-Wertes oder aufgrund von pH-Schwankungen in der Nährlösung zustande kamen. Die Durchführung erfolgte diesmal nicht im Gewächshaus, sondern in der Versuchsstation des Instituts. Die Aufteilung der Versuchsvarianten ist in Abb. 4 zu sehen, wobei für jede Variante drei Wiederholungen durchgeführt wurden.

Die erste NH_4^+ -N-Variante wurde wie im Wasserkulturversuch I, in 5 L-Kulturgefäßen angezogen und nur einmal täglich titriert. Hierbei waren die Pflanzen wieder einem extrem niedrigen pH-Wert und starken pH-Schwankungen ausgesetzt.

Die Pflanzen der zweiten NH_4^+ -N-Variante wurden in 60 L-Wannen kultiviert, da so die Möglichkeit zur pH-Stabilisierung mit pH-Stat-Anlagen (Fa. Schott) bei NH_4^+ -Ernährung bestand (Abb. 5). Bei der Einstellung des pH-Wertes war zu berücksichtigen, dass es aufgrund naturbedingter starker Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht nicht möglich war, den pH-Wert genau einzustellen. Er bewegte sich in einem Bereich um $5,5 \pm 0,5$. Um eine starke Temperaturerhöhung im Wurzelbereich zu vermeiden, wurden die Kulturwannen in spezielle Kühlwannen gestellt und bei hohen Außentemperaturen mit frischem Wasser gekühlt. Der pH-Wert der NO_3^- -Variante schwankte um $5,5 \pm 0,5$ und stieg auch nicht stärker an, da die Nährlösung dreimal in der Woche gewechselt wurde. Während der gesamten Vegetationsperiode wurde die Nährlösung belüftet und bei jedem Wechsel randomisiert.

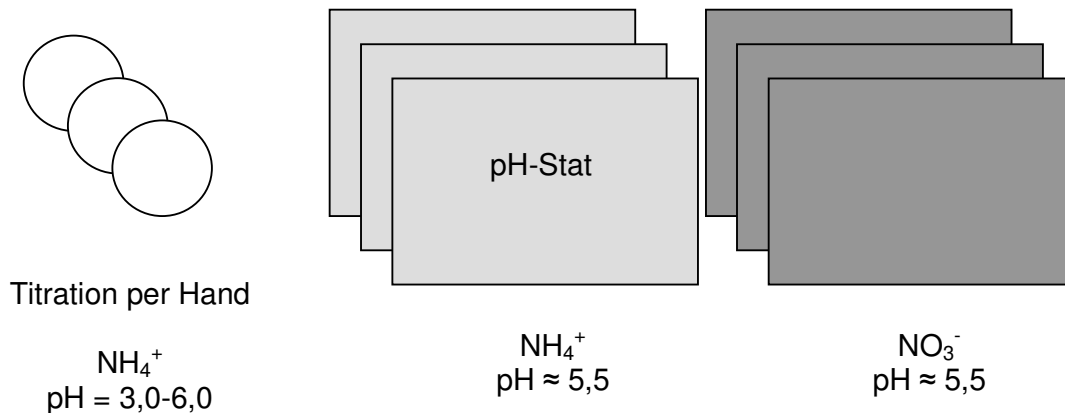


Abb. 4: Versuchsaufbau Wasserkulturversuch II

In Abb. 5 ist der Aufbau der NH_4^+ -Variante in Wasserkulturwannen zu sehen. Jede Pflanze wurde im Wurzelbereich über einen Belüftungsschlauch mit Sauerstoff versorgt. Auf diese Weise konnte eine ausreichende Umwälzung der Nährlösung sowie der titrierten Natronlauge gewährleistet werden. Der Titrierschlauch wurde direkt an die pH-Elektrode geklemmt, um ein Übertitrieren zu vermeiden.



Abb. 5: Anzuchtwanne mit Belüftungsschläuchen, pH-Stat-Anlage und pH-Elektrode mit Dosierspitze

2.3.2.2 Chronologischer Versuchsablauf

Dieser Versuch wurde im Jahre 2006 durchgeführt. Wie in Tab. 3 zu sehen ist, fand er vom 01. Mai bis 06. Juli statt, die Kulturdauer betrug 67 Tage.

Tab. 3: Chronologischer Versuchsablauf 2006

01. Mai	Pflanzung in $\frac{1}{4}$ konzentrierte Nährlösung (Tab. 1). Bei der Pflanzenanzucht wurden alle Pflanzen mit NO_3^- -N ernährt.
bis zum 12. Mai	Die Konzentration der Nährlösung wurde wie in den vorangegangenen Versuchen kontinuierlich gesteigert.
17. Mai	Die ersten Blüten zeigten sich, Beginn der Variation.
23. Mai	Die Pflanzen wurden gegen den Erdbeerblütenstecher (<i>Anthonomus rubi</i> Herbst) mit dem Pflanzenschutzmittel „Ambush“ gespritzt.
19. Juni – 05. Juli	In diesem Zeitraum erfolgten sieben Fruchternten.
06. Juli	Ernte von Spross und Wurzel.

2.3.3 Wasserkulturversuch III

2.3.3.1 Kulturdaten

Dieser Versuch fand ebenfalls in der Vegetationshalle statt. Diesmal wurde bei beiden NH_4^+ -Varianten mit pH-Stat-Anlagen gearbeitet, um die durch tägliche Titration entstandenen pH-Schwankungen zu vermeiden. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6 dargestellt.

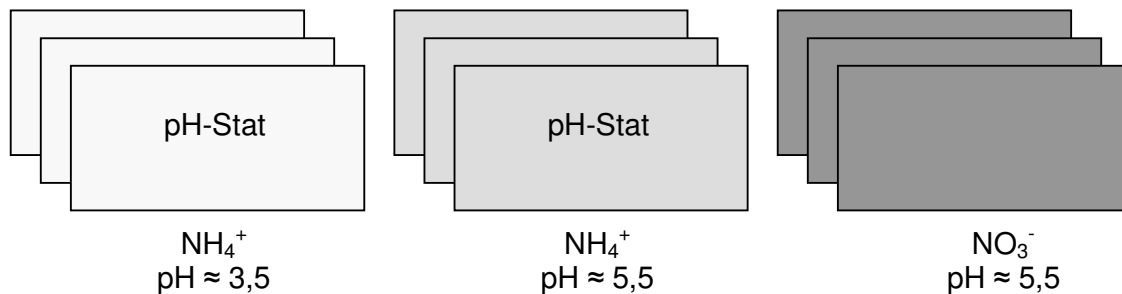


Abb. 6: Versuchsaufbau Wasserkulturversuch III

Wie im Wasserkulturversuch II wurden die Kulturwannen mit den Pflanzen in spezielle Kühlwannen gestellt (Abb. 7), um bei großer Hitze den Wurzelbereich der Pflanzen mit Wasser kühlen zu können. Auch in diesem Versuch ist zu beachten, dass der pH-Wert mit den pH-Stat-Anlagen durch Temperaturschwankungen nicht genau einzustellen war und in der Nährlösung um $\pm 0,5$ pH-Einheiten schwankte. Der pH-Wert in der Nährlösung der NO_3^- -Variante bewegte sich mit Schwankungen ebenfalls um den Wert 5,5.



Abb. 7: Erdbeerpflanzen in Kulturwannen, umgeben von Kühlwannen mit pH-Stat-Anlage sowie reifen Früchten nach sechs Wochen Kulturdauer

2.3.3.2 Chronologischer Versuchsablauf

Wie Tab. 4 zu entnehmen ist, fand dieser Versuch vom 02. Mai bis 18. Juni 2007 statt und dauerte 48 Tage.

Tab. 4: Chronologischer Versuchsablauf 2007

02. Mai	Pflanzung der Frigopflanzen in $\frac{1}{4}$ konzentrierter Nährlösung. Bei der Pflanzenanzucht wurden alle Pflanzen mit NO_3^- -N ernährt.
bis zum 14. Mai	Die Konzentration der Nährlösung wurde langsam gesteigert, bis nach 12 Tagen die volle Konzentration erreicht war. Die Erdbeeren wurden mit dem Spritzmittel „Ambush“ gegen den Erdbeerblütenstecher (<i>Anthonomus rubi</i> Herbst) gespritzt.
22. Mai	Die ersten Blütenanlagen zeigten sich, Beginn der Variation.
12.–18. Juni	In diesem Zeitraum erfolgten fünf Fruchternten.
18. Juni	Ernte von Spross und Wurzel.

2.4 Bodenkulturversuche

Es wurden zwei Bodenkulturversuche in kleinen Mitscherlichgefäßen (Abb. 8) angelegt. In diesen Versuchen sollte geklärt werden, ob sich die Ergebnisse der Wasserkulturversuche auch auf den Anbau von Erdbeeren in Bodenkultur übertragen lassen.



Abb. 8: Bodenkulturversuch in kleinen Mitscherlichgefäßen nach sieben Wochen Kulturdauer

2.4.1 Bodenkulturversuch I

Bei diesem Versuch wurden vier verschiedene N-Dünger verwendet. In der ersten Variante wurde Ammoniumsulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) gedüngt. Zwei Varianten bekamen NH_4^+ -betonte Dünger, die neben NH_4^+ -N auch den NH_4^+ -Stabilisator 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP), eine Substanz welche die Nitrifikation, d.h. die Oxidation von NH_4^+ zu NO_3^- hemmt, enthielten. Dies wird erzielt, indem DMPP die Aktivität der für diesen Prozess verantwortlichen Bodenbakterien (Nitrosomonas) hemmt (Amberger 1986, Barber et al. 1992). Bei den verwendeten Düngern handelte es sich um $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{DMPP}$ und Entec 26. Entec 26 enthält neben NH_4^+ -N + DMPP auch einen geringen Anteil an NO_3^- -N. Die vierte Variante wurde mit NO_3^- -N in Form von $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ gedüngt (Tab. 5).

Tab. 5: N-Variationen

1,92 g N Gefäß ⁻¹	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{DMPP}$ Entec 26 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (wurde gelöst verabreicht)
------------------------------	---

2.4.1.1 Eigenschaften der verwendeten Stickstoffdünger

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: Mischernährung durch schnelle Nitrifikation, wobei hier von einer erhöhten Aufnahme von NO_3^- -N ausgegangen werden kann.

$(\text{NH}_2)_2\text{SO}_4 + \text{DMPP}$: Durch den NH_4^+ -Stabilisator erfolgt hier eine ammoniumbetonte Ernährung der Pflanzen.

Entec 26: Gesamt N = 26%, davon 7,5% NO_3^- -N und 18,5% NH_4^+ -N mit DMPP. Hier erfolgte eine ammoniumbetonte Mischernährung.

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: Da durch die Kultivierung in Mitscherlichgefäßen keine Auswaschungsverluste zu erwarten waren, sollte das verabreichte N hier vollständig in NO_3^- -Form den Pflanzen zur Verfügung stehen. Die Kulturbedingungen und zusätzliche Düngegaben sind Tab. 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Kulturbedingungen

Gefäßtyp	Kleine Mitscherlichgefäße
Pflanzmaterial	Frigopflanzen
Standort	Freiland, doch wurden die Pflanzen nachts oder bei starkem Regen in eine Vegetationshalle gefahren.
Substrat	6 kg Boden Gefäß ⁻¹ (Kleinlinden 2003), 60% Wasserhaltekapazität
Grunddüngung Gefäß ⁻¹	P: 4,64 g als CaHPO_4 K: 5,00 g als K_2SO_4 Mg: 1,62 g als MgSO_4

Tab. 7: Eigenschaften des Versuchsbodens Kleinlinden 2003

pH-Wert (CaCl ₂)	5,8
Ton	20,7%
Schluff	45,5%
Sand	33,8%
N _t	0,042%
C _t	0,237%
S _t	0,005%
Kalium (CAL)	49,05 mg kg ⁻¹
Phosphor (CAL)	9,03 mg kg ⁻¹
Magnesium (CAL)	244,00 mg kg ⁻¹
Kupfer (DTPA)	0,86 mg kg ⁻¹
Mangan (DTPA)	13,58 mg kg ⁻¹
Eisen (DTPA)	35,22 mg kg ⁻¹
Zink (DTPA)	0,58 mg kg ⁻¹

2.4.1.2 Chronologischer Versuchsablauf

Dieser Versuch fand vom 28. April bis 11. Juli 2006 statt und dauerte 95 Tage (Tab. 8).

Tab. 8: Chronologischer Versuchsablauf 2006

28. April	Pflanzung der Frigopflanzen.
14. Mai	Die ersten Blütenknospen erschienen im Vegetationskegel.
23. Mai	Alle Pflanzen standen in voller Blüte, Ansetzen der ersten Früchte.
ab 07. Juni	Die Pflanzen blieben Tag und Nacht im Freien
26. Juni bis 11. Juli	In diesem Zeitraum fanden vier Fruchternten statt.
14. Juli	Sprossernte

2.4.1.3 Bodenkulturversuch II

Dieser Versuch ist eine Wiederholung des Bodenkulturversuches I zur Überprüfung der ermittelten Untersuchungsergebnisse. Da nicht mehr genügend Kleinlindener Boden 2003 vorhanden war, musste auf einen Boden aus dem Jahr 2005 (Tab. 10) zurückgegriffen werden. Dieser Versuch fand unter ähnlichen Kulturbedingungen wie der erste Bodenkulturversuch statt, doch wurden zusätzlich zur Grunddüngung noch Mikronährstoffe gegeben (Tab. 9), um einen Mangel auszuschließen. Auf eine Variante mit reinem $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ wurde hier verzichtet und stattdessen NH_4NO_3 -Dünger zur Mischernährung gegeben. Neben der Art der Düngemittel wurden noch die Konzentrationen an N Gefäß⁻¹ variiert.

Variation der N-Dünger

- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + DMPP
- Entec 26
- NH_4NO_3
- $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (gelöst verabreicht)

Variation der N-Menge Gefäß⁻¹

- 0,16 g N Gefäß⁻¹
- 0,50 g N Gefäß⁻¹
- 1,92 g N Gefäß⁻¹

2.4.1.4 Eigenschaften der verwendeten Stickstoffdünger

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + DMPP: Durch den NH_4^+ -Stabilisator sollte eine ammoniumbetonte Ernährung der Pflanzen erfolgen.

Entec 26: Gesamt N = 26%, davon 7,5% NO_3^- -N und 18,5% NH_4^+ -N mit DMPP. Hier erfolgte eine ammoniumbetonte Mischernährung.

NH₄NO₃: Da bei dieser N-Ernährung zu erwarten ist, dass ein Teil des NH₄⁺ durch Bodenbakterien nitrifiziert wird, kann bei dieser Variante von einer NO₃⁻ betonten Mischernährung der Pflanzen ausgegangen werden.

Ca(NO₃)₂: Da durch die Kultivierung in Mitscherlichgefäßen keine Auswaschungsverluste zu erwarten waren, sollte das verabreichte N hier vollständig in NO₃⁻-Form den Pflanzen zur Verfügung stehen.

Tab. 9: Kulturbedingungen

Gefäßtyp	Kleine Mitscherlichgefäße
Pflanzmaterial	Frigopflanzen
Standort	Die Pflanzen befanden sich während der gesamten Kulturzeit in der Vegetationshalle.
Substrat	6 kg Boden Gefäß ⁻¹ (Kleinlinden 2005), 60% Wasserhaltekapazität
Grunddüngung Gefäß ⁻¹	P: 4,64 g als CaHPO ₄ K: 5,00 g als K ₂ SO ₄ Mg: 1,62 g als MgSO ₄
Mikronährstoffe Gefäß ⁻¹	Cu 5 mg Zn 20 mg B 6 mg Mn 10 mg Mo 0,26 mg

Tab. 10: Eigenschaften des Versuchsbodens Kleinlinden 2005

pH-Wert (CaCl ₂)	6,0
Ton	20,7%
Schluff	46,8%
Sand	32,7%
N _t	0,053%
C _t	0,404%
S _t	0,013%
Kalium (CAL)	43,14 mg kg ⁻¹
Phosphor (CAL)	11,30 mg kg ⁻¹
Magnesium (CAL)	223,60 mg kg ⁻¹
Kupfer (DTPA)	1,51 mg kg ⁻¹
Mangan (DTPA)	24,30 mg kg ⁻¹
Eisen (DTPA)	61,00 mg kg ⁻¹
Zink (DTPA)	0,99 mg kg ⁻¹

2.4.1.5 Chronologischer Versuchsablauf

Dieser Versuch fand vom 17. Juni bis 14. August statt und dauerte 60 Tage (Tab. 11).

Tab. 11: Chronologischer Versuchsablauf

15. Juni	Pflanzung der Frigopflanzen.
22. Juni	Erscheinen der ersten Blütenknospen.
05. Juli	Alle Pflanzen standen in voller Blüte, Ansetzen der ersten Früchte.
26. Juli bis 12. Aug.	In diesem Zeitraum wurden die Früchte an neun Terminen geerntet.
14. Aug.	Sprossernte

2.5 Ernteablauf und Verarbeitung

Die Früchte wurden ohne Kelchblätter geerntet und gewogen. Bei Erdbeerfrüchten ist besonders zu beachten, dass es sich um nichtklimaktere Früchte handelt, die nach der Ernte nicht mehr reifen (Abeles und Teke-da 1990, Mitcham 1996). Alle in diesem Versuch geernteten Erdbeerfrüchte hatten eine sortentypische rote Farbe und wiesen keine hellen Stellen auf. Nach kurzfristiger Lagerung bei -25°C wurden die Früchte bis zur Gewichtskonstanz bei -60°C gefriergetrocknet und danach gemahlen. Das aufbereitete Material konnte so bis zur Analyse bei -25°C luftdicht gelagert werden. Nachdem alle Erdbeerfrüchte geerntet waren, wurde der Spross abgeschnitten und gewogen. Die Wurzeln wurden mit 10 mM $\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ -Lösung und dann mit destilliertem Wasser ausgespült, um anhaftende Nährlösung zu entfernen und ebenfalls gewogen. Danach trockneten Wurzel und Spross im Trockenschrank bei 80°C bis zur Gewichtskonstanz. Nach dem Zurückwiegen wurde die Pflanzenmasse ebenfalls gemahlen.

2.6 Chemische Analysen des Sprosses und der Wurzel

2.6.1 Bestimmung von K, Ca, Mg und Na mittels Atom-Absorptions-Spektralphotometrie

Die Mineralstoffkonzentrationen im Spross geben den Ernährungszustand der Pflanzen zum Zeitpunkt der Gesamternte, d. h. der Ernte der restlichen Früchte sowie der Ernte von Spross und Wurzel wieder. Bei einem Vergleich mit den Grenzwerten nach Bergmann (Bergmann 1993) sollte berücksichtigt werden, dass diese Angaben sich auf voll entwickelte Blätter zur Blüte, aus der Mittelregion der Pflanze, beziehen.

Die Kationenbestimmung erfolgte nach Trockenveraschung am Atom-Absorptions-Spektrometer (AAS) Spectra AA 220FS der Firma Varian. Von dem zu untersuchenden Trockenmaterial wurden 500 mg im Muffel-

ofen (Heraeus) bei 550 °C trocken verascht. Der Verbrennungsrückstand wurde mit 2 mL bidestilliertem Wasser und 2,5 mL 0,25 M Salpetersäure zum Lösen der Carbonate aufgekocht und mit heißem bidestilliertem Wasser über einen Weißbandfilter in einen 50 mL-Messkolben aufgenommen und nach dem Abkühlen bis zur Eichmarke aufgefüllt. Unter Zugabe einer 2%igen Cäsiumchlorid-Lanthanchlorid-Lösung, um die Bildung von störenden Mg- und Ca-Phosphaten zu verhindern, konnten die zu bestimmenden Kationen analysiert werden. Dazu wurde die Analysenlösung in eine Acetylen-Luftflamme (Flammenband) eingesprüht, wodurch die Salze thermisch dissoziieren und die Elemente angeregt werden. Zusätzlich wurde das Flammenband mit elementspezifischem Licht durchstrahlt, wobei die Atome Licht derjenigen Wellenlänge absorbieren, das sie auch emittieren können. Aus der Lichtabsorption wurden über eine Kalibrierkurve die Konzentrationen der einzelnen Kationen ermittelt.

2.6.2 Bestimmung der Mikronährstoffe Cu, Fe, Mn und Zn mittels

Atom-Absorptions-Spektralphotometrie

Der Probenaufschluss erfolgte mittels Nassveraschung nach Rosopulo et al. (1975). Dazu wurden 500 mg gemahlene Trockenmaterial in Veraschungsröhren eingewogen und mit je 1 mL Trichlorethylen (C_2HCl_3) zur Vermeidung des Aufschäumens und 10 mL Veraschungsgemisch (Salpetersäure, Perchlorsäure und Schwefelsäure) versetzt. Zur Veraschung wurden die Glasröhren in einen Aluminiumblock gestellt, mit Glasküken abgedeckt und für 8 h bei ansteigender Temperatur erhitzt. Nach dem vollständigen Veraschen des Probenmaterials wurde der Rückstand in 5 mL HNO_3 (1 + 2) aufgenommen und kurz aufgekocht. Danach wurden die Proben über Weißbandfilter in 50 mL-Messkolben filtriert. Das Aufschlussglas und der Filter wurden mehrmals mit heißem,

bidestilliertem Wasser nachgewaschen. Nach dem Abkühlen wurden die Messkolben aufgefüllt. Das Filtrat konnte nun am AAS gemessen werden.

2.6.3 Alkalität der pflanzlichen Asche

Die Bestimmung der Alkalität der Pflanzenasche ist ein Maß für den Carboxylatgehalt in pflanzlichem Material (Jungk 1968). Das Prinzip beruht darauf, dass organische Metallsalze bei der Veraschung in Carbonate übergehen, deren Menge durch Zersetzung mit überschüssiger Schwefelsäure und Rücktitration mit Lauge messbar ist.

Für den Probenaufschluss wurden 250 mg getrocknetes und gemahlenes Spross- und Wurzelmaterial in einem Tiegel mit 5 mL 0,1 M NaOH eingedampft und dann bei 520-550 °C über Nacht verascht. Für die Analyse der Früchte wurde auf das Eindampfen mit NaOH verzichtet, da das Probenmaterial zu stark verklebte. Stattdessen wurde eine Trockenveraschung durchgeführt. Der Rückstand wurde zweimal in je 10 mL 0,1 M HCl aufgenommen, aufgeköcht und mit heißem, bidestilliertem Wasser in einen 100 mL-Messkolben quantitativ überspült. Anschließend wurden die Proben im Messkolben 5 min auf einer Heizplatte aufgeköcht und nach dem Abkühlen bis zur Marke aufgefüllt. In dieser Lösung wurde durch Titration mit einer 0,1 M NaOH-Maßlösung die nicht verbrauchte Säuremenge ermittelt.

2.6.4 Bestimmung des Stickstoffs nach Kjeldahl

500 mg Probe wurden in Büchi-Röhren eingewogen, 10 mL konzentrierte Schwefelsäure (H_2SO_4) und 5-10 g Kjeldahl-Katalysator bestehend aus Kaliumsulfat (K_2SO_4), Kupfersulfat (CuSO_4) und Titandioxid TiO_2 dazugegeben. Die Mischung wurde in den Büchi-Röhren für 1 h unter Rückfluss gekocht (Büchi Distillation Unit B-324 mit Aufschlussblock: Büchi 430 Digestor), bis sich eine klare Lösung bildete. Alle stickstoffhal-

tigen Bestandteile der Probe wurden auf diese Weise in Ammoniumsulfat überführt. Nach Zugabe einer ausreichenden Menge NaOH bildete sich daraus Ammoniak, das in einer Borsäurevorlage aufgefangen wurde. Durch Einleiten des Ammoniaks entsteht Ammoniumborat. Durch Titration (Mettler DL 40 GP Memo Titrator) mit 0,1 M HCl und damit verbundener Verdrängung der schwächeren Borsäure durch die stärkere Salzsäure entsteht aus dem Ammoniumborat in der Vorlage Ammoniumchlorid. Der Verbrauch an HCl ist der Menge an NH_3 äquivalent. Aus den ermittelten Werten konnte die Konzentration an Rohprotein in der Probe berechnet werden.

2.6.5 Bestimmung von Nitrat, Sulfat, Phosphat und Chlorid mittels Ionenchromatographie

Es wurden 200 mg getrocknetes und gemahlene Pflanzenmaterial in einen 50 mL-Messkolben eingewogen, 30 mL bidestilliertes Wasser dazugegeben und mit Aluminiumfolie abgedeckt. Der Probenaufschluss erfolgte dann über 3 h im Schüttelbad (Schüttelintensität 30%) bei 100 °C. Nach dem Abkühlen wurde bis zur Marke aufgefüllt und durch einen Faltenfilter (MN 615 1/4) filtriert. Zehn mL des Filtrates wurden über C18-E Kartuschen (55 μm ; Fa. Strata) gereinigt und in Glasröhrchen gefüllt.

Das Messprinzip beruht darauf, dass mit einem Druck von 30-50 bar die Proben durch eine Trennsäule gepresst werden. Die verschiedenen Ionen bleiben unterschiedlich lange an der Trennsäule haften, verlassen dadurch die Trennsäule getrennt und werden vom nachfolgenden Detektor erfasst. Die Anzahl der gemessenen Peaks entspricht der Anzahl der aufgetrennten Probenkomponenten, die Fläche ist deren Menge proportional.

Gerät: Methrom 761 Kompakt IC
Auswertungsprogramm: Metrodata
Tennsäule: Dionex AS 14
Eluent: 1 mM Na₂CO₃ und 4 mM NaHCO₃
Flussrate: 1,0 µL / min
Injektionsvolumen: 20µL
Die Kalibrierung erfolgte mit externem Standard

2.7 Bodenanalysen

2.7.1 Aufbereitung der Bodenproben

Nach der Ernte der Versuchspflanzen wurden mit einem Bohrstock pro Mitscherlichgefäß drei Bodenproben gezogen, vermischt und bis zur Gewichtskonstanz bei 40 °C im Trockenschrank getrocknet. Danach wurde der getrocknete Boden auf eine Korngröße von < 1 mm gemörst und gesiebt.

2.7.2 pH-Wert des Bodens

Die Probenaufbereitung erfolgte nach (Steffens 2004). Es wurden 10 g aufbereiteter Boden in 40 mL-Schnappdeckelgläschen eingewogen, mit 25 mL Extraktionslösung (0,01 M CaCl₂) versetzt und in 1 h insgesamt fünfmal mit geschlossenem Deckel geschüttelt. Danach wurde in der überstehenden Bodenlösung der pH-Wert gemessen (pH-Meter von Schott CG 805, pH-Elektrode SenTix 61).

2.8 Analyse der Früchte

2.8.1 Zuckerbestimmung

Von gemahlener Erdbeerfrüchte wurden 200 mg in einen 50 mL-Messkolben eingewogen. Nach Zugabe von 30 mL 60 °C heißem bidestilliertem Wasser wurden die mit Aluminiumfolie verschlossenen Proben für

30 min bei 60 °C in ein Schüttelbad gestellt, nach dem Abkühlen bis zur Marke aufgefüllt und über einen Faltenfilter (MN 615 1/4) filtriert. Das Filtrat wurde zur Analyse verwendet.

Die Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose wurden mit Hilfe eines enzymatischen Testverfahrens (Boehringer Mannheim GmbH Biochemica, 1983/1984) ermittelt. Das Messprinzip beruht darauf, dass die Kohlenhydrate in mehreren Teilschritten enzymatisch in Glucosephosphat überführt werden. Glucosephosphat setzt sich unter Bildung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ mit Hilfe einer Dehydrogenase oxidativ zu Gluconatphosphat um. Das gebildete $\text{NADH} + \text{H}^+$ wird photometrisch bei 340 nm erfasst (Spektralphotometer PM6; Zeiss). Aus den Extinktionen errechnen sich die Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose.

2.8.2 Bestimmung der titrierbaren Säuren

Der Probenaufschluss erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie für Zucker. Zur Säurebestimmung wurden 10 mL Fruchtfiltrat in ein Becherglas gegeben und auf 100 mL mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt. Zunächst wurde der pH-Wert des Fruchtfiltrates gemessen und anschließend mit 0,05 M Natronlauge auf einen pH-Wert von 7,0 titriert (Mettler DL 40 GP Memo Titrator). Bei dieser Titration wurden freie und bis pH 7,0 abdissoziierbare H^+ -Ionen, wie sie in organischen Säuren vorkommen, erfasst. Der pH-Wert von 7,0 gleicht dem pH-Wert des Speichels (Birgül et al. 2008) und sollte somit eine Bestimmung der Konzentration an H^+ -Ionen beim Verzehr von Erdbeerfrüchten auf Basis der menschlichen Geschmacksempfindung ermöglichen.

2.8.3 Bestimmung der Hauptsäuren mittels High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

Die Probenaufbereitung erfolgte nach Hoberg (2005) jedoch wurde die Methode etwas modifiziert. Dazu wurden 100 mg Fruchttrockenmasse wurden in 10 mL Eluent (18 mM KH_2PO_4 , pH = 2,1) aufgenommen und 15 min im Ultraschallbad unter Kühlung extrahiert. Nach 1 h Standzeit wurden die Proben in einer Kühlzentrifuge (Beckmann J2-21M/E) 30 min bei 4°C und 4500 U min^{-1} zentrifugiert, 2 mL vom Überstand in ein Eppendorfgefäß überführt und in einer Tischzentrifuge (Typ: Mikro 22 R; Fa. Hettich-Zentrifugen) nochmals 10 min bei $13\,000 \text{ U min}^{-1}$ zentrifugiert. Der Überstand wurde durch eine Fritte (Membrex 13 PET 0,45 μm ; Fa. Membra PURE) in ein Injektionsfläschchen für die HPLC gepresst.

Die Proben wurden mit Hilfe des Lösungsmittels (18 mM KH_2PO_4 , pH = 2,1) zur Säule (stationäre Phase) gebracht. In der stationären Phase fand die Trennung statt. Die Trennung des Säuregemisches geschieht dadurch, dass die zu trennenden organischen Säuren der Probe unterschiedlich lang in der stationären Phase festgehalten werden. Die einzelnen Säuren werden vom Detektor registriert, welcher diese Information an die Auswerteeinheit weiter gibt. Das Ergebnis wird als Chromatogramm dargestellt. Die Anzahl der Peaks entspricht der Anzahl der aufgetrennten Probenkomponenten, die Fläche ist deren Menge proportional (Matissek et al. 1992).

HPLC-Geräte: Fa. Dionex,

Pumpe: P680 (Fluss $0,5 \text{ mL min}^{-1}$)

Säulenofen: Temperatur 25°C

Säule: LiChroCART®250-4 (Fa. Merck)

Injektionsvolumen: 25 μL

Detektor: UVD 170U/340U

Laufzeit: 35 min

Auswertungsprogramm: Cromleon 6.50 SP4

Wie in Abb. 9 zu sehen ist, konnten die organischen Anionen Malat, Citrat und Succinat deutlich getrennt werden. Peak 1 ist der Einspritzpeak. Nicht benannte Peaks stellen kleinere Mengen organischer Anionen dar, die jedoch nicht gemessen wurden. Die Auswertung erfolgte über eine externe Eichung.

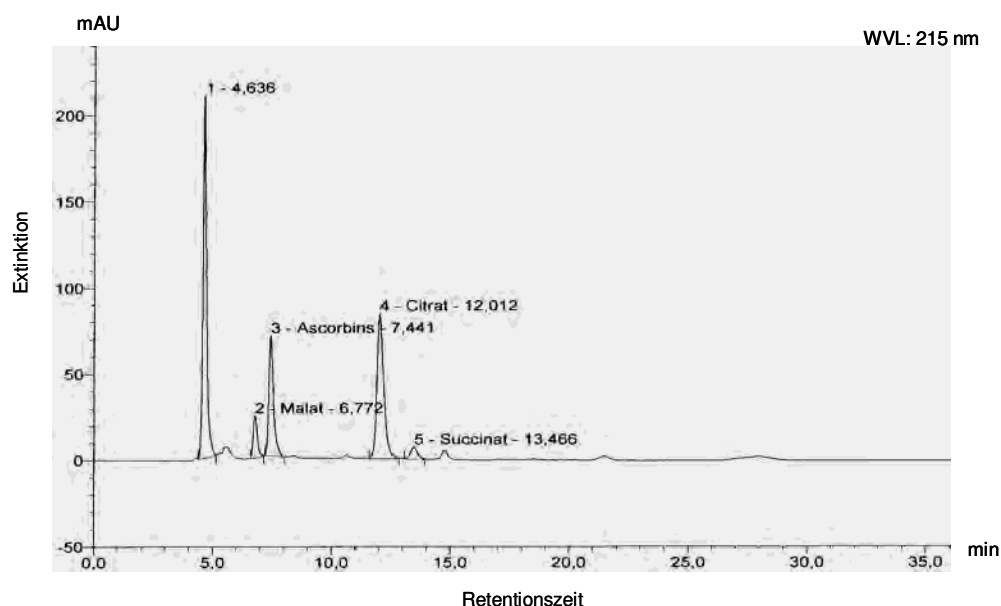


Abb. 9: Chromatogramm der Messung organischer Anionen in Erdbeerfrüchten.

2.8.4 Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten

Zur Bestimmung der Aschealkalität in den Früchten wurde gefriergetrocknetes und gemahlenes Material verwendet. Die weitere Probenaufbereitung erfolgte wie bei Wurzel und Spross. Auf das Eindampfen der Proben mit NaOH vor dem Veraschen wurde verzichtet, da das Material zu stark am Tiegel anhaftete.

2.9 Statistische Auswertung

Alle Experimente wurden mit mindestens drei Wiederholungen durchgeführt. Mittelwerte und Standardfehler wurden mit dem Statistikprogramm SigmaStat berechnet. Danach erfolgte eine statistische Auswertung der Daten mit Hilfe des t-Tests sowie des Tukey-Tests. Unterschiedliche Buchstaben symbolisieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen ($P = 5\%$). Mit dem Statistikprogramm SPSS wurde die Signifikanz der Korrelationen überprüft ($P = 5\%$)

3 Ergebnisse

3.1 Wasserkulturversuch I

In diesem Versuch wurde der Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf Wurzeln, Spross und Früchte von Erdbeeren untersucht.

3.1.1 Untersuchungen von Wurzel und Spross

Auf eine Darstellung der Wurzelfrischmasse wurde im Allgemeinen verzichtet, da die Betrachtung der Trockenmasse ein deutlicheres Bild der tatsächlichen Wachstumsunterschiede zwischen den Varianten zeigt. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Restfeuchte der Pflanzenwurzeln bei der Bestimmung der Wurzelfrischmasse.

3.1.1.1 Wurzeltrockenmasse und Wurzelmorphologie

Die Bildung der Wurzeltrockenmasse wurde durch die unterschiedlichen Stickstoffformen nicht beeinflusst, doch wiesen die Pflanzen der NH_4^+ -Variante tendenziell eine geringere Wurzelmasse auf. Wie in Abb. 10 zu sehen ist, konnte dies aufgrund starker Schwankungen der Wiederholungen statistisch nicht abgesichert werden.

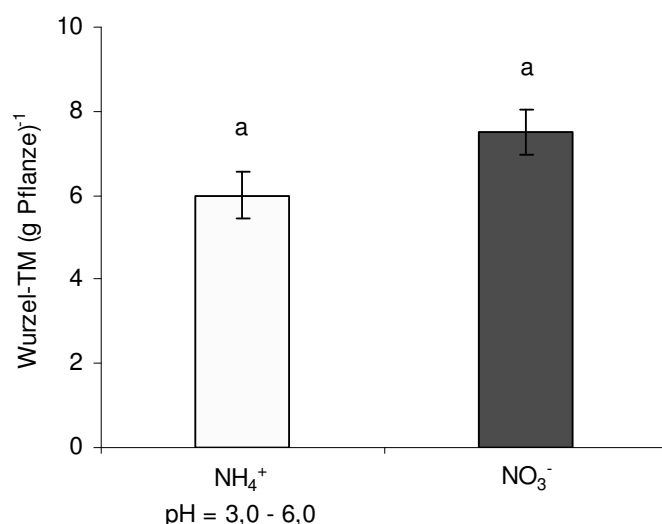


Abb. 10: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Wurzeltrockenmasse von Erdbeerpflanzen. Die Werte zeigen Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen keine signifikanten Unterschiede ($P = 5\%$).

Ammonium- und NO_3^- -Ernährung hatten einen Einfluss auf die Trockensubstanzgehalte in den Wurzeln. Sie lagen in der NH_4^+ -Variante um 5,5% höher als bei der NO_3^- -Variante (Abb. 11).

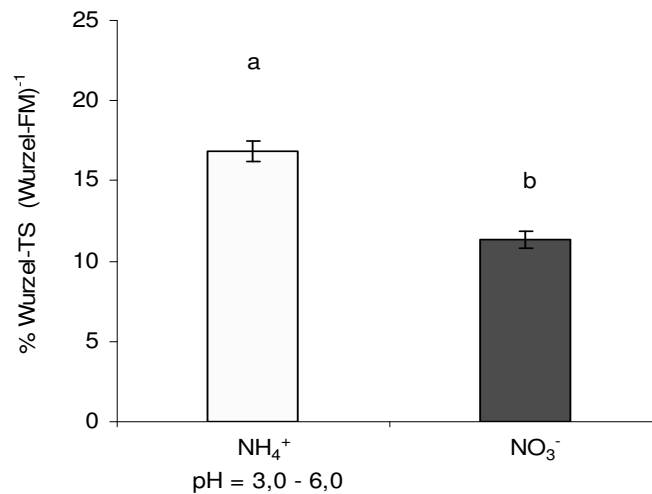


Abb. 11: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Wurzeltrockensubstanzgehalte von Erdbeerpflanzen. Die Werte zeigen Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Auch Unterschiede in der Wurzelmorphologie waren deutlich zu erkennen. In Abb. 12 sind die Wurzeln der beiden Ernährungsvarianten dargestellt. Die mit NH_4^+ -N ernährten Pflanzen (links) bildeten stärker verzweigte, gelbliche Wurzeln, die dicker und drahtiger wirkten als die Wurzeln der Pflanzen, die mit NO_3^- -N (rechts) versorgt wurden.



Abb. 12: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Wurzeln von Erdbeerpflanzen.

3.1.1.2 Sprosstrockenmasse und Sprosshabitus

Die Bildung der Sprossmasse war bei der NH_4^+ -Variante signifikant niedriger als bei den Pflanzen der NO_3^- -Variante (Abb. 13). Die Trockensubstanzgehalte unterschieden sich nicht und lagen bei den Varianten zwischen 29 und 30% (ohne Abb.). In Abb. 14 ist festgehalten, dass auch visuell Unterschiede wahrnehmbar waren, besonders nach dem Ansetzen der ersten roten Früchte wirkten die Pflanzen der NH_4^+ -Variante welk.

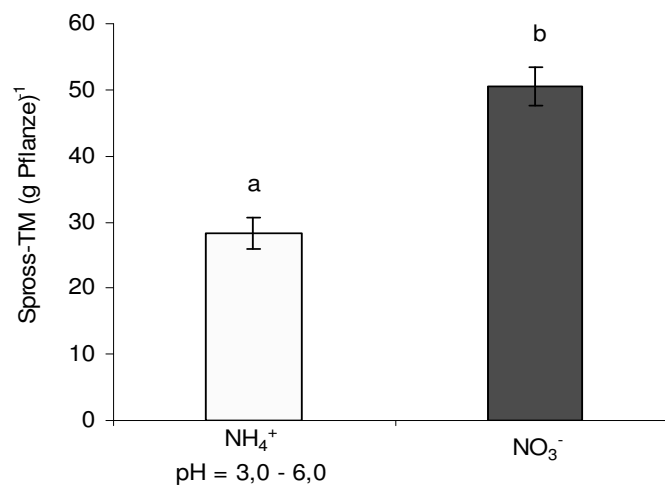


Abb. 13: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Sprosstrockenmasse von Erdbeerpflanzen. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

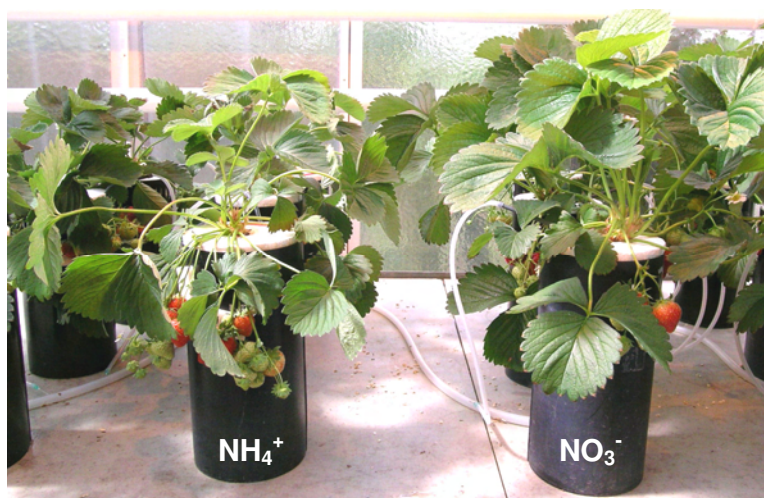


Abb. 14: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf den Habitus von Erdbeerpflanzen vor der ersten Fruchternte.

3.1.1.3 Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Die Pflanzen der NH_4^+ -Variante wiesen signifikant geringere Konzentrationen an Ca, K und Mg im Spross auf. Die Konzentrationen dieser Mineralstoffe lagen weit unter den von Bergmann (1993) angegebenen Grenzwerten (Tab. 12), wodurch bei diesen Pflanzen ein Mangel an einzelnen Mineralstoffen aufgetreten sein könnte.

Tab. 12: Mineralstoffkonzentrationen in der Sprosstrockenmasse. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen. Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [%Trockensubstanz]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH = 3,0 – 6,0	NO_3^- pH \approx 5,0
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	0,54 a	1,41 b
<i>K</i>	1,50 - 2,50	0,92 a	1,99 b
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,19 a	0,35 b

Tab. 13: Mikronährstoffkonzentrationen in der Sprosstrockenmasse. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen. Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Mikronährstoffe im Spross [$\mu\text{g} (\text{g TM})^{-1}$]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH = 3,0 – 6,0	NO_3^- pH \approx 5,0
<i>Cu</i>	7 - 15	3 a	5 b
<i>Mn</i>	40 - 100	23 a	44 b
<i>Fe</i>	keine Angaben	48 a	82 b
<i>Zn</i>	20 - 70	27 a	32 a

Auch bei den Mikronährstoffkonzentrationen im Spross zeigte sich ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen N-Formen. In der NH_4^+ -Variante waren die Konzentrationen an Mikronährstoffen signifikant niedriger als in der Variante, die mit NO_3^- -N ernährt wurde (Tab. 13).

3.1.1.4 Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross

Wie Abb. 15 zu entnehmen ist, war die Alkalität der pflanzlichen Asche bei NH_4^+ -Ernährung signifikant niedriger als bei NO_3^- -Ernährung. Im Spross der mit NO_3^- -N ernährten Pflanzen war die Konzentration an organischen Anionen um $\frac{2}{3}$ höher als in der NH_4^+ -Variante.

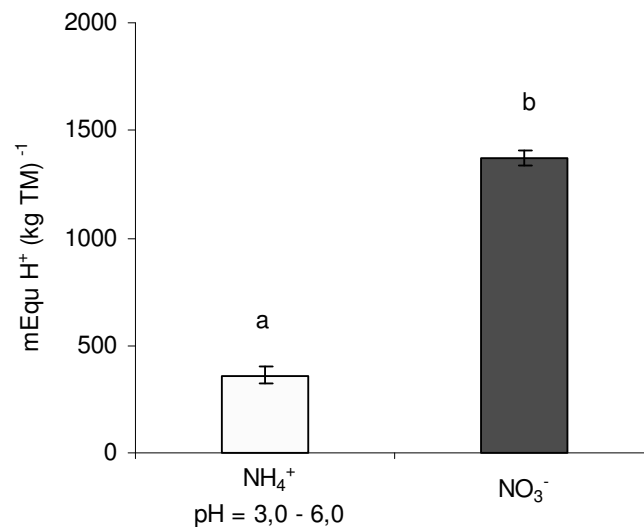


Abb. 15: Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross der Erdbeerpflanzen. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%)

3.1.2 Untersuchungen der Früchte

3.1.2.1 Fruchtfrischmasse

Die N-Form und der aus der NH_4^+ -Ernährung resultierende niedrige pH-Wert hatten auch einen Einfluss auf die Bildung der Fruchtfrischmasse. Diese schwankte, wie in Abb. 16 zu sehen ist, bei NH_4^+ -Ernährung um $300 \text{ g Pflanze}^{-1}$ mit Schwankungen von etwa $30 \text{ g Pflanze}^{-1}$ und in der NO_3^- -Variante um $420 \text{ g Pflanze}^{-1}$ mit Schwankungen von nur $17 \text{ g Pflanze}^{-1}$.

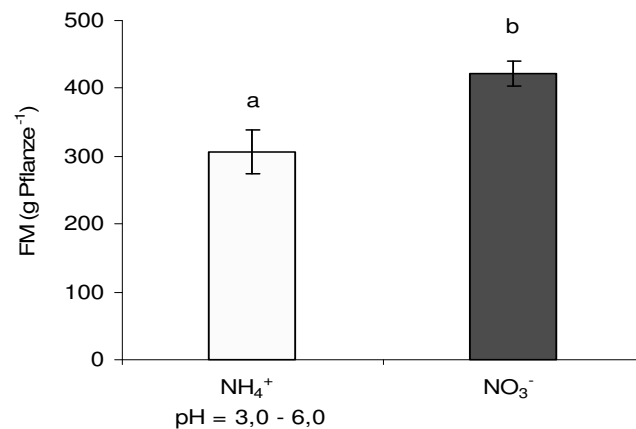


Abb. 16: Ertragsbildung von Erdbeerpflanzen bei unterschiedlicher N-Ernährung. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Anders als bei den Wurzeln (Abb. 11), hatten die N-Ernährung und der niedrige pH-Wert in der Nährlösung keinen Einfluss auf den Trockensubstanzgehalt der Erdbeerfrüchte. Die Werte schwanken bei beiden Varianten zwischen 10 und 12 % (ohne Abb.).

3.1.2.2 Zuckerkonzentrationen

Da die Zucker wesentlich zum Geschmack von Erdbeerfrüchten beitragen, wurden die Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose bestimmt. Hier konnte festgestellt werden, dass die Konzentrationen an Glucose und Fructose in den Früchten der NH_4^+ -Variante signifikant höher als in den Früchten der mit NO_3^- -N ernährten Pflanzen waren. Bei Saccharose, der Haupttransportsubstanz für Assimilate in Erdbeeren, lagen die Werte in beiden Varianten zwischen 17-19 g Zucker (kg FM)⁻¹.

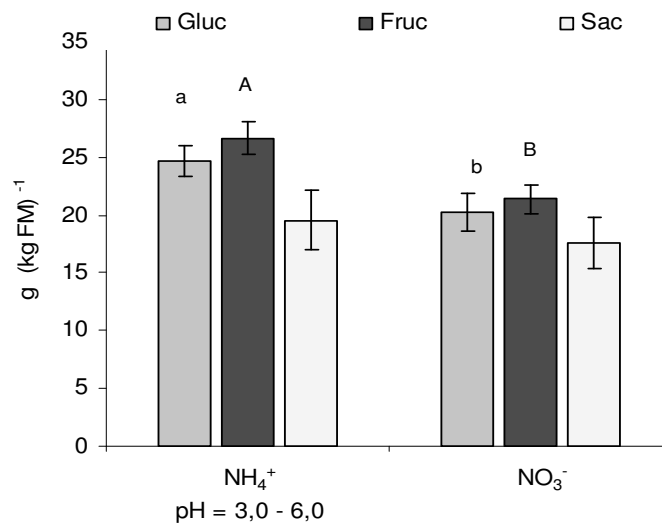


Abb. 17: Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose in den Erdbeerfrüchten. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.1.2.3 Titrierbare Säure

Trotz großer Schwankungen der Konzentrationen an titrierbarer Säure in den Erdbeerfrüchten der NH_4^+ -Variante, ist ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden N-Ernährungsvarianten festzustellen. Abb. 18 zeigt, dass die titrierbare Säure im Gegensatz zu den Zuckern (Abb. 17) in den Früchten der NH_4^+ -Variante um etwa 50% niedriger als in den Früchten der NO_3^- -Variante lag.

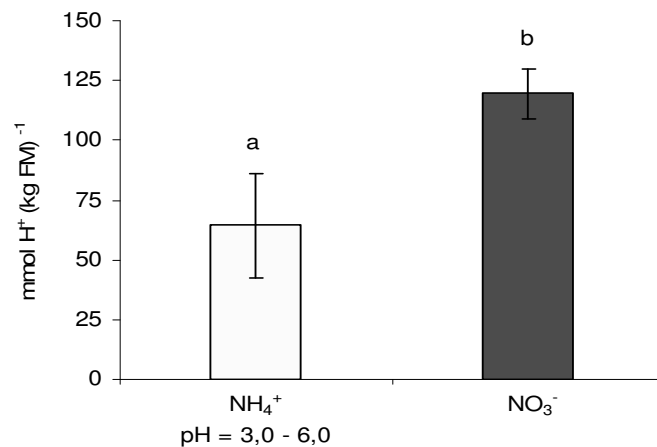


Abb. 18: Titrierbare Säure in den Erdbeerfrüchten. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Um die tatsächlichen Konzentrationen der in Erdbeerfrüchten vorkommenden Hauptsäuren zu messen, wurden entsprechende Analysen mittels HPLC durchgeführt.

3.1.2.4 Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten

Die in Erdbeerfrüchten der Sorte Elsanta vorkommenden organischen Anionen dieser Säuren waren Citrat, Malat und Succinat. Ascorbat kommt, im Vergleich zu den anderen Anionen, nur in geringen Konzentrationen vor (Abb. 19). Auch hier wird, wie schon bei der titrierbaren Säure (Abb. 18), der Unterschied zwischen NH_4^+ - und der NO_3^- -Ernährung der Pflanzen sehr deutlich und bestätigt das Ergebnis der vorangegangenen Untersuchung.

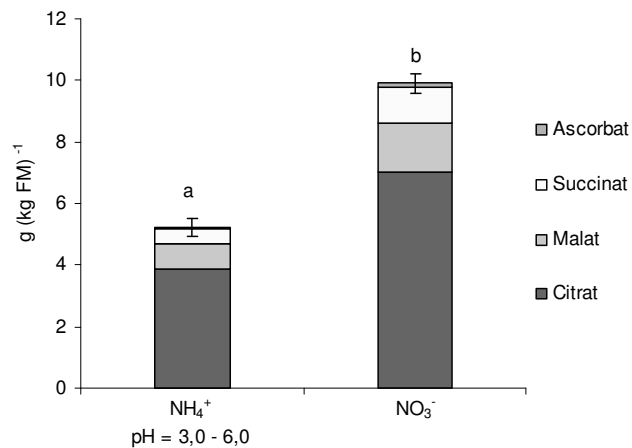


Abb. 19: Konzentrationen von Citrat, Malat und Succinat sowie Ascorbat in Erdbeerfrüchten. Dargestellt sind Mittelwerte aus fünf Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.2 Wasserkulturversuch II

In diesem Versuch wurde der Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf Wurzel, Spross und Früchte von Erdbeeren bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung und bei niedrigem pH-Wert mit starken pH-Schwankungen untersucht.

3.2.1 Untersuchungen von Wurzel und Spross

3.2.1.1 Wurzeltrockenmasse und Trockensubstanzgehalte

Wie in Abb. 20 zu sehen ist, hatte in diesem Versuch der niedrige pH-Wert einen geringen Einfluss auf die Bildung der Wurzelmasse. In der NH_4^+ -Variante mit niedrigem pH-Wert in der Nährlösung, bildeten die Pflanzen tendenziell weniger Wurzelmasse als in der NO_3^- -Variante. Aufgrund der starken Schwankungen von etwa 1 g Pflanze⁻¹ in der NO_3^- -Variante war dieser Unterschied statistisch nicht abzusichern.

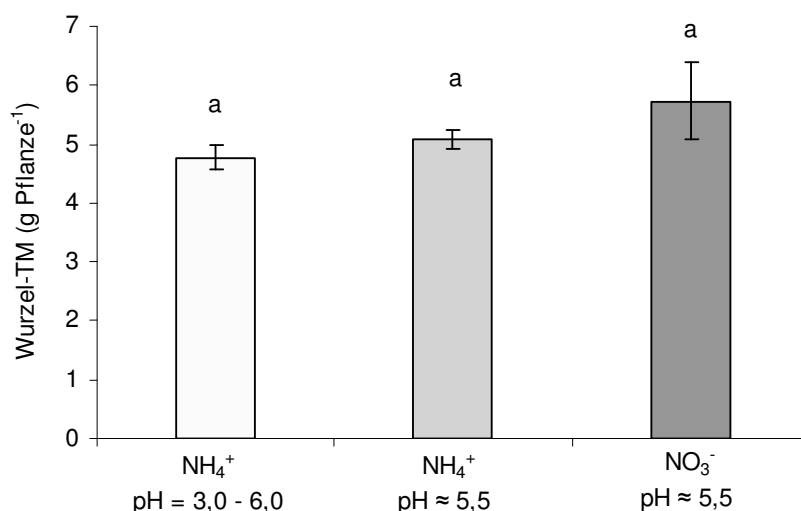


Abb. 20: Wurzeltrockenmasse bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler.

Die Trockensubstanzgehalte Abb. 21 jedoch verhielten sich umgekehrt proportional zur Wurzeltrockenmasse. Bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert war die Trockensubstanz signifikant höher als bei NO_3^- -

Ernährung. Wurde der pH-Wert in der Nährlösung auf einen moderaten Wert von 5,5 gehalten, so war die Trockensubstanz nur noch leicht erhöht und der Unterschied statistisch nicht mehr abzusichern.

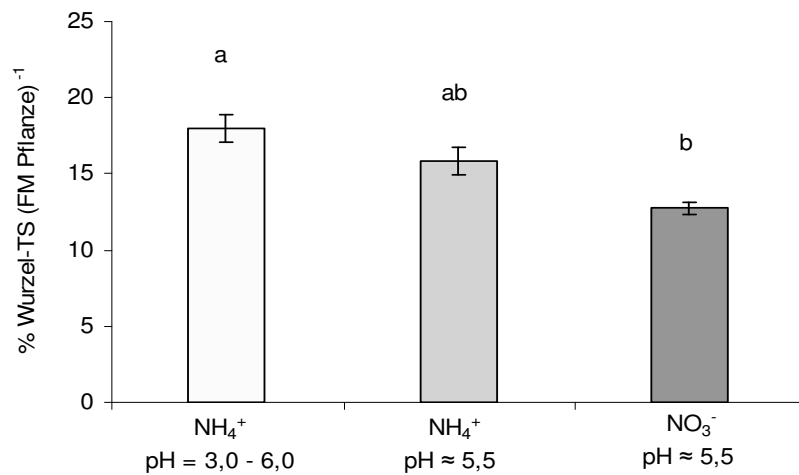


Abb. 21: Trockensubstanzgehalte der Erdbeerwurzeln bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.2.1.2 Sprosstrockenmasse

Genauso wie bei den Wurzeln (Abb. 20) konnten auch bei der Sprosstrockenmasse nur tendenzielle Unterschiede festgestellt werden (Abb. 22). Die Pflanzen, die mit NH_4^+ -N und einem niedrigen, schwankenden Nährlösungs-pH-Wert kultiviert wurden, bildeten etwa 30% weniger Sprossmasse aus als die Pflanzen die NO_3^- -N bekamen. Bei einem Vergleich von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung mit moderatem pH-Wert in der Nährlösung betrug der Unterschiede nur 10% (Abb. 22). Durch die starken Schwankungen in der NO_3^- -Variante ließ sich dieses Ergebnis statistisch nicht absichern. Die Trockensubstanzgehalte waren, im Gegensatz zur Wurzel (Abb. 21), im Spross bei allen Varianten etwa gleich und lagen bei Werten zwischen 25 und 28 % (ohne Abb.).

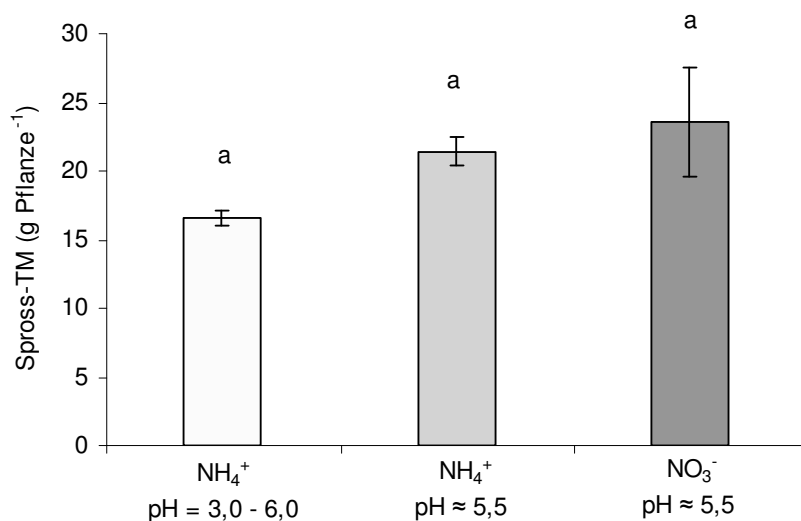


Abb. 22: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Sprosstrockenmasse bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.2.1.3 Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Erkennbar sind auch in diesem Versuch signifikante Unterschiede zwischen NH_4^+ -Ernährung mit niedrigem pH-Wert und NO_3^- -Ernährung (Tab. 14). Interessant ist jedoch, dass bei NH_4^+ - oder NO_3^- -Ernährung und moderatem pH-Wert in der Nährlösung keine Unterschiede bei den Nährstoffen Kalium (K) und Magnesium (Mg) festzustellen waren. Bei einer Betrachtung der Ca-Konzentrationen sind die hohen Werte an Ca bei NO_3^- -Ernährung auffällig.

Tab. 14: Konzentrationen an Makronährstoffen bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [%Trockensubstanz]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH = 3,0 – 6,0	NH_4^+ pH \approx 5,5	NO_3^- pH \approx 5,5
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	0,75 a	1,42 b	1,93 c
<i>K</i>	1,50 - 2,50	1,97 a	2,33 b	2,57 b
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,25 a	0,35 b	0,37 b

Bei der Betrachtung der Mikronährstoffkonzentrationen sind die niedrigen Konzentrationen von Mn und Fe bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert in der Nährlösung auffällig (Tab. 15). Keine Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung waren bei gleichem pH-Wert in der Nährlösung festzustellen.

Tab. 15: Konzentrationen an Mikronährstoffen bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mikronährstoffe im Spross [$\mu\text{g (g TM)}^{-1}$]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH = 3,0 – 6,0	NH_4^+ pH \approx 5,5	NO_3^- pH \approx 5,5
<i>Cu</i>	7 - 15	5 a	4 a	7 a
<i>Mn</i>	40 - 100	30 a	58 b	63 b
<i>Fe</i>	keine Angaben	96 a	109 ab	154 b
<i>Zn</i>	20 - 70	42 a	39 a	35 a

3.2.1.4 Kjeldahl-N im Spross

Der Kjeldahl-N erfasst den reduzierten Stickstoff und ist somit ein Maß für assimilierten Stickstoff in der Pflanze. Wie in Abb. 23 deutlich zu erkennen ist, lag in beiden NH_4^+ -Varianten mehr N in den Wurzeln und im Spross vor als in der NO_3^- -Variante. Bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert im Nährmedium war dieser Effekt noch stärker ausgeprägt und setzte sich bis in die Früchte fort.

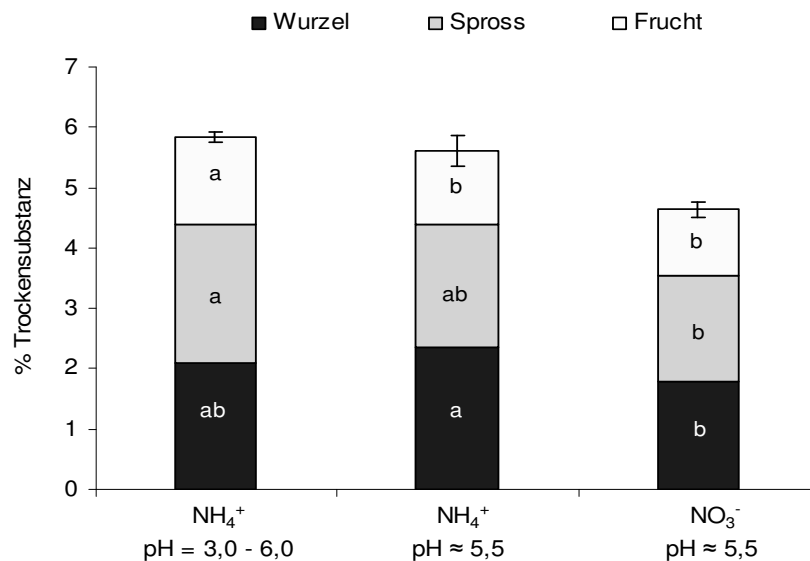


Abb. 23: Kjeldahl-N in Wurzel, Spross und Früchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.2.1.5 Anionenkonzentrationen in Wurzel, Spross und Früchten

Die Anionenkonzentrationen lagen in der NO_3^- -Variante wie zu erwarten höher als in den beiden NH_4^+ -Varianten (Abb. 24). Deutlich sind die höheren Anionenkonzentrationen, die offensichtlich durch die Speicherung von NO_3^- im Pflanzengewebe zustande kamen, in der NO_3^- -Variante zu erkennen. Daraus resultiert eine erhöhte Gesamtkonzentration an Anionen in den Wurzeln und im Spross, allerdings nicht in den Früchten. Zusätzlich konnten in der NO_3^- -Variante niedrigere Konzentrationen an Chlor (Cl) im Spross und in den Früchten festgestellt werden.

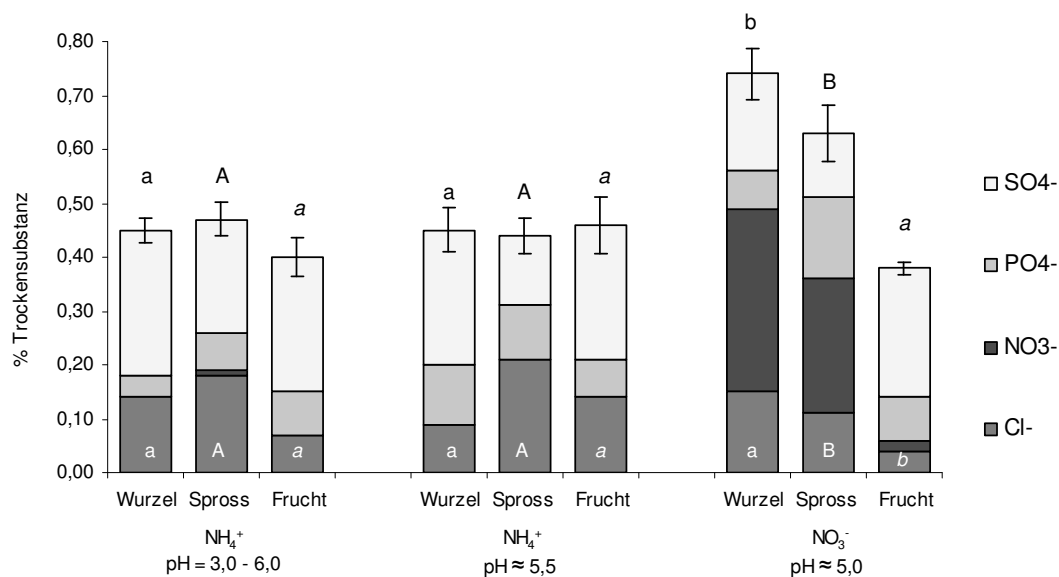


Abb. 24: Konzentrationen anorganischer Anionen in Wurzel, Spross und Früchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$), wobei die Buchstaben über den Säulen sich auf die Gesamtkonzentration der Anionen in den entsprechenden Pflanzenorganen beziehen.

3.2.1.6 Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross

Die Alkalität der pflanzlichen Asche und somit die Konzentration an organischen Anionen in Wurzel und Spross der NO_3^- -Variante war auch in diesem Versuch höher als in den beiden NH_4^+ -Varianten. Zwischen den beiden NH_4^+ -Varianten kam es zusätzlich noch zu einer Abstufung, verursacht durch den zeitweise niedrigen pH-Wert und die starken pH-Schwankungen in der Nährlösung. In der NH_4^+ -Variante mit moderatem pH-Wert waren die Konzentrationen an organischen Säuren im Vergleich zur NO_3^- -Variante ebenfalls verringert. Diese Unterschiede zwischen den N-Ernährungsformen waren für Wurzel und Spross gleich (Abb. 25 und Abb. 26), doch waren die Konzentrationen an organischen Anionen in den Wurzeln um 45 - 55% niedriger als im Spross.

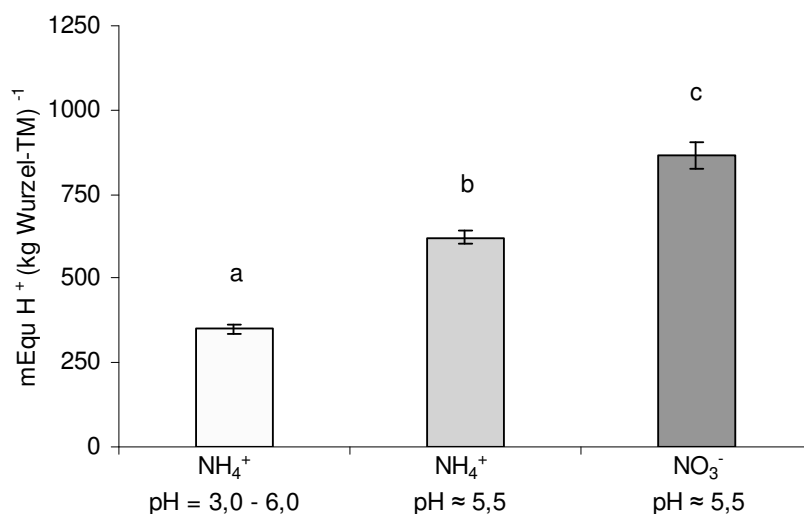


Abb. 25: Alkalität der pflanzlichen Asche in den Wurzeln der Erdbeerpflanzen. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

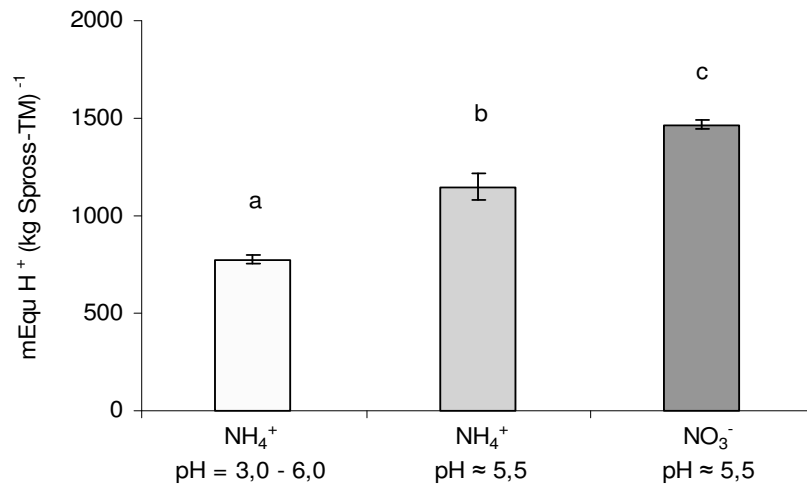


Abb. 26: Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross der Erdbeerpflanzen bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.2.1.7 Zuckerkonzentrationen im Spross

Abb. 27 zeigt, dass es bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung keine Unterschiede in den Konzentrationen an Zuckern im Spross gab. Bei niedrigem und schwankendem pH-Wert in der Nährlösung konnten jedoch erhöhte Konzentrationen an Fructose im Spross der NH_4^+ -Variante nachgewiesen werden.

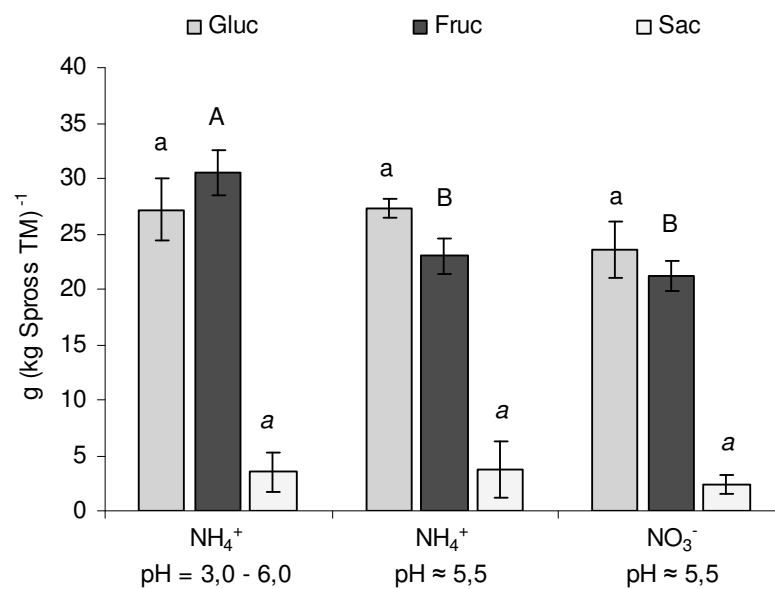


Abb. 27: Zuckerkonzentrationen in der Sprosstrockenmasse bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die unterschiedlichen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

3.2.2 Untersuchungen der Früchte

3.2.2.1 Fruchtfrischmasse

Bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung gab es zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung keine Unterschiede im Fruchtertrag. Bei niedrigem pH-Wert und NH_4^+ -Ernährung war der Fruchtertrag trotz eingeschränktem Wurzel- und Sprosswachstum (Abb. 20 und Abb. 22) signifikant höher als bei den beiden anderen Varianten (Abb. 28). Es gab zwischen den drei Ernährungsvarianten keine Unterschiede in den Trockensubstanzgehalten, die um Werte zwischen 8 und 10% schwankten (ohne Abb.).

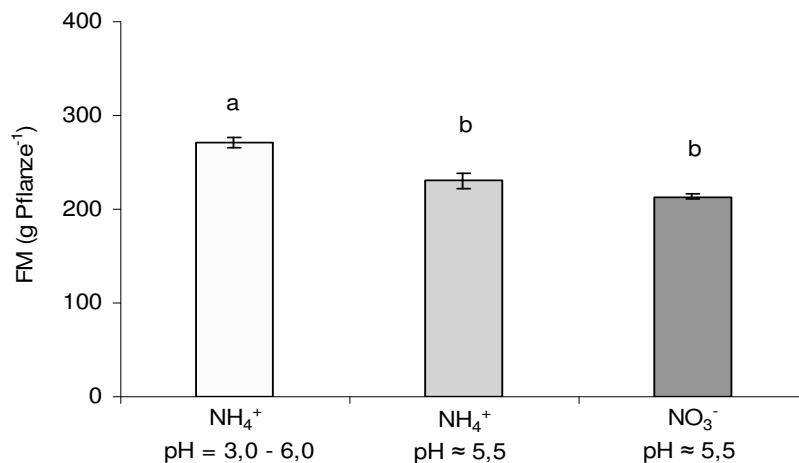


Abb. 28: Fruchtertrag bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.2.2.2 Zuckerkonzentrationen in den Früchten

Anders als beim Spross (Abb. 27) wurden die Zuckerkonzentrationen der Früchte auf die Frischmasse bezogen. Hierbei wurden keine Unterschiede zwischen den N-Ernährungsvarianten festgestellt; dies änderte sich auch nicht bei einem Vergleich der Zuckerkonzentrationen bezogen auf die Fruchttrockenmasse (ohne Abb.).

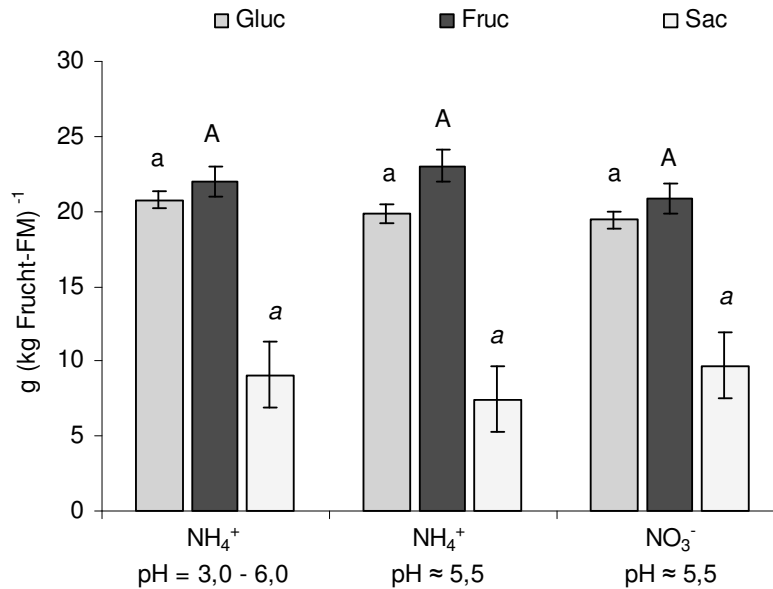


Abb. 29: Zuckerkonzentrationen in der Fruchtfischmasse bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab (P = 5%).

3.2.2.3 Titrierbare Säure

Aufschlussreich war die Untersuchung der titrierbaren Säure in den Erdbeerfrüchten bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung. Hierbei wurde kein Unterschied zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung festgestellt. Allerdings war bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert in der Nährlösung in den Früchten weniger titrierbare Säure zu finden (Abb. 30). Dies bedeutet, dass die im Wasserkulturversuch I gefundenen Unterschiede (Abb. 18), genauso wie in diesem Versuch, vorwiegend auf den niedrigen oder den stark schwankenden pH-Wert in der NH_4^+ -Nährlösung zurückzuführen waren.

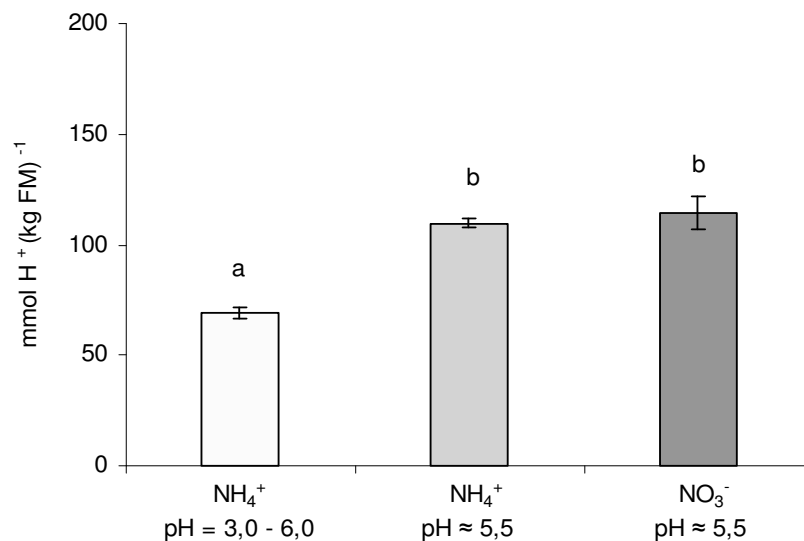


Abb. 30: Titrierbare Säure in den Erdbeerfrüchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

3.2.2.4 Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten

Auch in diesem Versuch waren die in den Früchten dominierenden Säuren die Zitronensäure, gefolgt von Äpfelsäure und Bernsteinsäure. Die Ascorbinsäure nimmt hier, im Vergleich zu den anderen Säuren, einen mengenmäßig geringen Anteil ein. Abb. 31 lässt deutlich erkennen, dass zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung keine Unterschiede in den Konzentrationen der Hauptsäuren bei moderatem pH-Wert auftraten. Bei niedrigem pH-Wert in der Nährlösung wurden signifikant weniger Säuren in den Früchten nachgewiesen. Das Verhältnis der Säuren zueinander blieb jedoch auch bei geringen Konzentrationen gleich.

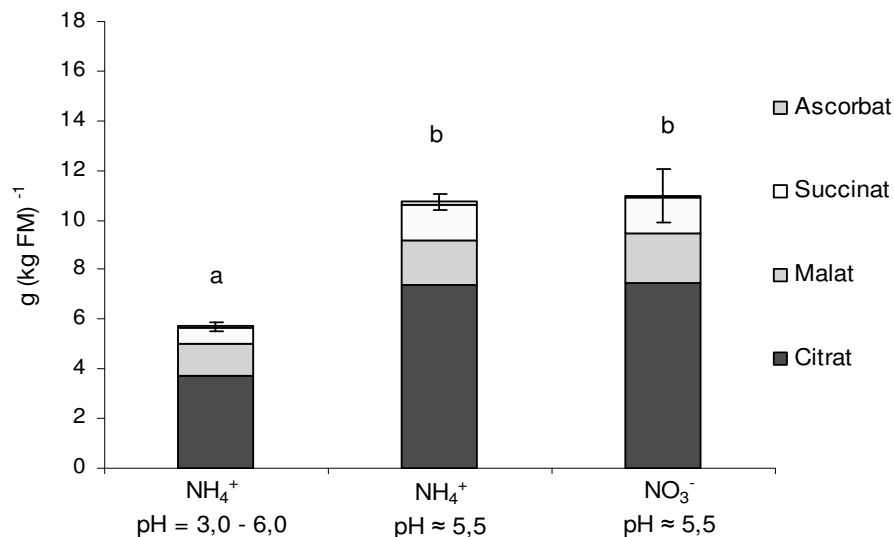


Abb. 31: Konzentrationen an Citrat, Malat, Succinat und Ascorbat in den Erdbeerfrüchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

3.3 Wasserkulturversuch III

Dieser Versuch sollte Aufschluss darüber geben, ob die bisher ermittelten Unterschiede bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert im Vergleich zur NH_4^+ -Ernährung mit moderatem pH-Wert in der Nährlösung aufgrund des niedrigen pH-Wertes oder aufgrund starker pH-Schwankungen zustande kamen. Dazu wurden wieder eine NH_4^+ - und eine NO_3^- -Variante mit etwa gleichem pH-Wert kultiviert. Die zweite NH_4^+ -Variante wurde diesmal mittels pH-Stat-Anlage auf einen konstant niedrigen Wert von etwa 3,5 eingestellt.

3.3.1 Untersuchungen von Wurzel und Spross

3.3.1.1 Wurzeltrockenmasse und Wurzeltrockensubstanzgehalt

Wie Abb. 32 zeigt, gab es zwischen den beiden N-Ernährungsformen und den unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung keine signifikanten Unterschiede in der Ausbildung der Wurzelmasse. Allerdings wurde in der NH_4^+ -Variante mit niedrigem pH-Wert tendenziell weniger Wurzelmasse gebildet.

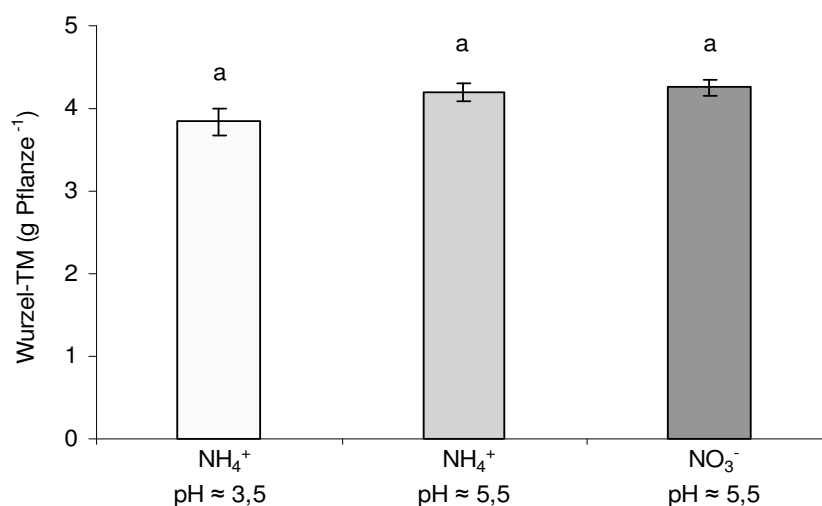


Abb. 32: Wurzeltrockenmasse bei unterschiedlicher N-Ernährung der Pflanze und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

Bei der Betrachtung der Trockensubstanzgehalte kann festgestellt werden, dass die Wurzeln der NH_4^+ -Varianten, wie in den vorangegangenen Versuchen (Abb. 11 und Abb. 21), einen signifikant höheren Trockensubstanzgehalt hatten als die der NO_3^- -Variante. Sank zusätzlich der pH-Wert in der Nährlösung stark ab, verstärkte sich dieser Effekt (Abb. 33).

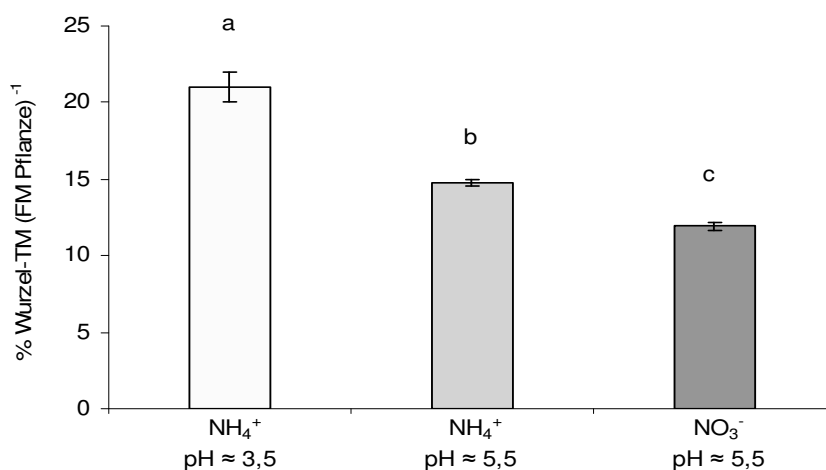


Abb. 33: Wurzeltrockensubstanzgehalt bei NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.3.1.2 Sprosstrockenmasse und Trockensubstanzgehalt

Bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung gab es in der Bildung der Sprossmasse keine Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung, ebensowenig in den Trockensubstanzgehalten des Sprosses. Wie in Abb. 34 zu sehen ist, war die Sprossmassebildung bei niedrigem pH-Wert in der Nährlösung stark eingeschränkt und die Trockensubstanzgehalte (Abb. 35) wie bei den Wurzeln erhöht. Der Spross reagierte auf NH_4^+ -Ernährung nicht so empfindlich mit erhöhter Trockensubstanzanreicherung wie die Wurzeln (Abb. 33).

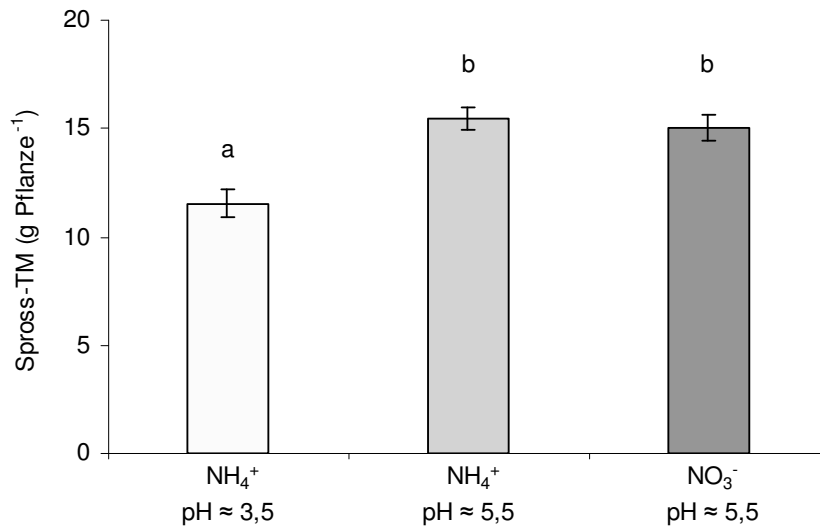


Abb. 34: Einfluss von NH₄⁺- und NO₃⁻-Ernährung auf die Sprosstrockenmasse bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

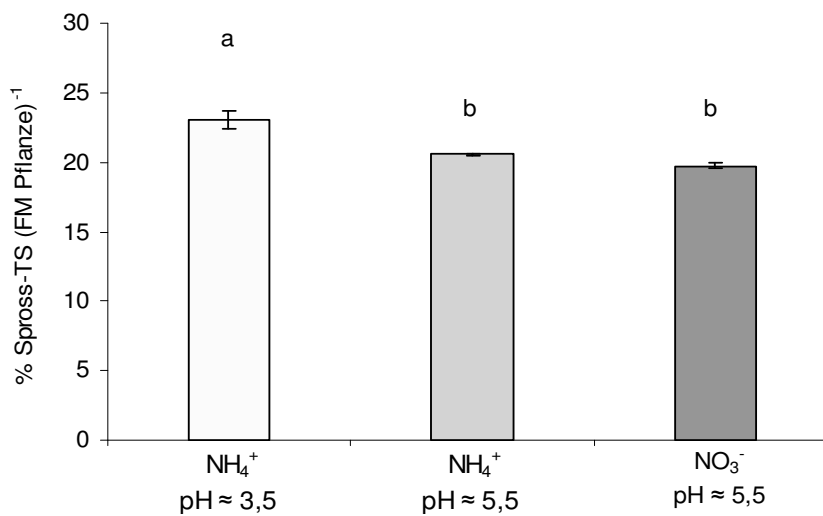


Abb. 35: Einfluss von NH₄⁺- und NO₃⁻-Ernährung auf die Trockensubstanzgehalte bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

3.3.1.3 Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Aus Tab. 16 wird ersichtlich, dass bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert in der Nährlösung, wie in dem vorangegangenen Versuch (Tab. 14), die Mineralstoffkonzentrationen im Spross signifikant niedriger waren als bei NH_4^+ -Ernährung und moderatem pH-Wert. In der NO_3^- -Variante waren wieder die hohen Ca-Konzentrationen auffällig.

Tab. 16: Mineralstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [%Trockensubstanz]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH \approx 3,5	NH_4^+ pH \approx 5,5	NO_3^- pH \approx 5,5
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	0,65 a	1,10 b	1,70 c
<i>K</i>	1,50 - 2,50	1,86 a	2,50 b	2,62 b
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,22 a	0,32 b	0,40 b

Auch die Mikronährstoffkonzentrationen von Kupfer (Cu) und Mangan (Mn) im Spross waren bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert in der Nährlösung signifikant niedriger als bei den beiden anderen Ernährungsvarianten.

Tab. 17: Mikronährstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mikronährstoffe im Spross [$\mu\text{g (g TM)}^{-1}$]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	NH_4^+ pH \approx 3,5	NH_4^+ pH \approx 5,5	NO_3^- pH \approx 5,5
<i>Cu</i>	7 - 15	4 a	5 ab	6 b
<i>Mn</i>	40 - 100	29 a	60 b	70 b
<i>Fe</i>	keine Angaben	175 a	125 ab	157 a
<i>Zn</i>	20 - 70	39 a	53 a	67 a

3.3.1.4 Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross

Die Alkalität der pflanzlichen Asche spiegelt die Konzentrationen an organischen Anionen im Pflanzengewebe wider. Wie die Abb. 36 und Abb. 37 zeigen, waren bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert in der Nährlösung die geringsten Konzentrationen an organischen Anionen in den Wurzeln und im Spross zu finden. In der NO_3^- -Variante hingegen konnten im Vergleich zu den beiden NH_4^+ -Varianten die höchsten Werte nachgewiesen werden. Die NH_4^+ -Variante mit moderatem pH-Wert lag zwischen diesen beiden Extremen. Deutlich ist hier der Einfluss des niedrigen pH-Wertes sowie der Einfluss der NO_3^- -Ernährung auf die Konzentrationen an organischen Anionen im Pflanzengewebe zu erkennen.

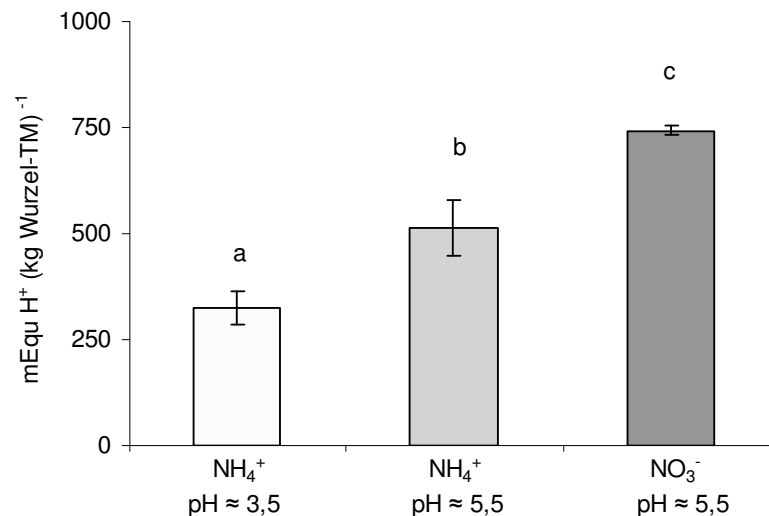


Abb. 36: Alkalität der pflanzlichen Asche in den Wurzeln bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

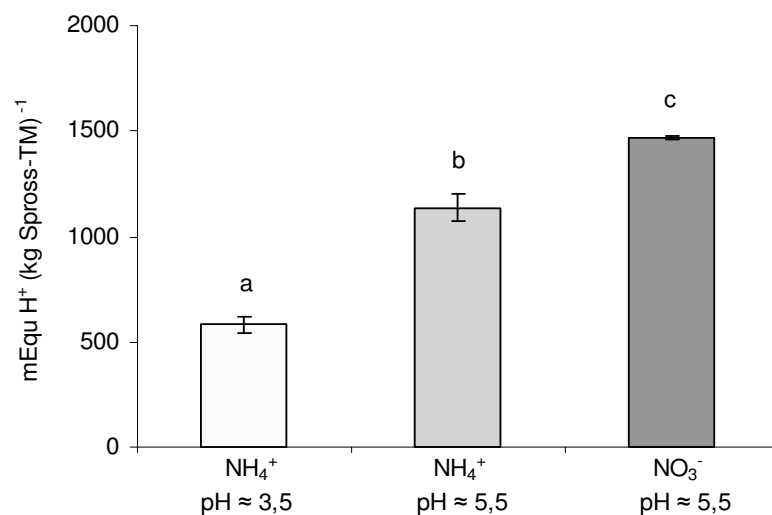


Abb. 37: Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Ob sich der Einfluss des niedrigen pH-Wertes in der Nährlösung und der Einfluss der NO₃⁻-Ernährung auf die Konzentrationen an organischen Säuren auch in die generativen Organe fortsetzt, zeigen die Untersuchungen der Erdbeerfrüchte.

3.3.2 Untersuchungen der Früchte

3.3.2.1 Fruchtfrischmasse

Durch NH_4^+ -Ernährung und einen niedrigen pH-Wert in der Nährlösung ergaben sich keine Ertragsunterschiede im Vergleich zur NO_3^- -Ernährung (Abb. 38). Wie in den vorangegangenen Versuchen unterschieden sich auch in diesem Versuch die Trockensubstanzgehalte der Früchte nicht und lagen bei allen Varianten zwischen 6,5 und 7,5% (ohne Abb.), was deutlich niedriger war als bei den Früchten vorangegangener Wasserkulturversuche, die Trockensubstanzgehalte um 10% aufwiesen.

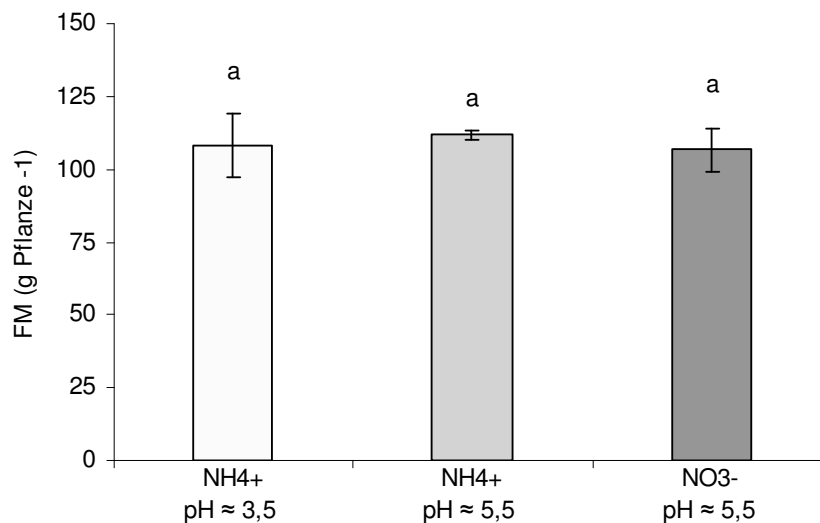


Abb. 38: Fruchtertrag bei unterschiedlicher N-Ernährung und unterschiedlichem pH-Wert in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede gab ($P = 5\%$).

3.3.2.2 Zuckerkonzentrationen

Abb. 39 zeigt, dass die Zuckerkonzentrationen in den Früchten weder durch NH_4^+ -Ernährung noch durch den niedrigen pH-Wert in der Nährlösung beeinflusst wurden.

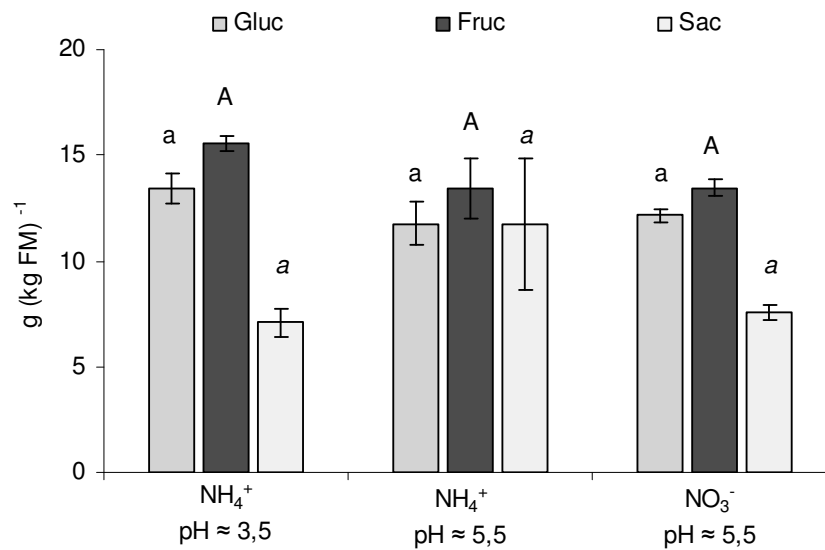


Abb. 39: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Konzentrationen von Glucose, Fructose und Saccharose bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.3.2.3 Titrierbare Säure

In Abb. 40 ist der Einfluss des niedrigen pH-Wertes in der Nährlösung bei NH_4^+ -Ernährung, auf die titrierbare Säure zu sehen. Die Konzentration an titrierbarer Säure war hier niedriger als bei NH_4^+ -Ernährung und moderatem pH-Wert. In diesem Versuch konnte kein signifikanter Unterschied zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung festgestellt werden. Um die Konzentrationen an Citrat, Malat, Succinat und Ascorbat zu untersuchen, wurden entsprechende HPLC-Analysen durchgeführt.

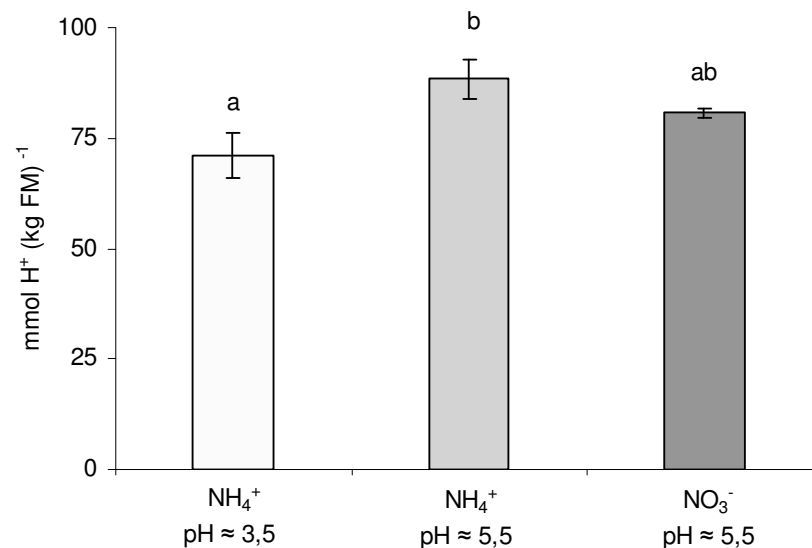


Abb. 40: Titrierbare Säure bei NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung und unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.3.2.4 Hauptsäuren

Wie im vorangegangenen Versuch (Abb. 31) ist auch hier deutlich zu erkennen, dass die dominierenden Säuren in den Erdbeerfrüchten der Sorte Elsanta Zitronensäure, Äpfelsäure und Bernsteinsäure sind. Bei niedrigem pH-Wert in der Nährlösung wurden auch in diesem Versuch signifikant weniger ihrer Anionen in den Früchten gefunden (Abb. 41), das Verhältnis der Anionen zueinander blieb gleich. Bei moderatem pH-Wert gab es weder in der Gesamtkonzentration an Säuren noch in den einzelnen Konzentrationen von Citrat, Malat, Succinat und Ascorbat Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung der Pflanzen.

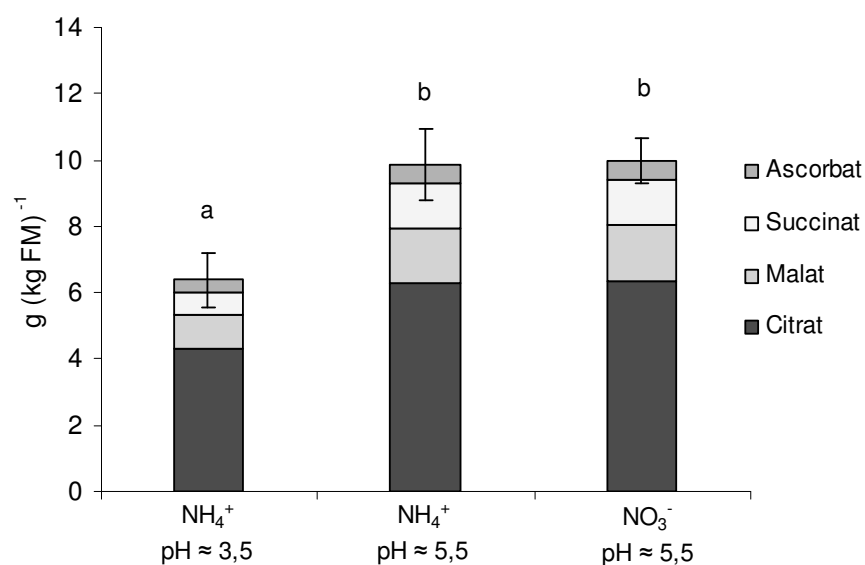


Abb. 41: Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Konzentrationen an Citrat, Malat, Succinat und Ascorbat bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.3.2.5 Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten

In diesem Versuch wurde zusätzlich die Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten untersucht, um die gesamten organischen Anionen zu erfassen. Wie bei allen Untersuchungen der Früchte wurde die Konzentration der organischen Anionen auf die Fruchtfrischmasse bezogen. Das Ergebnis (Abb. 42) bestätigt die Untersuchungsergebnisse der titrierbaren Säure (Abb. 40) und der HPLC- Analyse (Abb. 41).

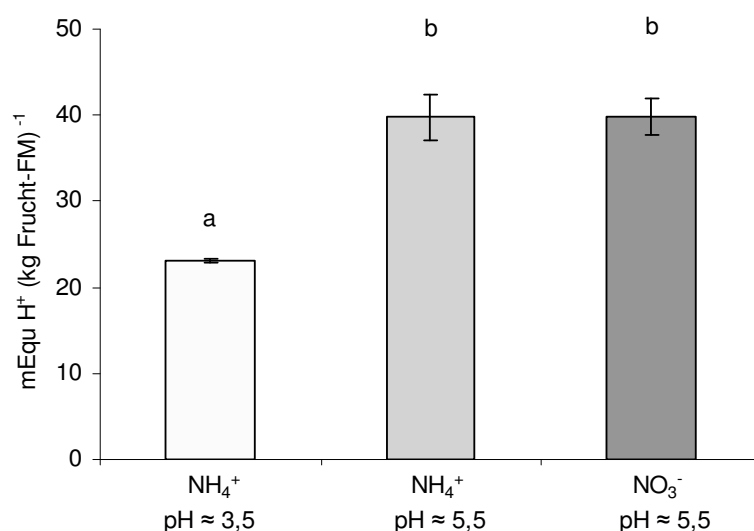


Abb. 42: Einfluss von NH₄⁺- und NO₃⁻-Ernährung auf die Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten bei unterschiedlichen pH-Werten in der Nährlösung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus drei Wiederholungen ± Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Es wird deutlich, dass eine NH₄⁺- oder NO₃⁻-Ernährung der Pflanzen keine Auswirkung auf die Säurekonzentrationen in den Früchten hat, wenn der pH-Wert des Nährmediums bei NH₄⁺-Ernährung nicht unter pH 5,5 absinkt.

3.4 Bodenkulturversuch I

Die Bodenkulturversuche wurden durchgeführt, um die in Wasserkultur gefundenen Ergebnisse für Bodenverhältnisse zu überprüfen. Bei dem Bodenkulturversuch I wurden keine Wurzeln geerntet.

3.4.1 Untersuchungen des Sprosses

3.4.1.1 Sprosstrockenmasse

In Bodenkultur war deutlich zu erkennen, dass sich der Spross in den einzelnen Ernährungsvarianten unterschiedlich entwickelte. Auffällig ist die geringe Sprossmasse bei den Pflanzen, die mit NO_3^- -N ernährt wurden. Wie in Abb. 43 zu sehen ist, konnte das Ergebnis durch die hohen Standardabweichungen in den beiden NH_4^+ -Varianten, von etwa 3 g Pflanze⁻¹, statistisch nicht abgesichert werden. Dass bei den Pflanzen der NO_3^- -Variante das Wachstum gehemmt war, zeigen zusätzlich die hohen Trockensubstanzgehalte dieser Variante.

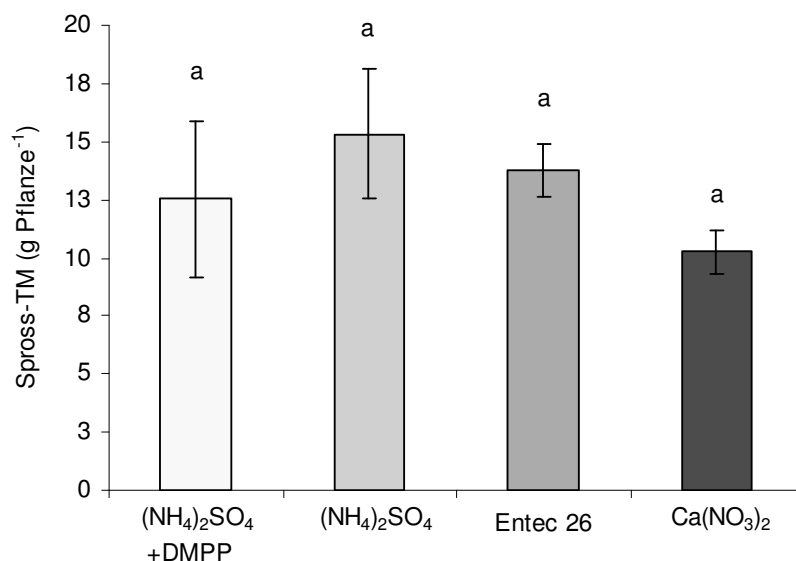


Abb. 43: Einfluss verschiedener N-Dünger auf die Sprosstrockenmasse. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

Die Trockensubstanzgehalte der NO_3^- -Variante lagen mit einem Anteil von 33,5% an der Frischmasse um etwa 42 – 55% höher als in den drei anderen Ernährungsvarianten (Abb. 44).

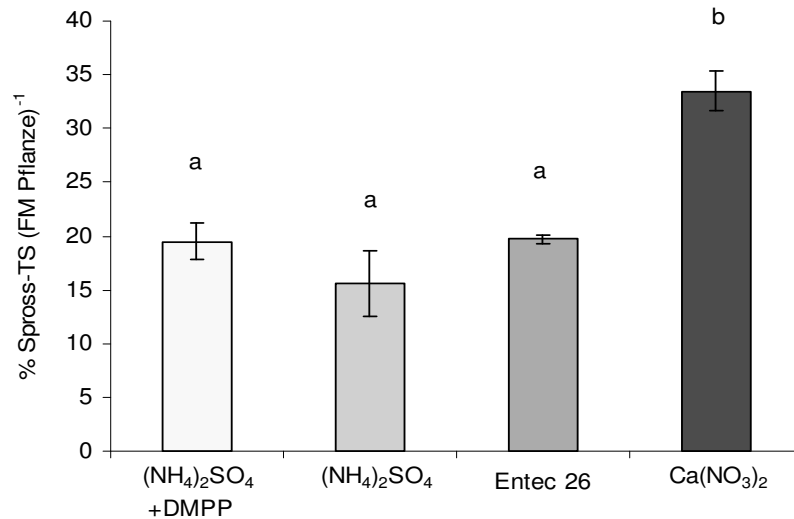


Abb. 44: Einfluss verschiedener N-Dünger auf die Sprosstrockensubstanz. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

3.4.1.2 Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Bei der Betrachtung der Makronährstoffkonzentrationen (Tab. 18) waren auch in Bodenkultur, genauso wie in den Wasserkulturversuchen hohe Ca-Konzentrationen bei NO_3^- -Ernährung festzustellen. Bei NH_4^+ -betonter Ernährung der Pflanzen lagen die Konzentrationen an Mg niedriger als in allen anderen Varianten.

Tab. 18: Mineralstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [%Trockensubstanz]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + DMPP	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Entec 26	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	1,08 a	1,26 a	1,16 a	2,22 b
<i>K</i>	1,50 - 2,50	1,55 ab	1,57 a	1,37 ab	1,31 b
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,38 a	0,43 b	0,43 b	0,43 b

Tab. 19: Mikronährstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mikronährstoffe im Spross [$\mu\text{g} (\text{g TM})^{-1}$]	Grenzwerte nach Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + DMPP	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Entec 26	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Cu</i>	7 - 15	6 a	6 a	5 a	5 a
<i>Mn</i>	40 - 100	183 a	358 a	173 a	82 b
<i>Fe</i>	keine Angaben	267 a	247 a	204 a	322 a
<i>Zn</i>	20 - 70	35 ab	52 a	30 ab	18 b

Bei den Mikronährstoffen waren die Konzentrationen an Mn und Zn bei NO_3^- -Ernährung signifikant niedriger als in allen anderen Varianten.

3.4.1.3 Anionenkonzentrationen im Spross und in den Früchten

In Abb. 45 ist deutlich bei NH_4^+ -Ernährung mit DMPP, im Vergleich zur NH_4^+ -Variante ohne DMPP, die nitrifikationshemmende Wirkung des DMPP zu erkennen. Im Spross und in den Früchten waren die NO_3^- -Konzentrationen signifikant niedriger als in allen anderen Varianten. Interessant sind die erhöhten Cl^- -Konzentrationen, die darauf hinweisen, dass ein Defizit an NO_3^- mit einer verstärkten Aufnahme von Cl^- ausgeglichen wurde. Phosphat lag in der NO_3^- -Variante im Spross und in den Früchten in signifikant niedrigeren Konzentrationen vor. Die SO_4^- -Konzentrationen wurden von der N-Form weder im Spross, noch in den Früchten beeinflusst. Doch liegt SO_4^- in den Früchten in allen Varianten in höheren Konzentrationen als im Spross vor. Die Gesamtkonzentrationen der anorganischen Anionen in Spross und Früchten unterschieden sich in den Varianten kaum.

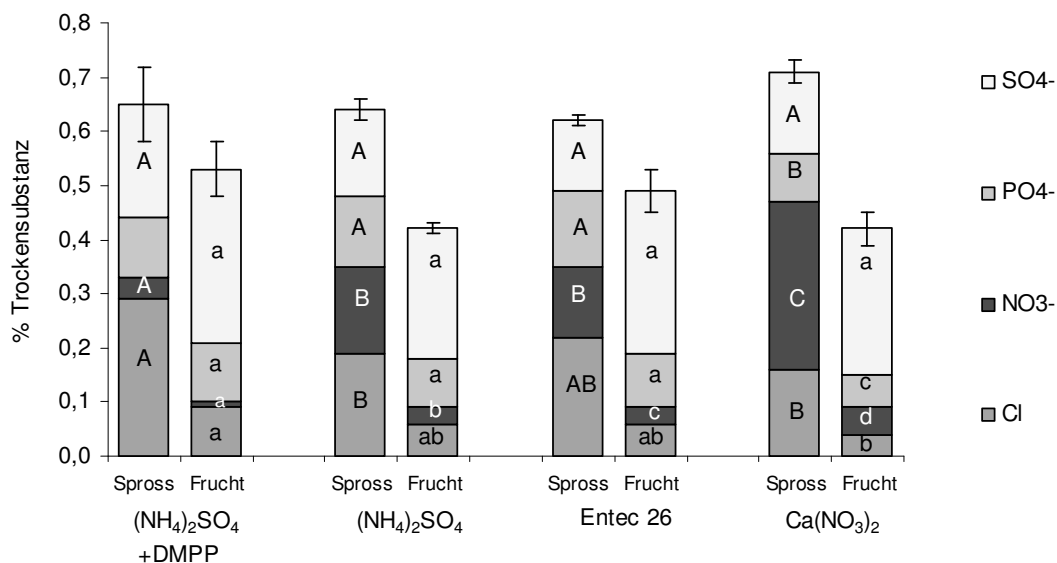


Abb. 45: Einfluss verschiedener N-Ernährungsformen auf die Konzentrationen an Anionen im Spross und in den Früchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im Spross, Kleinbuchstaben beziehen sich auf Unterschiede in den Früchten ($P = 5\%$).

3.4.1.4 Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross

Ein deutlicher Einfluss der NO_3^- -Ernährung auf die Konzentrationen an organischen Anionen ist in Abb. 46 zu erkennen. Die Konzentrationen der Anionen waren bei NO_3^- -Ernährung am höchsten und nahmen über die Mischvarianten, die mit beiden N-Formen ernährt wurden, bis zur NH_4^+ -Variante mit DMPP ab.

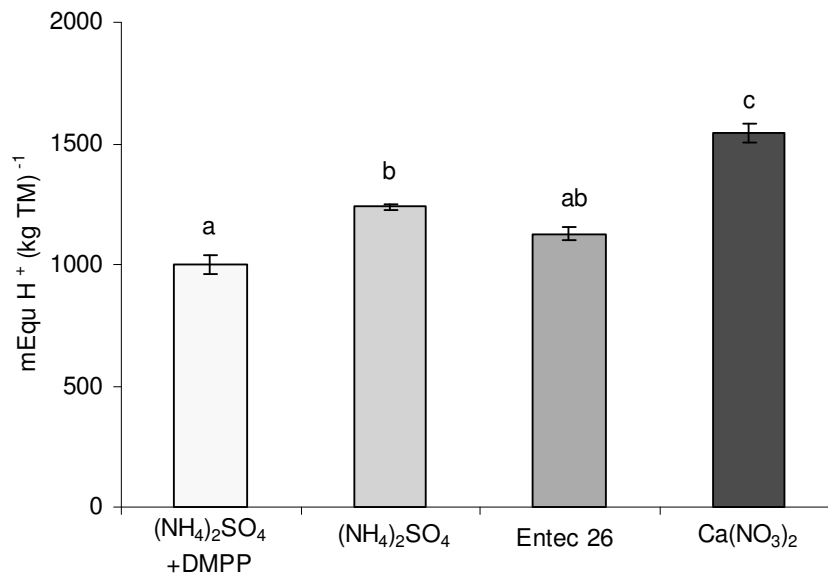


Abb. 46: Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross bei unterschiedlicher N-Düngung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

3.4.2 Ergebnisse der Bodenanalysen

3.4.2.1 pH-Wert des Bodens

Deutlich ist der signifikant höhere pH-Wert im Boden der NO_3^- -Variante zu erkennen (Abb. 47). Wie in Abb. 48 zu sehen ist, hatte dies einen Einfluss auf das pflanzlich verfügbare Mn.

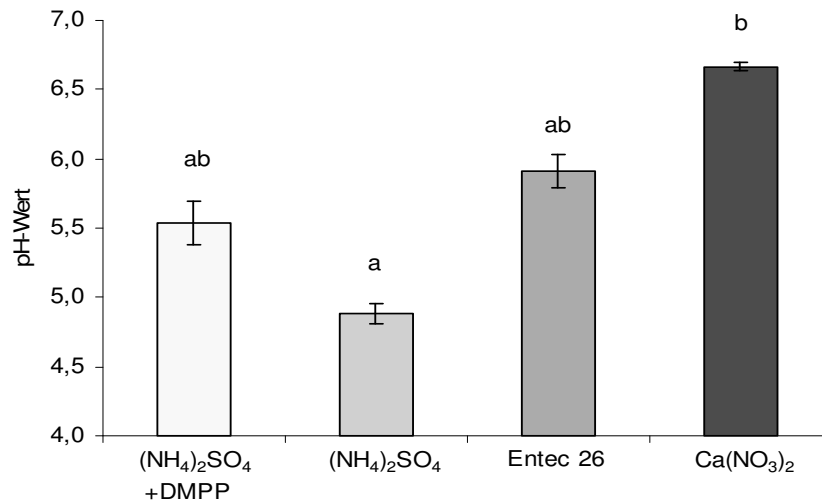


Abb. 47: Der pH-Wert des Bodens nach 10 Wochen Kulturdauer bei unterschiedlicher N-Düngung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

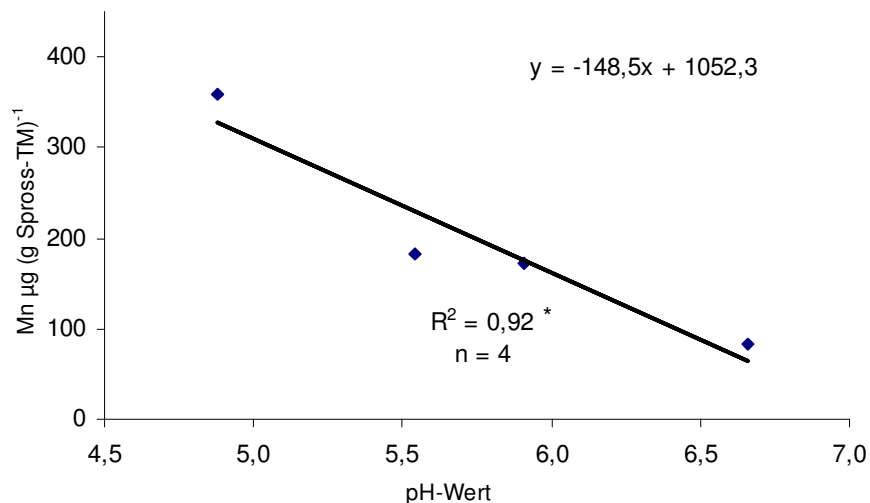


Abb. 48: Beziehung zwischen dem pH-Wert im Boden und den Mn-Konzentrationen im Spross. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. R^2 gibt das Bestimmtheitsmaß an, * zeigt dass es sich hier um eine signifikante Korrelation handelt (P = 5%).

3.4.3 Untersuchungen der Früchte

Die Ergebnisse der Fruchtuntersuchungen wurden, wie auch schon in den Wasserkulturversuchen, auf die Frischmasse bezogen. Ein Unterschied zwischen den Varianten war nicht zu erwarten, da sich die Wassergehalte, anders als im Spross, in den Früchten nicht unterscheiden.

3.4.3.1 Fruchtfrischmasse

Der Fruchtertrag in der NO_3^- -Variante war tendenziell niedriger als bei den anderen Varianten (Abb. 49). In den Trockensubstanzgehalten zeigte sich diese Tendenz nicht. Hier gab es keine Unterschiede, die Werte schwankten zwischen 9,5 und 11% (ohne Abb.).

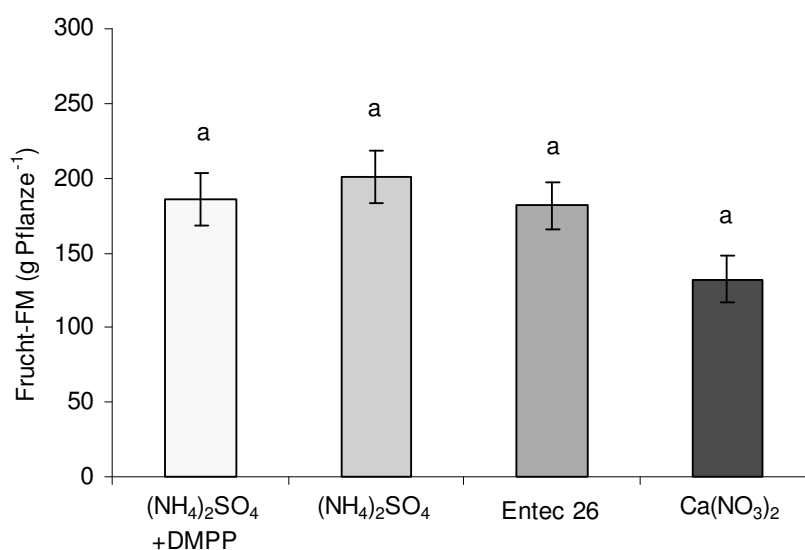


Abb. 49: Einfluss verschiedener N-Dünger auf die Fruchtfrischmasse. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.4.3.2 Zuckerkonzentrationen

Wie in Abb. 50 zu sehen ist, wurden auch in Bodenkultur keine Unterschiede in den Zuckerkonzentrationen zwischen den Varianten festgestellt. Auch in diesem Versuch lagen die Konzentrationen für Glucose und Fructose in allen Varianten eng beieinander, wobei die Werte für Glucose bei etwa $20 \text{ g (kg Fruchtfrischmasse)}^{-1}$ lagen und für Fructose um $21 - 22 \text{ g (kg Fruchtfrischmasse)}^{-1}$. Wie in allen anderen Versuchen waren die Werte für Saccharose um 30 – 40% niedriger.

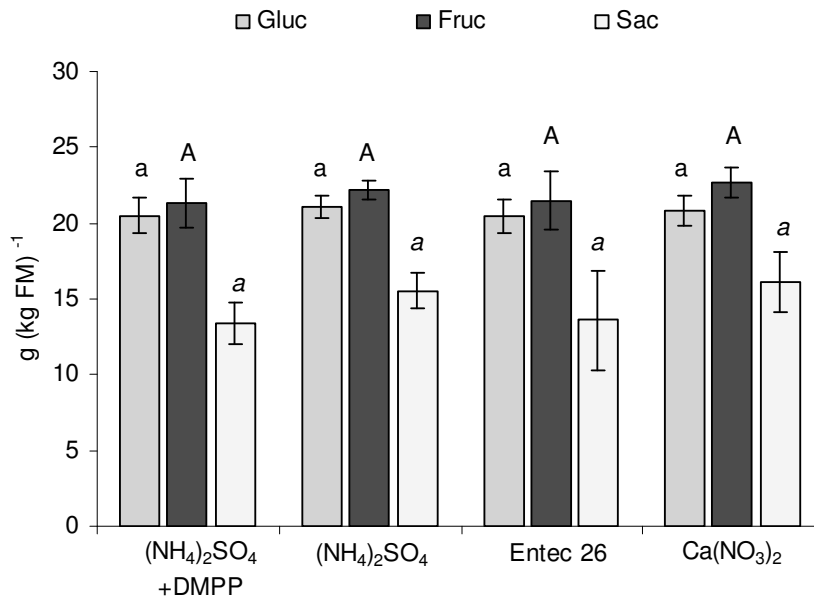


Abb. 50: Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose in den Früchten bei unterschiedlicher N-Düngung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.4.3.3 Titrierbare Säure

Die titrierbare Säure war bei allen Varianten gleich (Abb. 51).

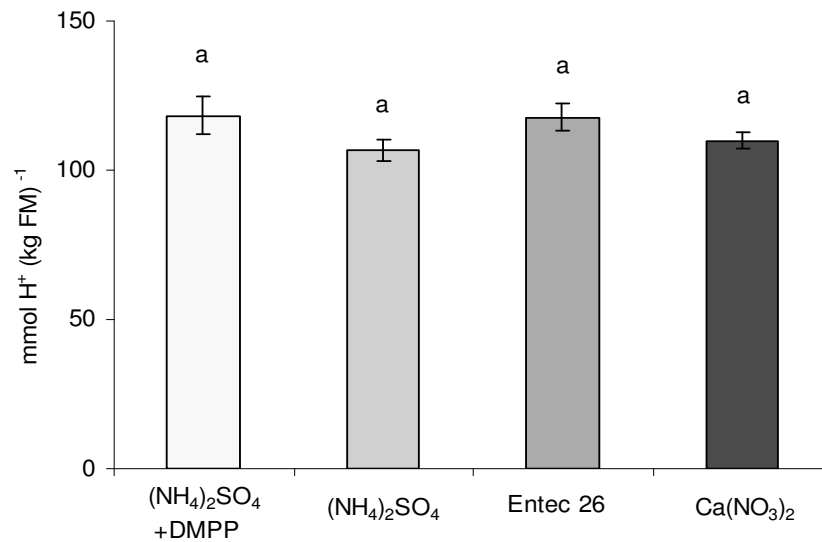


Abb. 51: Titrierbare Säure in den Früchten bei unterschiedlicher N-Düngung. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.4.3.4 Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten

Auch bei den organischen Anionen, die in ihrer Gesamtheit durch die Alkalität der pflanzlichen Asche erfasst werden, konnten in den Früchten, keine Unterschiede zwischen den N-Düngungsvarianten festgestellt werden (Abb. 52).

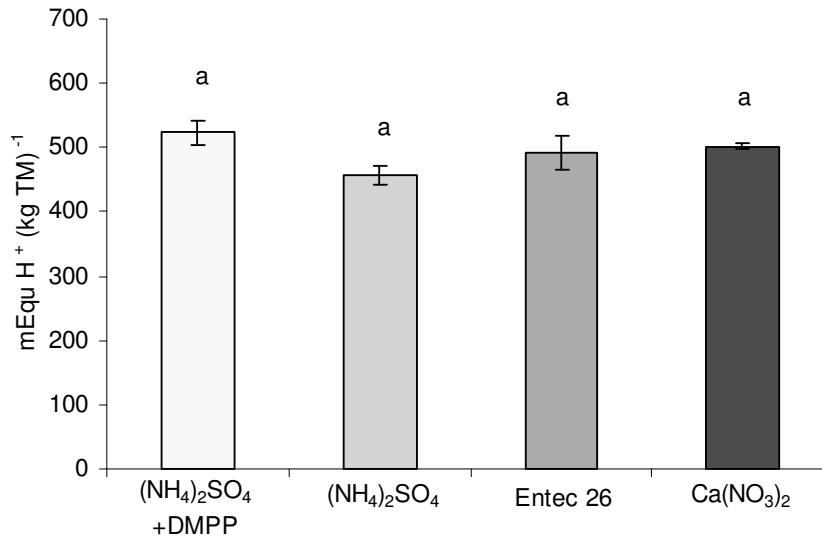


Abb. 52: Einfluss verschiedener N-Dünger auf die Alkalität der pflanzlichen Asche in den Früchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.5 Bodenkultur II

Dieser Versuch wurde durchgeführt, um die Auswirkung unterschiedlicher N-Düngereformen und unterschiedlicher N-Konzentrationen auf Inhaltsstoffe in Erdbeeren zu untersuchen. In diesem Versuch wurden die Wurzeln, der Spross und die Früchte untersucht.

3.5.1 Ergebnisse der Wurzel- und Sprossanalysen

3.5.1.1 Wurzeltrockenmasse und Trockensubstanzgehalte

In der Wurzeltrockenmasse konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Abb. 53).

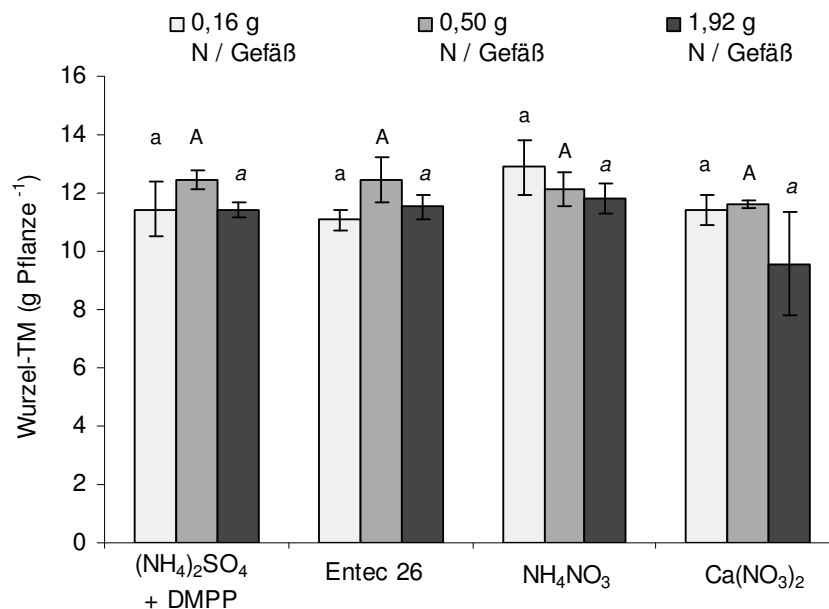


Abb. 53: Wurzeltrockenmasse bei verschiedenen N-Düngereformen und N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

Vergleicht man die Trockensubstanzgehalte der Varianten bei 1,92 g N Gefäß⁻¹ miteinander, so wird deutlich, dass in der NO₃⁻-Variante der Trockenmassegehalt signifikant höher war als in den anderen Ernährungsvarianten.

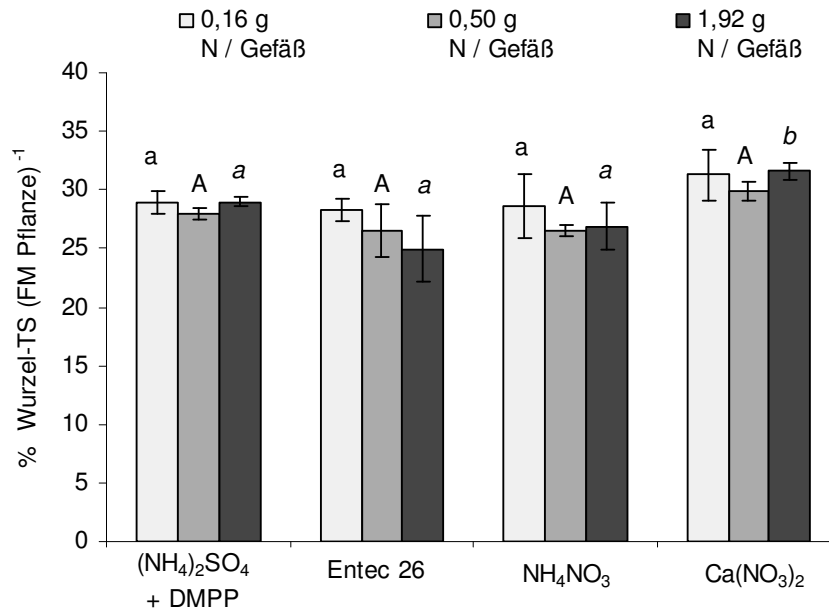


Abb. 54: Wurzeltrockensubstanzgehalte bei verschiedenen N-Düngeformen und N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen ± Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten an (P = 5%).

3.5.1.2 Sprosstrockenmasse

Bei der Sprossmasse war, wie im Bodenkulturversuch I (Abb. 44), eine Tendenz zur niedrigeren Sprossmassebildung in der NO_3^- -Variante zu erkennen, die sich mit zunehmender Konzentration an N Gefäß⁻¹ noch verstärkte. In den Trockensubstanzgehalten gab es in diesem Versuch keine Unterschiede zwischen den Varianten. Die Werte schwankten zwischen 25 - 28 % (ohne Abb.).

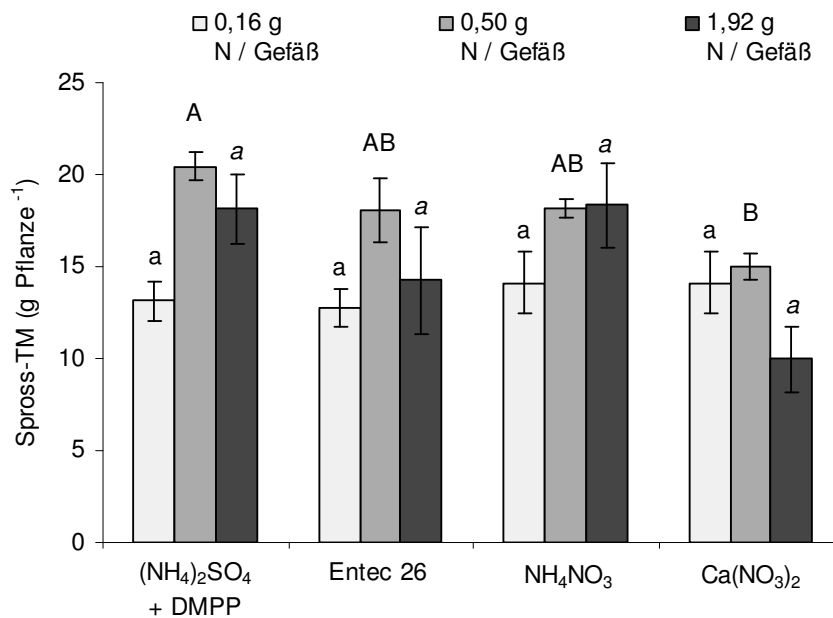


Abb. 55: Sprosstrockenmasse bei unterschiedlichen N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten an ($P = 5\%$).

3.5.1.3 Makro- und Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Die Mineralstoffkonzentrationen im Spross zeigten besonders in der Variante mit hohen N-Konzentrationen signifikante Unterschiede zwischen den N-Formen (Tab. 20). Auch in diesem Versuch waren die hohen Ca-Konzentrationen in der NO_3^- -Variante auffällig. Wohingegen die Konzentration an K im Vergleich zu den anderen Varianten signifikant niedriger war. Mit dem Anstieg der N-Düngemenge Gefäß⁻¹ verstärkte sich dieser Effekt.

Tab. 20: Einfluss unterschiedlicher N-Formen und N-Düngemengen auf die Mineralstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (P = 5%).

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [% Trockensubstanz]					
0,16 g N Gefäß⁻¹	Grenzwerte Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +DMPP	Entec 26	NH_4NO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	1,53 a	1,26 a	1,51 a	1,41 a
<i>K</i>	1,50 - 2,50	2,13 a	1,98 a	1,95 a	1,99 a
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,24 a	0,24 a	0,33 b	0,31 ab

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [% Trockensubstanz]					
0,50 g N Gefäß⁻¹	Grenzwerte Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +DMPP	Entec 26	NH_4NO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	1,10 a	1,36 a	1,37 a	1,45 a
<i>K</i>	1,50 - 2,50	2,45 a	2,13 b	2,18 b	2,02 c
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,28 a	0,29 a	0,35 a	0,34 a

Mineralstoffkonzentrationen im Spross [% Trockensubstanz]					
1,92 g N Gefäß⁻¹	Grenzwerte Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +DMPP	Entec 26	NH_4NO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Ca</i>	0,80 - 1,50	1,22 a	1,42 a	1,51 a	1,93 b
<i>K</i>	1,50 - 2,50	1,97 a	2,05 ab	2,18 b	1,73 c
<i>Mg</i>	0,25 - 0,60	0,33 a	0,38 ab	0,40 b	0,37 ab

Wie in Tab. 21 zu sehen ist, unterschieden sich die Konzentrationen an Mikronährstoffen im Spross deutlich. Die Konzentrationen für Cu lagen unter den Grenzwerten von Bergmann (1993). Eine Interpretation in Abhängigkeit von diesen Grenzwerten beinhaltet jedoch den Fehler, dass die zu analysierende Sprossmasse am Ende der Vegetationsperiode geerntet wurde, wohingegen Bergmann (1993) Sprossmaterial vor der Fruchtbildung für seine Analysen verwendete. Bei den höheren N-Düngemengen lagen die Werte für Mn besonders in der NO_3^- -Variante in signifikant geringeren Konzentrationen vor als in den anderen Varianten. Hauptsächlich bei N-Gaben von $1,92 \text{ g N Gefäß}^{-1}$ wurden in der NO_3^- -Variante weniger Mikronährstoffe wie Cu, Mn und Zn von den Pflanzen aufgenommen.

Tab. 21: Mikronährstoffkonzentrationen im Spross nach der Fruchternte. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ($P = 5\%$).

Mikronährstoffkonzentrationen im Spross [$\mu\text{g (g TM)}^{-1}$]					
0,16 g N Gefäß⁻¹	Grenzwerte Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +DMPP	Entec 26	NH_4NO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Cu</i>	7 - 15	3 a	5 a	5 a	4 a
<i>Mn</i>	40 - 100	78 ab	91 a	80 ab	70 b
<i>Fe</i>	<i>keine Angaben</i>	273 a	275 a	378 a	309 a
<i>Zn</i>	20 - 70	45 a	37 a	39 a	44 a

Mikronährstoffkonzentrationen im Spross [$\mu\text{g (g TM)}^{-1}$]					
0,5 g N Gefäß⁻¹	Grenzwerte Bergmann 1993	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ +DMPP	Entec 26	NH_4NO_3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
<i>Cu</i>	7 - 15	4 a	4 a	4 a	4 a
<i>Mn</i>	40 - 100	106 a	92 a	86 b	71 b
<i>Fe</i>	<i>keine Angaben</i>	273 a	206 a	334 a	336 a
<i>Zn</i>	20 - 70	38 a	42 a	46 a	37 a

Mikronährstoffkonzentrationen im Spross [$\mu\text{g (g TM)}^{-1}$]					
1,92 g N Gefäß ⁻¹	Grenzwerte Bergmann1993	(NH ₄) ₂ SO ₄ +DMPP	Entec 26	NH ₄ NO ₃	Ca(NO ₃) ₂
<i>Cu</i>	7 - 15	6 a	5 ab	5 ab	4 b
<i>Mn</i>	40 - 100	133 a	138 a	208 b	90 c
<i>Fe</i>	keine Angaben	201 a	142 a	298 a	330 a
<i>Zn</i>	20 - 70	49 a	50 a	49 a	40 b

3.5.1.4 Alkalität der pflanzlichen Asche in Wurzel und Spross

Wie erwartet waren die Konzentrationen organischer Anionen in der Wurzel (Abb. 56) und im Spross (Abb. 57) der NO₃⁻-Variante signifikant höher als bei den anderen Varianten. Im Spross nahmen mit zunehmenden N-Düngegaben die Konzentrationen zu. Diese Beziehung war in der Wurzel nicht zu beobachten.

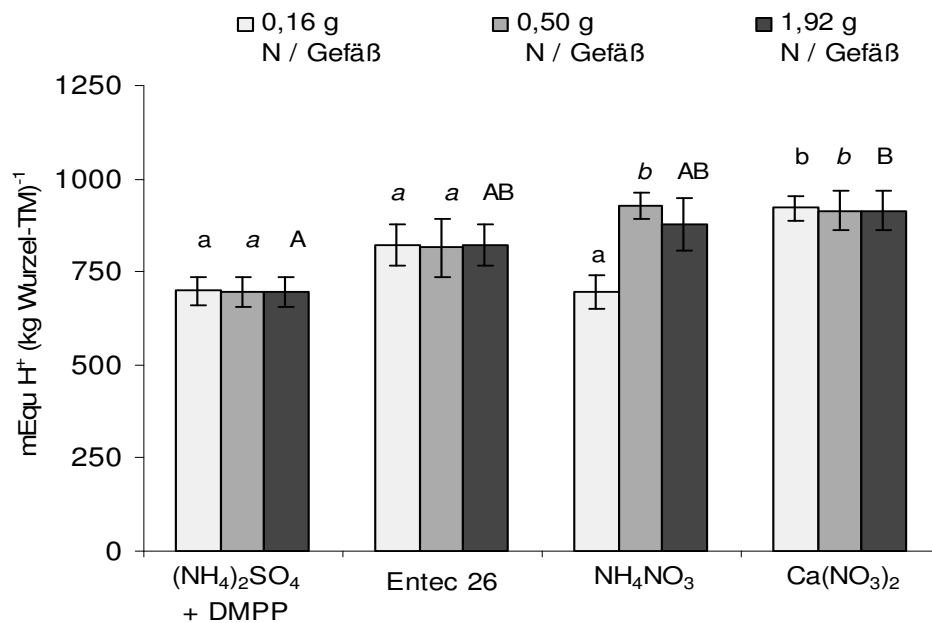


Abb. 56: Alkalität der pflanzlichen Asche in den Wurzeln bei verschiedenen N-Düngemitteln und N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten an ($P = 5\%$).

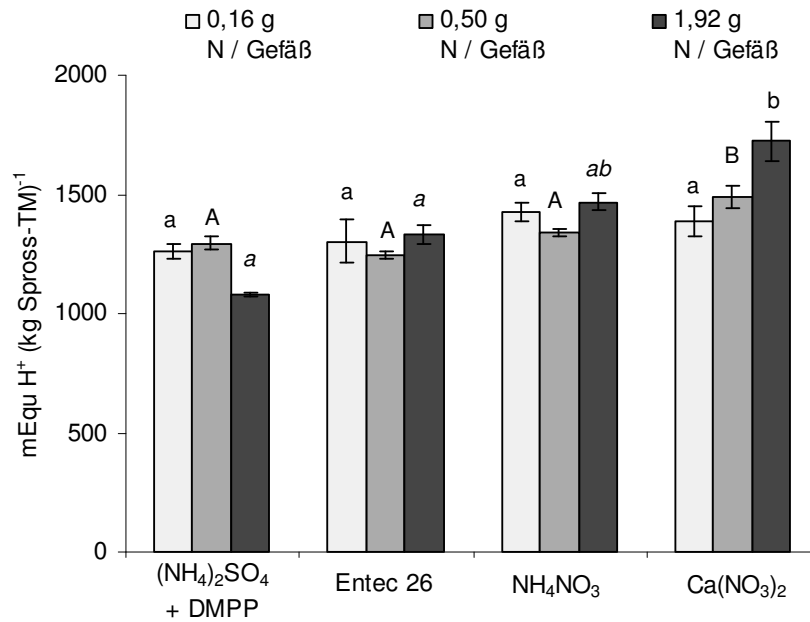


Abb. 57: Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross bei verschiedenen N-Düngeformen und unterschiedlichen N-Düngekonzentrationen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten an ($P = 5\%$).

3.5.2 Bodenanalysen

3.5.2.1 pH-Wert im Boden

Der pH-Wert im Boden war in diesem Versuch genauso wie im vorangehenden Bodenkulturversuch (Abb. 47) bei NO_3^- -Ernährung der Pflanzen und N-Konzentrationen von 0,50 und 1,92 g N Gefäß⁻¹ signifikant höher als bei den anderen N-Düngevarianten. Die Boden-pH-Werte bei N-Konzentrationen von 0,16 g Gefäß⁻¹ unterschieden sich nicht voneinander (Abb. 58).

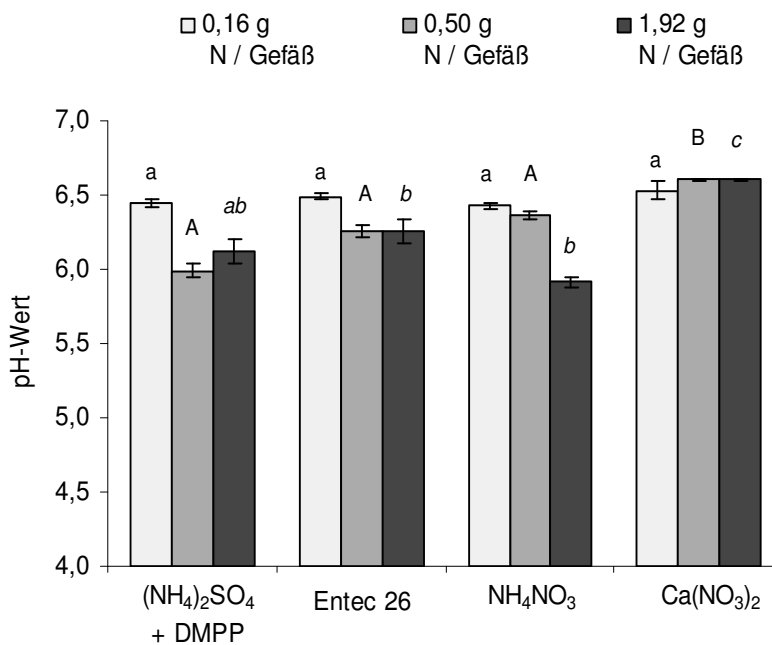


Abb. 58: Der pH-Wert im Boden nach acht Wochen Kulturdauer unter dem Einfluss verschiedener N-Düngeformen und N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten an ($P = 5\%$).

3.5.2.2 Beziehung zwischen pH-Wert des Bodens und Mn-Konzentrationen im Spross

Bei hohen NO_3^- -N-Düngegaben von $0,50 \text{ g N Gefäß}^{-1}$ (A) und $1,92 \text{ g N Gefäß}^{-1}$ (B) bestand eine enge Korrelation zwischen pH-Wert und Mn-Konzentrationen im Spross, bei Düngegaben von $0,16 \text{ g N Gefäß}^{-1}$ bestand diese Beziehung nicht (ohne Abb.).

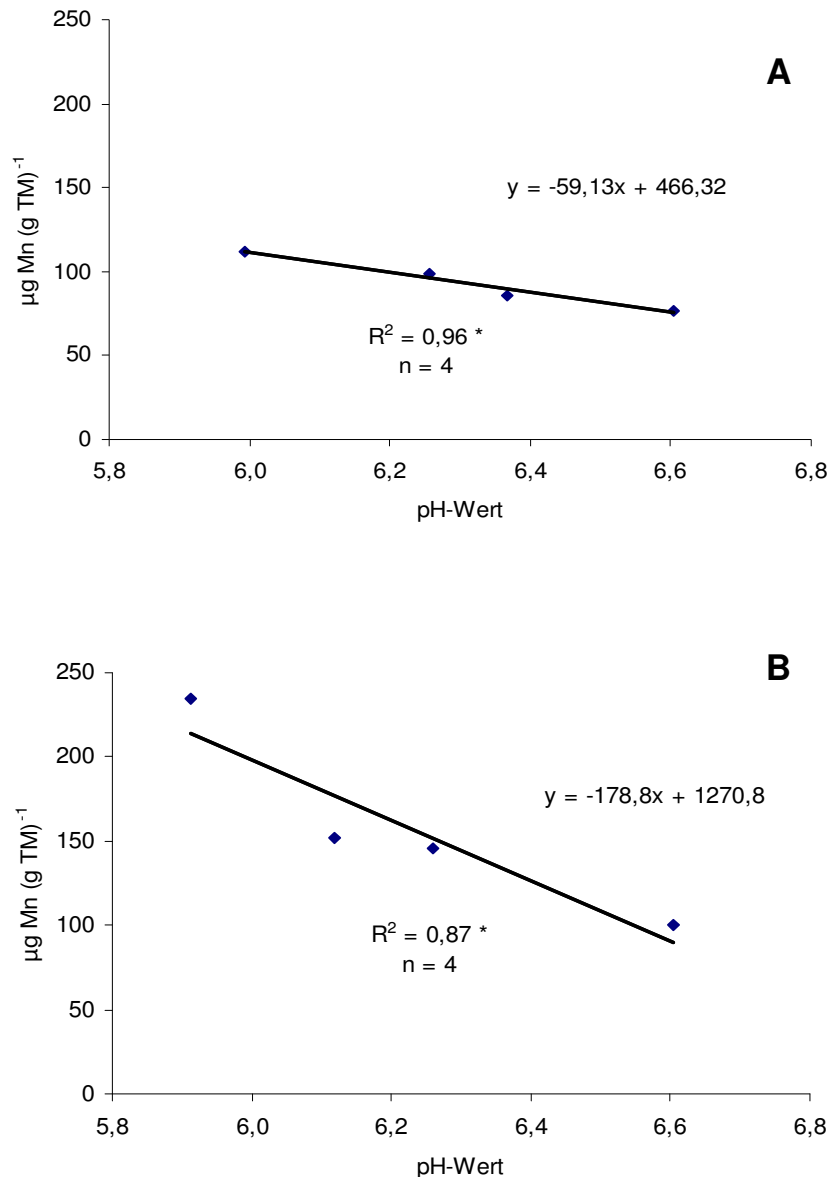


Abb. 59: Beziehung zwischen pH-Wert im Boden und Mn-Konzentrationen im Spross bei $0,50 \text{ g NO}_3^-$ -N Gefäß^{-1} (A) und bei $1,92 \text{ g NO}_3^-$ -N Gefäß^{-1} (B). Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen. R^2 gibt das Bestimmtheitsmaß an, * zeigt die Signifikanz der Korrelation ($P = 5\%$).

Untersuchungen der Früchte

3.5.2.3 Fruchtfrischmasse

Die Ertragsbildung zwischen den einzelnen Varianten war nicht signifikant unterschiedlich, doch lässt sich in den Pflanzen der Variante die mit $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ernährt wurde erkennen, dass die Erträge tendenziell niedriger lagen als bei den anderen Varianten (Abb. 60). Außerdem nahm der Ertrag mit zunehmender N-Düngemenge in dieser Variante ab. Innerhalb der drei verschiedenen Düngestufen gab es keine Unterschiede in den Trockensubstanzgehalten der Früchte (ohne Abb.), so dass auch hier die weiteren Ergebnisse auf die Fruchtfrischmasse berechnet wurden.

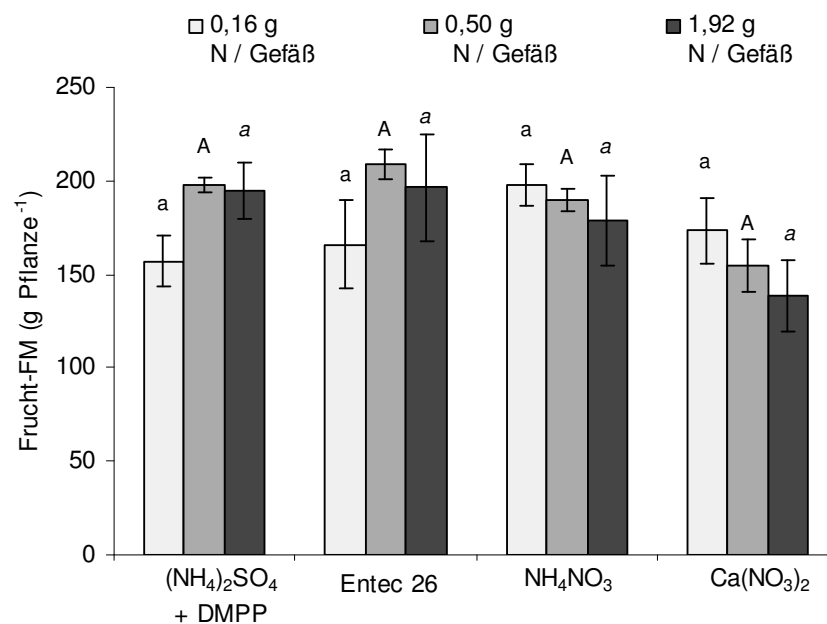


Abb. 60: Fruchtertrag bei unterschiedlichen N-Düngemengen und abgestuften N-Düngemengen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.5.2.4 Zuckerkonzentrationen

Die Zuckerkonzentrationen folgten keinem erkennbaren Muster. Die Konzentrationen an Fructose in der NO_3^- -Variante war bei mittlerer Düngestufe signifikant höher als in den anderen Varianten (Abb. 64). Bei Glucose und Saccharose gab es in allen Düngegraden zwischen den Varianten keine Unterschiede (Abb. 61 und Abb. 63).

Glucose

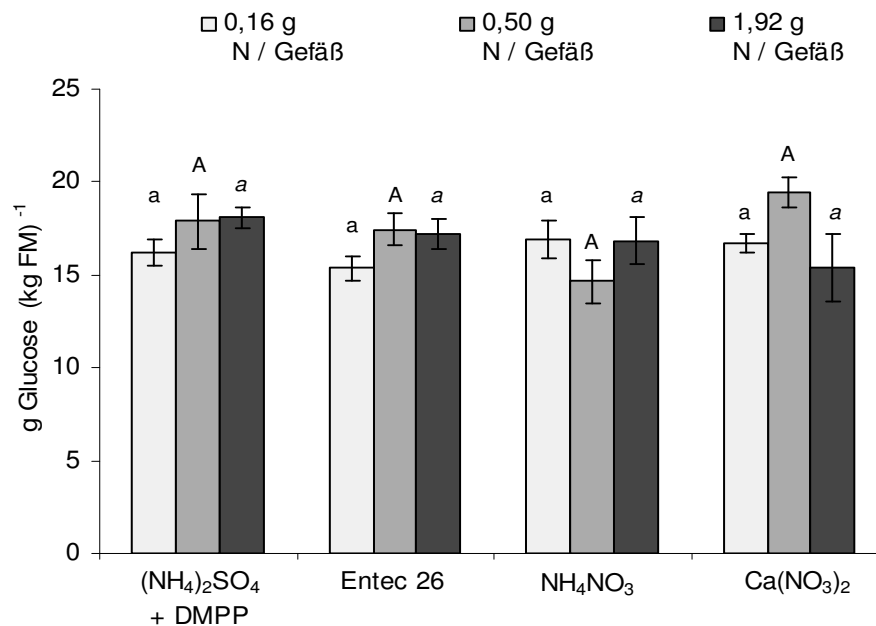


Abb. 61: Einfluss verschiedener N-Düngeformen und N-Düngekonzentrationen auf die Glucosekonzentrationen in Erdbeerfrüchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede gab ($P = 5\%$).

Fructose

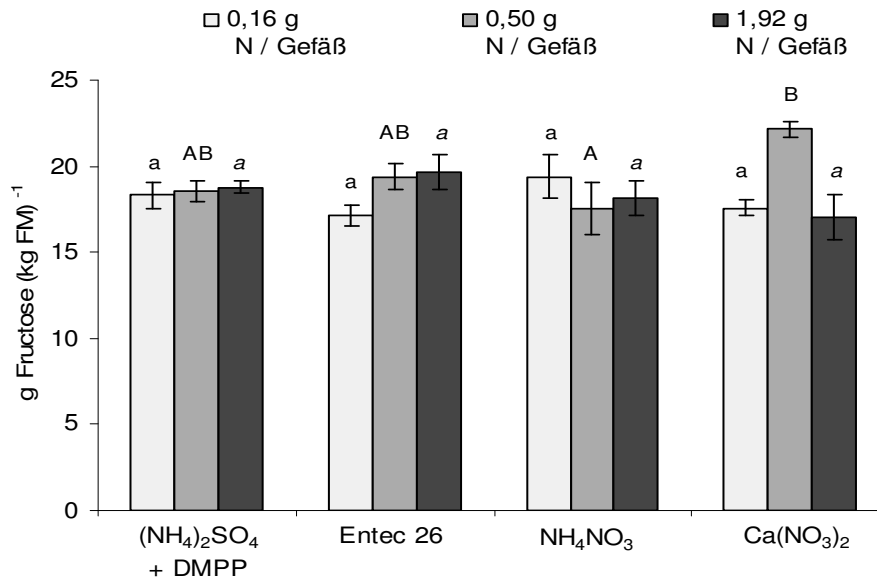


Abb. 62: Einfluss verschiedener N-Düngereformen und N-Düngemengen auf die Fructosekonzentrationen in Erdbeerfrüchten. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bei 0,50g N Gefäß⁻¹ an (P = 5%).

Saccharose

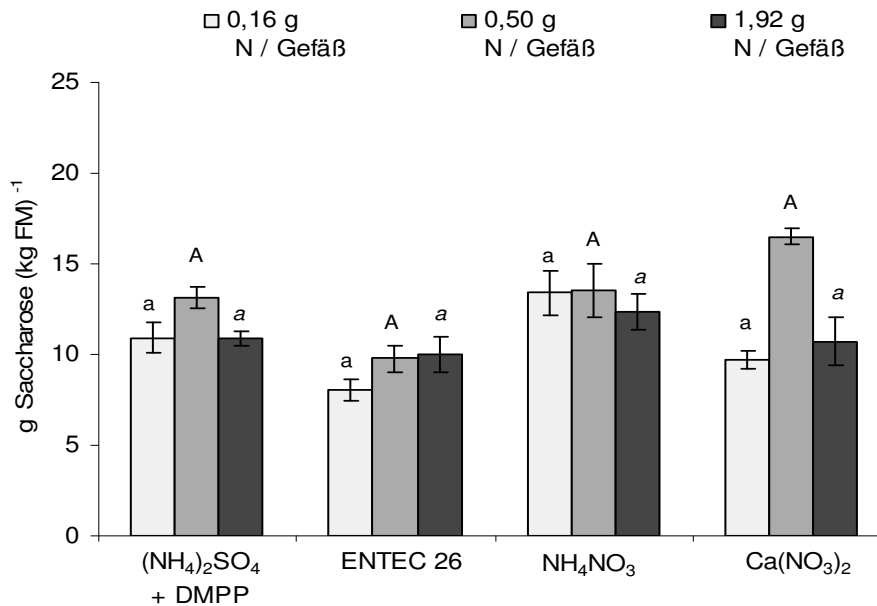


Abb. 63: Einfluss verschiedener N-Düngereformen und N-Düngemengen auf die Saccharosekonzentrationen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Gleiche Buchstaben zeigen, dass es zwischen den Varianten keine signifikanten Unterschiede gab (P = 5%).

3.5.2.5 Titrierbare Säure

Wie im vorangegangenen Bodenkulturversuch (Abb. 51) waren auch in diesem Versuch keine Unterschiede in der titrierbaren Säure zwischen den verschiedenen N-Formen festzustellen. Auch die Düngemenge an N Gefäß⁻¹ hatte keinen signifikanten Einfluss (Abb. 64).

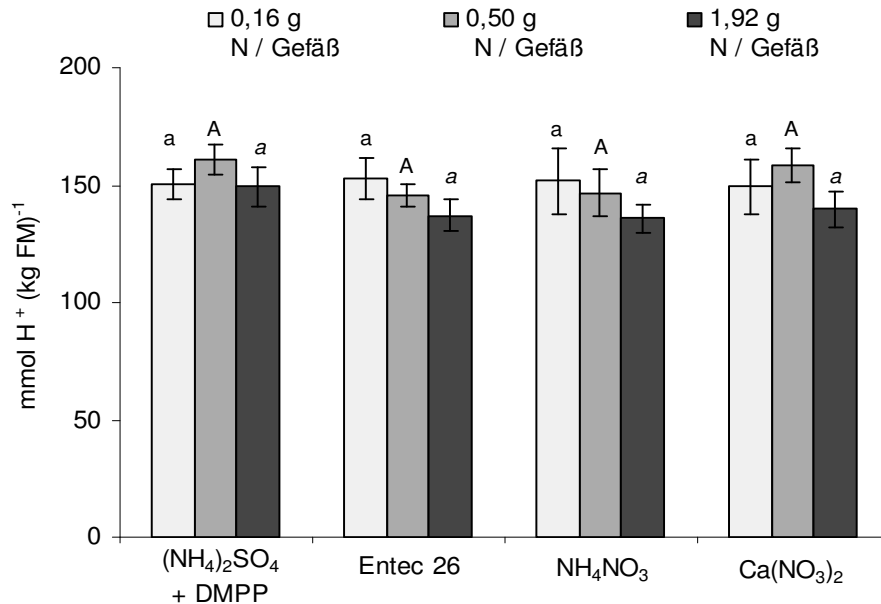


Abb. 64: Titrierbare Säure in den Erdbeerfrüchten bei verschiedenen N-Düngereformen und N-Konzentrationen. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

3.5.2.6 Hauptsäuren in Erdbeerfrüchten

Die Zusammensetzung der organischen Säuren in den Früchten war auch in diesem Versuch mit Zitronensäure, Äpfelsäure und Bernsteinsäure ähnlich wie in den vorangegangenen Wasserkultur- und Bodenkulturversuchen. NH_4^+ - oder NO_3^- -betonte Ernährung der Pflanzen sowie die Konzentration an N-Gefäß^{-1} hatten keinen Einfluss auf organische Säuren in Erdbeerfrüchten.

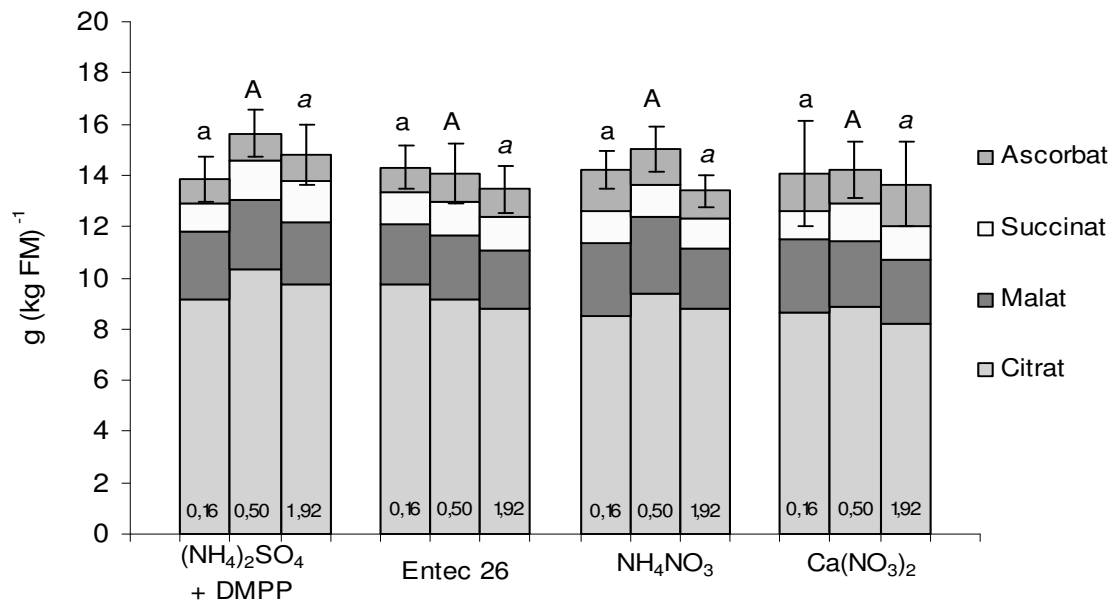


Abb. 65: Konzentrationen an Citrat, Malat, Succinat und Ascorbat in Erdbeerfrüchten bei unterschiedlichen N-Düngevarianten und N-Düngemengen Gefäß^{-1} . Die Zahlen in den Säulen geben die entsprechende Konzentration an N Gefäß^{-1} an. Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte aus vier Wiederholungen \pm Standardfehler. Die gleichen Buchstaben zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten gab ($P = 5\%$).

4 Diskussion

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Experimenten sollte die Wirkung von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf Erdbeeren untersucht werden. Das Hauptziel war, zu klären, inwieweit sich NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf geschmacksrelevante Inhaltsstoffe in Erdbeerfrüchten auswirken.

Die Pflanzenanzucht der Erdbeeren erfolgte in verschiedenen Kulturmedien: In Wasserkultur, um die Auswirkung von NH_4^+ -N und NO_3^- -N auf die Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen und in Bodenkultur, um möglichst praxisrelevant zu arbeiten. Die Ergebnisse von Wasserkulturversuchen können aufgrund der unterschiedlichen Konsistenz des Kultursubstrates nicht vollständig auf Bodenkultur übertragen werden. Zum Beispiel kann ein Teil der Kationen an negative Bodenteilchen gebunden werden, ihre Mobilität wird dadurch im Vergleich zur Wasserkultur eingeschränkt. In Wasserkultur besteht die Möglichkeit, den pH-Wert mit entsprechenden Maßnahmen konstant zu halten, wohingegen sich in schlecht gepufferten Böden der pH-Wert in der Rhizosphäre verschiebt, je nachdem ob z. B. NH_4^+ als Kation oder NO_3^- als Anion aufgenommen wird.

In den hier vorgestellten Untersuchungen hatten die beiden Kulturmedien unterschiedliche Auswirkungen auf das Wachstum und die Inhaltsstoffe der untersuchten Erdbeerpflanzen. Keine Unterschiede konnten in den für die Versuchsfrage relevanten Parametern, wie den Zuckern und organischen Säuren festgestellt werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu bedenken, dass bei einem Vergleich von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung primäre und sekundäre Effekte der unterschiedlichen N-Ernährungsformen nicht exakt auseinander gehalten und entsprechend berücksichtigt werden können (Olsthoorn et al. 1991).

4.1 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Wurzeln von Erdbeerpflanzen

In der Literatur wurde hinreichend beschrieben, dass bei überwiegender Aufnahme von NH_4^+ -N aus dem Nährmedium die Kationenaufnahme die Anionenaufnahme übersteigen kann. Dies ist verbunden mit einer verstärkten Abgabe von H^+ an das Nährmedium, was dann zu einer Ansäuerung führen kann (Raven und Smith 1976, Mengel und Schubert 1985, Mengel 1990, Kafkafi 1990, Schubert et al. 1990, Marschner 1995, Claussen und Lenz 1999). Als wesentliche Ursachen einer Ansäuerung der Rhizosphäre werden die Produktion organischer Säuren zur NH_4^+ -Assimilation sowie eine starke partielle Depolarisation des Membranpotentials durch NH_4^+ -Ernährung gesehen. Hierbei kommt es zu einem starken Efflux von Protonen aus der Wurzel (Schubert und Yan 1997). Daraus resultiert eine Ansäuerung des Nährmediums, welche ein eingeschränktes Wurzelwachstum und eventuell auch eine Reduktion des Sprosswachstums nach sich zieht (Magalhães und Huber 1989, Olsthoorn et al. 1991, Yan et al. 1998).

In dieser Arbeit konnten in den Wasserkulturversuchen mit NH_4^+ -Ernährung ohne Puffersystem (pH-Stat-Anlage), trotz stark abgesunkenem pH-Wert im Nährmedium, keine Unterschiede in der Wurzelmasse zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung festgestellt werden (Abb. 10, Abb. 20 und Abb. 32). Dennoch waren die Trockensubstanzgehalte der Wurzeln in den Wasserkulturversuchen bei NH_4^+ -Ernährung höher als bei NO_3^- -Ernährung (Abb. 11, Abb. 21 und Abb. 33). Auch Sommer et al. (1987) stellten in Salat- und Gemüsekulturen bei verstärkter Ernährung der Pflanzen mit NH_4^+ -N höhere Trockensubstanzgehalte fest als bei Ernährung der Pflanzen mit Kalkammonsalpeter. Sie erklärten dies damit, dass den Pflanzen, die überwiegend NH_4^+ -N aufnehmen, das NO_3^- als

Osmoregulator im Pflanzengewebe fehlt. Gerendás und Sattelmacher (1994) konnten bei jungen Maispflanzen einen erheblichen Einfluss der N-Ernährung auf die Trockensubstanzgehalte feststellen. Sie führten dies darauf zurück, dass sowohl Kalium (K^+) und NO_3^- als auch die im Zuge der pH-Regulation gebildeten organischen Säuren wichtige Elektrolyte für die Pflanzen darstellen. Demzufolge weisen nitratreiche Gewebe meist hohe Wassergehalte auf, während NH_4^+ -Ernährung den Elektrolytgehalt senkt und das osmotische Potential in den Blättern erhöht.

Da NH_4^+ vorwiegend in den Wurzeln assimiliert wird (Raven und Smith 1976, Allen und Smith 1986), benötigen Pflanzen die mit NH_4^+ -N ernährt werden, eine größere Menge an C-Gerüsten, um N in Form von Aminosäuren zum Sink, dem Ort des Assimilatverbrauches zu transportieren (Van Beusichem et al. 1988). NO_3^- -N hingegen kann in Wurzel und Spross assimiliert oder über das Xylem transportiert und in der Vakuole gespeichert werden (Andrews 1986, Wiesler 1997).

Der Einfluss unterschiedlicher N-Ernährungsformen war deutlich an der Wurzelmorphologie der Erdbeerpflanzen zu erkennen. Die Pflanzen der NH_4^+ -Variante zeigten kürzere, stark verzweigte, gelbliche Wurzeln (Abb. 12). Zu beobachten war dies nur, wenn der pH-Wert in der Nährlösung nicht gepuffert wurde und entsprechend sauer war. Nach Raven und Smith (1976) werden diese Veränderungen durch Verätzungen der Wurzelspitze verursacht. Gleiche Beobachtungen machten auch Olsthoorn et al. (1991) an Douglasfichten-Sämlingen, die durch NH_4^+ -Ernährung eine Reduktion der Wurzellänge zeigten, Schortenmeyer (1993), Schubert und Yan (1997) bei Mais sowie Hirano und Hijii (1998) an Japanischen Zedersämlingen.

Wurde der pH-Wert im Nährmedium bei NH_4^+ -Ernährung gepuffert, gab es zwischen den beiden N-Ernährungsformen weder Unterschiede in der Wurzelmorphologie (nicht gezeigt) noch in der Wurzelmasse (Abb. 20 und Abb. 32). Magalhães (1989) stellte an Tomaten und Reis ebenfalls kaum Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung bei gleichem pH-Wert des Nährmediums fest, wobei jedoch eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber niedrigem pH-Wert abzuleiten war. Dies bedeutet, dass die bei NH_4^+ -Ernährung beobachteten Veränderungen in der Wurzelmorphologie vorwiegend auf den niedrigen pH-Wert im Nährmedium zurückzuführen waren.

In Bodenkultur konnten zwischen den verschiedenen N-Ernährungsvarianten keine Unterschiede in der Wurzelrockenmasse festgestellt werden. Jedoch gab es bei hohen NO_3^- -Düngegaben eine Tendenz zur geringeren Wurzelmassebildung (Abb. 53). Durch das geringe Wachstum dieser Wurzeln waren die Trockensubstanzgehalte dieser Variante signifikant höher (Abb. 54).

4.2 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf den Spross der Erdbeerpflanzen

In den Wasserkulturversuchen wurden bei NH_4^+ -Ernährung ohne Puffersystem niedrigere Sprossmassen festgestellt (Abb. 13, Abb. 22 und Abb. 34), was auf den zeitweise extrem niedrigen pH-Wert in der Nährlösung zurückzuführen war. Hierdurch war das Sprosswachstum der Erdbeerpflanzen gehemmt (Magalhães und Huber 1989). Die Kohlenhydrate, die für die Stabilisierung des pH-Wertes in der Pflanze verbraucht wurden, standen den Pflanzen nicht zur Assimilation von NH_4^+ -N und auch nicht zum Aufbau von Sprossmasse zur Verfügung (Kafkafi 1990). Die Trockensubstanzgehalte im Spross wurden, im Gegensatz zu den Wurzeln,

durch NH_4^+ -Ernährung der Pflanzen nicht beeinflusst. Ein eingeschränktes Wachstum durch NH_4^+ -Toxizität scheint nicht gegeben, da es in den Wasserkulturversuchen bei moderatem pH-Wert in der Nährlösung zu keinen Wachstumsunterschieden im Vergleich zur NO_3^- -Variante kam (Abb. 22 und Abb. 34).

In den Bodenkulturversuchen war eine gegensätzliche Reaktion auf NH_4^+ oder NO_3^- -betonte Ernährung der Pflanzen festzustellen. Die Pflanzen, die mit NO_3^- -N ernährt wurden, wiesen niedrigere Sprossmassen auf (Abb. 43 und Abb. 55). Die Effekte der Wachstumsunterschiede wurden begleitet von pH-Veränderungen im Boden. Für diese Veränderungen waren mehrere Faktoren verantwortlich. Die treibende Kraft für die Aufnahme von NO_3^- in die Wurzelzellen ist ein elektrochemischer H^+ -Gradient, errichtet durch die im Plasmalemma gebundene H^+ -ATPase-Aktivität. Die Aufnahme von NO_3^- in die Wurzelzellen erfolgt nach McClure (1990) in einem Co-Transport mit zwei Protonen (H^+). Das heißt, dass die H^+ , die mit Hilfe der im Plasmalemma gebundenen H^+ -ATPase aus den Wurzelzellen in die Rhizosphäre gepumpt werden, zusammen mit dem NO_3^- -Ion wieder zurück in die Wurzeln eindringen. Hierbei kommt es zu einer reduzierten H^+ -Nettoabgabe der Pflanzen. Dies ist eine der Hauptursachen für einen pH-Anstieg in der Rhizosphäre (Schubert und Yan 1997).

Ein weiterer Effekt, der einen Anstieg des pH-Wertes in der Rhizosphäre verursacht, ist der Verbrauch von H^+ für die Reduktion von NO_3^- in der Pflanzenzelle. Dieser Prozess führt zu einem Anstieg des cytosolischen pH-Wertes, woraus eine verminderte ATPase-Aktivität resultiert (Felle 1988).

Die in dieser Arbeit vorgestellten Bodenkulturversuche zeigen, dass der pH-Wert bei NO_3^- -Ernährung der Pflanzen tatsächlich nach mehreren Wochen Kulturdauer signifikant höher war als bei den anderen Düngevarianten (Abb. 47 und Abb. 58), besonders bei Konzentrationen von $1,92 \text{ g N Gefäß}^{-1}$. Dies könnte zu, für das Pflanzenwachstum wichtigen Sekundäreffekten, geführt haben. Ein Beispiel ist die schlechtere Verfügbarkeit von Mikronährstoffen bei hohem pH-Wert in der Rhizosphäre (Finck 1979, Schubert 2006).

4.3 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Kationenkonzentrationen im Spross

Die Ionenbilanz ist Ausdruck des Bestrebens der pflanzlichen Gewebe, die Zahl negativer und positiver Ladungen abzugleichen (Raven und Smith 1976). Einen großen Einfluss auf die Konzentrationen verschiedener Mineralstoffe in Pflanzen haben NH_4^+ -N als Kation und NO_3^- -N als Anion. Verschiedene Autoren beobachteten bei mit NH_4^+ -N ernährten Pflanzen eine reduzierte Kationenaufnahme (Kirkby 1968, Cox und Reisenauer 1973, Van Beusichem et al. 1988, Gijsman 1990, Olsthoorn et al. 1991, Génard et al. 1994). Dagegen stimuliert die Ernährung der Pflanze mit NO_3^- -N die Aufnahme von anorganischen Kationen (Kirkby und Mengel 1967, Jackson und Williams 1968, Belvins et al. 1974), wobei es bei hohen NO_3^- -Aufnahmen zu einer unspezifischen Aufnahme von Kationen kommen kann (Kirkby und Knight 1977).

Bei den dargestellten Wasserkulturversuchen wurde deutlich, dass bei NH_4^+ -Ernährung und sehr niedrigem pH-Wert im Nährmedium die Konzentrationen an anorganischen Kationen in den Pflanzen signifikant niedriger waren als bei den anderen Ernährungsvarianten. Wurde der pH-Wert in der Nährlösung mittels pH-Stat-Anlage auf moderate Werte

eingestellt, zeigten sich kaum Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung. Interessant waren die erhöhten Ca-Konzentrationen bei Pflanzen der NO_3^- -Variante (Tab. 12, Tab. 14 und Tab. 16).

Auch in Bodenkultur wurden signifikant höhere Ca-Konzentrationen bei Pflanzen, die nur mit NO_3^- -N ernährt wurden, festgestellt (Tab. 18 und Tab. 20). Hohe Ca-Konzentrationen im Spross sprechen für einen aufwärtsgerichteten Transport von Ca mit dem Transpirationsstrom. Dabei ist das Ca-Ion vorwiegend mit dem NO_3^- -Anion vergesellschaftet. Diese Ca-Ionen können dann die durch die NO_3^- -Ernährung verstärkt gebildeten organischen Säuren ausbalancieren (Kirkby und Mengel 1967). Auch Siddiqui et al. (2002) fanden erhöhte Ca-Konzentrationen bei Tomatpflanzen und Bradfield (1976) bei Apfelbäumen, die mit NO_3^- -N ernährt wurden. Sie führten dies auf den höheren Gehalt an organischen Säuren bei NO_3^- -Ernährung zurück, wodurch die Mobilität für Ca verbessert wird.

Fleischhauer (2008) stellte bei einem Vergleich von Erdbeerpflanzen, die in Wasser- und Bodenkultur mit NH_4NO_3 Düngung angezogen wurden, ebenfalls hohe Ca-Konzentrationen im Spross der Pflanzen in Bodenkultur fest. Diese Pflanzen wiesen ein niedrigeres Wasserpotential bei erhöhtem Turgordruck auf. Die Autorin setzte dies in Beziehung zu einem geringen Sprosswachstum und leitete daraus ab, dass durch die erhöhten Ca-Konzentrationen die Extensibilität der Zellwände verringert und somit das Streckenwachstum der Zellen gehemmt war. Trewavas und Malhó (1997) berichteten ebenfalls von einer Verringerung der Zellstreckung durch erhöhte Ca-Konzentrationen in Pflanzen.

Auch in den hier vorgestellten Bodenkulturversuchen wurde eine tendenziell geringere Sprossmassebildung bei reiner NO_3^- -Ernährung und

höheren N-Konzentrationen gefunden (Abb. 43 und Abb. 55). Die Ca-Konzentrationen im Spross dieser Pflanzen waren ebenfalls erhöht (Tab. 18 und Tab. 20). Dass bei diesen Pflanzen die Extensibilität der Zellwände eingeschränkt und der Turgordruck durch die Kultur in Boden nicht ausreichte, um eine hinreichende Zellstreckung zu erreichen, könnte eine Erklärung darstellen.

4.4 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Mikronährstoffkonzentrationen im Spross

Eine Düngung der Pflanzen mit NH_4^+ -N in Bodenkultur kann je nach Bodenart sinnvoll sein, da durch den ernährungsbedingten niedrigen pH-Wert in der Rhizosphäre die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen erhöht wird (Schnug und Finck 1981, Sarkar und Jones 1982). In den Bodenkulturversuchen lag Mn im Spross in höheren Konzentrationen in der NH_4^+ -Variante sowie in den meisten Mischvarianten vor. Bei NO_3^- -Ernährung waren die Mn-Konzentrationen im Spross signifikant niedriger (Tab. 19 und Tab. 21). Dies ist auf die starke Abhängigkeit der Mn-Verfügbarkeit vom pH-Wert des Bodens zurückzuführen (Marschner 1985, Schaller 1986, Römheld 1986). Das pflanzenverfügbare Mn verringert sich mit steigendem pH-Wert und ist laut Rule und Graham (1976) sowie Sarkar und Jones (1982) ab pH-Werten von 6,4 und höher am schlechtesten verfügbar.

Die pH-Werte des Bodens der NO_3^- -Varianten lagen in beiden Bodenkulturversuchen zwischen 6,5 und 6,7 und waren signifikant höher als bei allen anderen Varianten (Abb. 47 und Abb. 58), was zu einer Abnahme des für die Pflanzen verfügbaren Mn führte (Abb. 48 und Abb. 59). Weiterhin besteht eine enge Beziehung zwischen Mn und Eisen (Fe), wobei sich diese beiden Mikronährstoffe im Boden und in der Pflanze wechsel-

seitig beeinflussen (Somers und Shive 1942, Hakerlerler und Höfner 1982, Bergmann 1993). Im Spross der mit NO_3^- -N ernährten Pflanzen konnten dementsprechend hohe Fe- bei niedrigen Mn-Konzentrationen festgestellt werden. Ein Mangel an Mn ist nach Bergmann (1993) jedoch nicht zu vermuten, da die Konzentrationen im Spross selbst nach der Fruchternte noch über den angegebenen Werten für Erdbeerpflanzen lagen (Tab. 19 und Tab. 21).

In den Wasserkulturversuchen mit moderatem pH-Wert in der Nährlösung gab es zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung keine Unterschiede in den Konzentrationen an Mn und Fe (Tab. 15 und Tab. 17), da sich hier die Versuchsbedingungen besser kontrollieren ließen. Auch kam es in der NO_3^- -Variante zu keinem pH-Anstieg in der Nährlösung, denn diese wurde dreimal in der Woche gewechselt. Die Unterschiede der Konzentrationen an Cu und Zn variierten in Wasser- und Bodenkultur sehr stark und folgten keinem bestimmten Muster.

4.5 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Alkalität der pflanzlichen Asche im Spross

Mit der Bestimmung der Alkalität der pflanzlichen Asche wird die Konzentration an organischen Anionen in der Pflanze ermittelt. Wie schon vielfach in der Literatur beschrieben, führt die Ernährung der Pflanzen mit NO_3^- -N zu einem Anstieg der Konzentration an organischen Anionen, wobei hauptsächlich Malat akkumuliert wird (Kirkby und Mengel 1967, Kirkby 1968, Raven und Smith 1976, Van Beusichem 1985). Die Reduktion von NO_3^- kann in den Wurzeln und im Spross stattfinden. In welchem Maße, ist abhängig von mehreren Faktoren wie Höhe der NO_3^- -Versorgung, Pflanzenart und Alter der Pflanzen (Kirkby und Knight 1977). In dieser Arbeit konnten ebenfalls, unabhängig vom Kultur-

substrat, erhöhte Konzentrationen an organischen Anionen bei NO_3^- -Ernährung in den Wurzeln (Abb. 25, Abb. 36 und Abb. 56) und im Spross (Abb. 15, Abb. 26, Abb. 37, Abb. 46 und Abb. 57) festgestellt werden. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass es auch bei Erdbeerpflanzen durch eine verstärkte Reduktion von NO_3^- -N zu einer Anreicherung von organischen Anionen in den entsprechenden Pflanzenorganen kommt, wobei in den Wasserkulturversuchen die Konzentrationen im Spross etwa zweimal höher waren als in den Wurzeln.

Bei einem Vergleich der beiden NH_4^+ -Varianten in Wasserkultur waren bei niedrigem pH-Wert im Nährmedium die sehr geringen Konzentrationen an organischen Anionen in den Wurzeln und im Spross auffällig (Abb. 25, Abb. 26, Abb. 36 und Abb. 37). Um dies zu erklären, muss berücksichtigt werden, dass im Vergleich zu NO_3^- , welches in der Vakuole gespeichert werden kann, NH_4^+ in der Wurzel assimiliert und in Form von Aminosäuren zum Sink transportiert wird. Dies führt zu einem höheren Verbrauch an C-Skeletten aus dem Tricarbonsäurezyklus (Van Beusichem et al. 1988, Wiesler 1997). Zusätzlich zur NH_4^+ -Assimilation musste der cytosolische pH-Wert stabilisiert werden. Der hohe Verbrauch von C-Skeletten kombiniert mit dem Bedarf für die Stabilisierung des cytosolischen pH-Wertes durch Decarboxylierung von Malat, führte in dieser Variante zu einem erhöhten Verbrauch von Carboxylaten in den vegetativen Pflanzenorganen (Kirkby und Mengel 1967, Marschner 1995, Pasqualini et al. 2001).

4.6 Einfluss der NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf den Ertrag der Erdbeerfrüchte

Ein Zusammenhang zwischen unterschiedlicher N-Ernährung der Pflanze und dem Fruchtertrag war in den Wasserkulturversuchen nur bei einem extrem niedrigen pH-Wert im Nährmedium zu erkennen (Abb. 16). Ein Zusammenhang von Ertrag und Kulturdauer wäre denkbar (Tab. 2, Tab. 3 und Tab. 4). Die Kulturdauer war wiederum abhängig von der Temperatur, aber auch vom Zeitpunkt des Kulturbeginns. Je später der Kulturbeginn war, desto kürzer war die Kulturzeit. Mit der Abnahme der Kulturdauer nahmen auch die Trockensubstanzgehalte der Früchte ab (nicht gezeigt). Innerhalb der einzelnen Wasserkulturversuche gab es, anders als im Spross, keinen Effekt der N-Ernährung auf die Trockensubstanzgehalte der Erdbeerfrüchte.

In den beiden Bodenkulturversuchen wurden in der Variante, die ausschließlich mit NO_3^- -N ernährt wurde, tendenziell die geringsten Fruchtertrage erzielt (Abb. 49 und Abb. 60). Da das Sprosswachstum in dieser Variante ebenfalls verringert war (Abb. 43 und Abb. 55), liegt die Vermutung nahe, dass den Früchten, die aus den vegetativen Pflanzenteilen mit Assimilaten und Nährstoffen bedient werden, nicht genügend Assimilate für ein entsprechendes Wachstum zur Verfügung standen. Die Ergebnisse waren aufgrund der Schwankungen in den einzelnen Varianten statistisch nicht abzusichern. Die Trockensubstanzgehalte der Früchte schwankten zwischen 8,5 und 10,5% und zeigten ebenfalls keine Unterschiede zwischen den verschiedenen N-Ernährungsformen.

4.7 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Zuckerkonzentrationen in Erdbeerfrüchten

Ein wichtiger Bestandteil der geschmackgebenden Inhaltsstoffe in den Erdbeerfrüchten sind die Zucker. Sie setzen sich in Erdbeeren zu 99% aus Glucose, Fructose und Saccharose zusammen (Woodward 1972, Kallio und Hakala 2000), den Rest bilden Sorbitol, Xylitol und Xylose (Makinen und Söderling 1980). Die Akkumulation von Glucose und Fructose in den Erdbeerfrüchten ist von der Hydrolyse der aus dem Spross verlagerten Zucker abhängig (Shaw 1988). Während der Fruchtentwicklung wird in den Blättern (Source) vorhandene Glucose und Fructose zu Saccharose synthetisiert und über das Phloem in die Früchte (Sink) transportiert (Yamaki 1995, Kühn und Franceschi 1997, Exteberria et al. 2005). Saccharose ist die wichtigste Transportform für Assimilate in die Erdbeerfrüchte (Forney 1986). Im Sink, sorgen saure Invertasen für die Entladung der Saccharose aus dem Phloem durch Umformung in Glucose und Fructose (Yamaki 1995, Perez et al. 2002). Etwa 80% der Zucker werden in der Vakuole der Früchte gelagert und erniedrigen dort das osmotische Potential. Es kommt zu einem Anstieg des Turgordrucks und somit zu einer raschen Zellvergrößerung während des Fruchtwachstums. Yamaki (1995) sowie Walker und Ho (1977) fanden an Tomaten heraus, dass die Translokationsrate in die Früchte in Abhängigkeit von der Saccharosekonzentration steht. Eine hohe Stoffwechselrate in der Frucht, verursacht durch hohe Temperaturen, führt dazu, dass viel Saccharose zu Hexose transformiert wird. Dadurch sinkt die Konzentration an Saccharose in den Früchten und es kommt zu einer verstärkten Translokation aus den Blättern. Die Saccharosekonzentration in den Früchten liefert den Link zwischen Translokationsrate und Kohlenstoffmetabolismus. Mit zunehmender Reife der Früchte erhöht sich die Porosität des Tonoplasten und die zuvor in die Vakuole abgesonderten

Zucker gelangen verstärkt in das Cytosol. Es kommt zu einer Abnahme des osmotischen Potentials und somit zu einem erhöhten Turgordruck auf die Zellwände, wodurch das saftige Gefühl beim Beißen in eine Frucht entsteht (Walker und Ho 1977, Yamaki 1995).

In der hier vorgestellten Arbeit wurde kein Einfluss von NH_4^+ -N und NO_3^- -N auf die Konzentrationen an Glucose, Fructose und Saccharose in den Früchten festgestellt (Abb. 29, Abb. 39 und Abb. 50). Aufgrund dieser Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die Translokationsrate, die lt. Walker und Ho (1977) von der Stoffwechselrate in den Früchten abhängig ist, limitierend war. Die Früchte der unterschiedlichen Ernährungsvarianten waren während der Reife unabhängig von der Ernährungsvariante den gleichen äußeren Einflüssen ausgesetzt. Dadurch müsste die Stoffwechselrate in den Früchten, wenn kein schwerwiegender Nährstoffmangel auftrat, bei allen Varianten gleich gewesen sein.

In dem Wasserkulturversuch I, der im Gewächshaus stattfand, wurden bei NH_4^+ -Ernährung und sehr niedrigem pH-Wert im Nährmedium höhere Konzentrationen an Zuckern in den Früchten gefunden als bei NO_3^- -Ernährung (Abb. 17). Das geringe Sprosswachstum (Abb. 13) und der niedrige Fruchtertrag (Abb. 16) lassen auf einen Stau von Assimilaten in den jeweiligen Pflanzenorganen schließen. Auch Kanai et al. (2007) stellten an Tomaten eine Anreicherung von Zuckern in den vegetativen Pflanzenteilen fest, bedingt durch mangelndes Wachstum der Pflanzen. Hierbei kam es aber zu keinen Zuckerakkumulationen in den Früchten.

Kreusel und Lenz (1997) fanden bei Feldversuchen mit NH_4^+ -Depotdüngung höhere Konzentrationen an Kohlenhydraten im Spross von Erdbeerpflanzen als bei einer Mischernährung. Sie führten dies auf eine erhöhte Photosyntheseleistung und einen geringeren Energieverbrauch bei NH_4^+ -Ernährung der Pflanze zurück. Auch in dieser Arbeit

wurden im Spross von Pflanzen, die in Wasserkultur mit NH_4^+ -N ernährt wurden, bei niedrigem pH-Wert im Nährmedium erhöhte Konzentrationen an Fructose festgestellt (Abb. 27). Dieser Unterschied setzte sich nicht in die Früchte fort (Abb. 29).

4.8 Einfluss von NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung auf die Konzentration organischer Säuren in Erdbeerfrüchten

Organische Säuren in den Erdbeerfrüchten sind genauso wie die Zucker wichtige Komponenten des Fruchtaromas und als solche tragen sie zum sensorischen Gesamteindruck beim Verzehr der Früchte bei (Sweeny et al. 1970). Fruchtsäuren spielen eine wichtige Rolle beim Geschmacksempfinden, wobei die Zitronensäure für den Verbraucher zu der bevorzugten Genuss-Säure zählt (Franzke 1999). Die titrierbare Säure ist die Gesamtheit der Säuren, die vorwiegend beim Verzehr von Erdbeeren wahrgenommen wird.

Bei einem Vergleich konnte zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung in den Wasserkulturversuchen kein Unterschied festgestellt werden, wenn der pH-Wert des Nährmediums im moderaten Bereich lag. Bei extrem niedrigem pH-Wert dagegen war die Konzentration an titrierbarer Säure in den Früchten niedriger (Abb. 18, Abb. 30 und Abb. 40). Es ist davon auszugehen, dass bei niedrigem pH-Wert im Nährmedium in den Früchten die für die Säureproduktion nötigen C-Skelette nicht zur Produktion von organischen Säuren zur Verfügung standen. Vielmehr wurden im Spross synthetisierte C-Skelette dort zur Stabilisierung des cytosolischen pH-Wertes verbraucht (Kirkby und Knight 1977, Raven und Smith 1976, Magalhães und Huber 1989). NH_4^+ -Ernährung führt durch den aus der Ernährung resultierenden niedrigen pH-Wert zu einer Reduktion der organischen Säuren in der Pflanze (Kirkby und Mengel 1967). Diese

Säuren stehen für den Transport über das Phloem in die Früchte nicht mehr zur Verfügung.

In den beiden Bodenkulturversuchen konnten ebenfalls keine Unterschiede in den Konzentrationen an titrierbarer Säure zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung sowie den Ernährungsmischformen festgestellt werden (Abb. 51 und Abb. 64), da durch die Pufferkapazität des Bodens der pH-Wert nicht absank (Abb. 47, Abb. 58).

Darüber hinaus wurden die in Erdbeerfrüchten vorkommenden Hauptsäuren mittels HPLC untersucht. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Zitronensäure mit 66 – 88% und Äpfelsäure mit 4 – 25% (Whiting 1958, Kallio und Hakala 2000, Sturm et al. 2003). Des Weiteren kommen noch Bernsteinsäure, Oxalsäure, Ketoglutarsäure und Brenztraubensäure in etwas größeren Mengen vor (Hane 1962). In den Früchten der Wasser- und Bodenkulturversuche machte Zitronensäure etwa 60 - 70% und Äpfelsäure etwa 15 - 20% an der gemessenen Gesamtsäure aus. Selbst bei unterschiedlichen N Konzentrationen im Boden waren die Säurekonzentrationen in den Erdbeerfrüchten stabil (Abb. 65). Die Ergebnisse von Skupien und Oszmianski (2004), die für die Sorte Elsanta höhere Malat- als Citratkonzentrationen in den Früchten gefunden hatten, konnten nicht bestätigt werden.

In den Konzentrationen der untersuchten Säuren konnte in den Wasserkulturversuchen ebenfalls kein Unterschied zwischen NH_4^+ -und NO_3^- -Ernährung festgestellt werden, wenn der pH-Wert des Nährmediums etwa gleich war (Abb. 31 und Abb. 41).

Um alle in den Früchten gebildeten organischen Säuren zu erfassen, wurde zusätzlich die Alkalität der pflanzlichen Asche der Erdbeerfrüchte untersucht. Diese wurde, wie in den vorangegangenen Analysen, auf die

Frischmasse bezogen. Auch hier zeigten sich weder Unterschiede zwischen NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung noch zwischen unterschiedlichen N-Konzentrationen (Abb. 42 und Abb. 52). Die Ergebnisse der Wasser- und Bodenkulturversuche erlauben den Schluss, dass die Akkumulation organischer Säuren in den Früchten zum größten Teil abgekoppelt vom Säuremetabolismus von Spross und Wurzel stattfindet. Selbst die bei NO_3^- -Ernährung hohen Konzentrationen an organischen Säuren in den vegetativen Pflanzenorganen (Abb. 36 und Abb. 37), wurden nur in geringem Maße aus dem Spross in die Früchte verlagert.

Hale (1962) konnte bei Weinbeeren mit markiertem Kohlenstoff (C) nachweisen, dass die Frucht ein wichtiger Syntheseort für organische Säuren ist. Markakis und Embs (1964) stellten bei frisch geernteten Erdbeerfrüchten mit markiertem C fest, dass in den Früchten Glucose und Fructose in organische Säuren, bevorzugt Citrat, umgeformt wurden. Walker und Ho (1976) entdeckten bei Untersuchungen an Tomaten, dass etwa 90% der Translokate, die in die Frucht transportiert werden, aus Saccharose bestehen, der Rest aus Aminosäuren und organischen Anionen, wobei von den organischen Säuren nur Malat, Aspartat und Glutamat aus den Blättern exportiert wurden. Somit stellt sich die Frage, wie es zur Säurebildung in den Erdbeerfrüchten kommt? Die im Blatt assimilierten Kohlenhydrate werden in Form von Saccharose in die Früchte verlagert und in der Vakuole akkumuliert (Handsack 1961, Forney und Breen 1986). Ein Teil der Saccharose wird mit Hilfe einer Invertase in Glucose und Fructose gespalten und steht so dem Metabolismus für weitere Synthesezwecke zur Verfügung (Yamaki 1995). Die Translokationsrate wird, wie schon erwähnt, von der Saccharosekonzentration in der Frucht bestimmt, deren Rate von einem Konzentrationsgefälle zwischen Source und Sink abhängig ist. Die Assi-

malattranslokation erfolgt von einer höheren zu einer niedrigeren Konzentration, wobei die Vakuole ausgenommen ist (Bruchou und Génard 1999).

Organische Säuren werden nur zu einem geringen Teil über das Phloem in die Früchte transportiert. Der größte Anteil wird direkt in den Früchten aus Hexosen gebildet (Handsack 1961). Da Erdbeerfrüchte wenig Chlorophyll enthalten, sind sie als Sinkorgan vorwiegend auf die Anlieferung von Zuckern, Aminosäuren und organischen Säuren angewiesen. Dies erklärt auch die Unterschiede in den Säurekonzentrationen bei extrem niedrigem pH-Wert (Abb. 19, Abb. 31 und Abb. 41). Hier wurden die im Spross gebildeten Assimilate vermutlich zur Stabilisierung des cytosolischen pH-Wertes benötigt. Auch Ho (1988) stellte fest, dass die Menge der Assimilatzulieferung neben dem Faktor Ernährungszustand von der Aktivität des Stoffwechsels in der Frucht abhängig ist. Dabei ist der durch den pH-Wert bedingte Ernährungszustand der gesamten Pflanze zu berücksichtigen. In den Wasserkulturversuchen bei NH_4^+ -Ernährung und niedrigem pH-Wert sind die signifikant niedrigeren Kationenkonzentrationen im Spross zu erwähnen (Tab. 12, Tab. 14 und Tab. 16). Als Beispiel ist K^+ zu nennen, welches einen bedeutenden Einfluss auf die Saccharosesynthese und auch den Assimilattransport in Pflanzen hat (Bergman, 1993 und Mengel 1980). Hertrampf (2006) stellte bei Untersuchungen von Erdbeeren unter Kaliummangel niedrige Zucker- und Säurekonzentrationen in den Früchten fest. Kanai et al. (2007) entdeckten bei Tomaten, dass ein Mangel an K^+ zuerst die Sink-Aktivität der Früchte beeinflusst, bevor K-Mangel einen Effekt auf die Source-Aktivität hat.

Von den organischen Anionen wird in reifen Früchten vorwiegend Malat umgebildet (Taureilles-Saurel et al. 1995, Toldam-Andersen und Hansen 1997, Etienne et al. 2002). Die Menge an gebildetem Citrat und Malat ist

von der Aktivität der Enzyme des Tricarbonsäurezyklus abhängig (Deshpande und Ramakrishnan 1961), wobei externe Faktoren wie Temperatur, mineralische Ernährung und die Respiration für die mitochondriale Aktivität eine große Rolle spielen. Die Malatakkumulation in den Früchten wird hauptsächlich von den thermodynamischen Umständen des Transportes vom Cytosol zur Vakuole der Fruchtzellen beeinflusst. Dies beinhaltet die Interaktionen zwischen Säure-Basen-Reaktionen in der Vakuole, Protonentransport über den Tonoplasten und die Malatakkumulation (Lobit et al. 2006). Bei hohen Temperaturen zum Ende der Fruchtentwicklung wird die Saccharosesynthese bevorzugt, es wird weniger Malat gebildet aber verstärkt Malat abgebaut, was wiederum zu einer Abnahme von Citrat, der Hauptanions in Erdbeerfrüchten, führt (Lobit et al. 2006, Wu et al. 2007). Somit ist die Synthese von organischen Säuren zum großen Teil von äußeren Faktoren, die auf den Säuremetabolismus in den Früchten einwirken, abhängig. Da nur ein geringer Teil organischer Säuren vom Spross über das Phloem in die Früchte transportiert wird (Walker und Ho 1976), kann sich eine Anreicherung in Wurzel und Spross, wie es bei NO_3^- -Ernährung der Fall ist, kaum auf die Konzentrationen an Säuren in den Früchten auswirken.

Siddiqui et al. (2002) stellten bei Versuchen mit Tomaten und NH_4^+ -Ernährung der Pflanzen ebenfalls keine Unterschiede in der titrierbaren Säure sowie in den Konzentrationen an löslichen Zuckern fest. Dennoch wurden bei sensorischen Tests die mit NH_4^+ -N ernährten Tomatenfrüchte als wohlschmeckender empfunden. Sie führten dieses Ergebnis auf einen positiven Effekt des NH_4^+ -N auf die Glutamin-Glutamatsynthese zurück. Durch eine Anreicherung von Glutamat könnte eine geschmacksverstärkende Wirkung auf Lebensmittel entstehen (Heeb et al. 2005).

5 Zusammenfassung

Erdbeeren gehören zu den beliebtesten Früchten in Europa. Da schmackhafte Früchte vom Verbraucher bevorzugt werden, ist in den letzten Jahren verstärkt an der Verbesserung der Qualität von Erdbeerfrüchten geforscht worden. Erdbeeraroma ist eine komplexe Kombination aus Zuckern, Säuren und Geruchsstoffen. Da es der Züchtung gelungen ist, einige leistungsfähige und schmackhafte Erdbeersorten hervorzu- bringen, ist es von besonderer Bedeutung, die genetischen Eigenschaften vorhandener Erdbeersorten durch optimale Anbautechniken und optimale Düngung zur vollen Entfaltung zu bringen.

Stickstoff ist als einer der Hauptnährstoffe unentbehrlich in verschiedenen organischen Verbindungen, wie Aminosäuren, Nukleinsäuren, Proteinen, Chlorophyll sowie Verbindungen des Sekundärstoffwechsels. Stickstoff ist der einzige Pflanzennährstoff, der als Anion (NO_3^-) und auch als Kation (NH_4^+) von Pflanzen aufgenommen wird. Der pflanzliche Stoffwechsel wird von der N-Form maßgeblich beeinflusst. Die Aufnahme von NH_4^+ wirkt für die Pflanze physiologisch versauernd, während die Aufnahme von NO_3^- alkalischierend wirkt. Nitrat-N muss erst, bevor er assimiliert werden kann, in zwei Schritten zu Ammonium reduziert werden. Während dieser Reduktion kommt es zu einer verstärkten Produktion von OH^- im Cytosol, was dort zu einem pH-Anstieg führen würde. Trotzdem schwankt der pH-Wert im Cytosol kaum, da er durch verschiedene Mechanismen in engen Grenzen gehalten wird, wie z. B. durch den biochemischen PEP/Malat-Puffer, der die negative Ladung des OH^- durch Carboxylierung von Phosphoenolpyruvat über Oxalacetat zu Malat sowie anderen organischen Säuren bewirkt.

Mit dem Wissen, dass es bei NO_3^- -Ernährung zu einer Anreicherung von organischen Säuren in den Pflanzen kommt, stellte sich nun die Frage, ob sich Konzentrationen geschmacksrelevanter organischer Säuren in Erdbeerfrüchten durch NH_4^+ - oder NO_3^- -Ernährung beeinflussen lassen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen der verschiedenen N-Formen, wurden NH_4^+ - und NO_3^- -Ernährung in Wasserkultur miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass bei NH_4^+ -Ernährung vorwiegend der aus der Ernährung resultierende niedrige pH-Wert für die verschiedensten Symptome, wie die Veränderungen in der Wurzelmorphologie, Bildung von Spross und Fruchtmasse, Konzentrationen an Makro- und Mikro-nährstoffen, Zuckerkonzentrationen und auch die Konzentrationen an organischen Anionen in der gesamten Pflanze, verantwortlich war. Bei pH-Werten von 5,5 im Nährmedium und NH_4^+ -Ernährung zeigten sich diese Unterschiede im Vergleich zur NO_3^- -Ernährung nicht. Ausgenommen die Konzentrationen an organischen Säuren in Wurzel und Spross, die bei NO_3^- -Ernährung signifikant erhöht waren. Ähnliche Ergebnisse konnten auch für Bodenkultur gezeigt werden. Die Hypothese, dass ein Anstieg an organischen Anionen in den vegetativen Pflanzenorganen zu einem Anstieg an organischen Anionen in den Früchten führt, konnte in den hier vorgestellten Experimenten widerlegt werden.

Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass hauptsächlich Saccharose in die Früchte transportiert wird und nach Spaltung in Hexosen und der Glycolyse die Säuren im Tricarbonsäurezyklus der Früchte gebildet werden. Die Aktivität wird neben der Nährstoffversorgung und dem Alter der Pflanzen maßgeblich auch von umweltbedingten Faktoren wie Lichteinstrahlung und Temperatur bestimmt. Da die Erdbeerfrüchte der verschiedenen Varianten den gleichen äußeren Einflüssen ausgesetzt

waren und somit die Sinkaktivität etwa gleich war, konnte es zu keinen Unterschieden der Säurekonzentrationen in den Früchten kommen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass NH_4^+ - oder NO_3^- -Düngung keinen Einfluss auf geschmacksrelevante Parameter in Erdbeerfrüchten haben, sofern der pH-Wert des Nährmediums nicht zu stark absinkt

6 Summary

Strawberry is one of the most popular fruits in Europe. Since only tasteful fruits are attractive for the consumers the improvement of strawberry quality has been brought into focus over the last few years. The flavor of strawberries is a complex combination of sweetness, acidity, and odor. Therefore, the genetic potential of strawberry cultivars has to be exploited in an optimum way e.g. by choosing the right cultivation technique and nutrient supply.

Nitrogen is one of the plant macronutrients being indispensable for numerous organic compounds such as amino acids, nucleic acids, proteins, chlorophyll, and secondary metabolites. Plant metabolism is differentially affected by the N-forms NH_4^+ or NO_3^- . The physiological effect of NH_4^+ nutrition results in acidification, while NO_3^- effects on plants are physiologically alkaline. Before NO_3^- can be assimilated, it has to be reduced to NH_4^+ in a biphasic process. During NO_3^- reduction, OH^- is released causing an increased cytosolic pH. This will not occur, if the OH^- is consumed during malate synthesis by the PEP/malate buffer system. Hence the negative charge of the OH^- is shifted to oxaloacetate and from there to malate and other organic acids.

Since organic acids are influenced by N nutrition, it was investigated if NO_3^- nutrition leads to an accumulation of organic acids in the root and shoot of strawberry plants and further increases the organic acid concentration in the fruits. To determine the effects of different N forms on organic anions, NH_4^+ and NO_3^- nutrition were compared in hydroponic culture. It was shown that at low pH, NH_4^+ compared to NO_3^- nutrition, had different effects on strawberry plants regarding root morphology, shoot and fruit growth, nutrient concentration of shoots, sugars and or-

ganic anions. At pH 5.5, the NH_4^+ -fed plants did not show most of these changes except for a significantly lowered concentration of organic anions compared to NO_3^- -fed plants. In contrast to the hypothesis that an increase of organic anions in roots and shoots leads to an accumulation in fruits, in this experiment no effect on the concentration of organic acids in the fruits was found. The same results were shown with strawberry cultivation in soil. These results indicate that organic anions were not affected by the N form under physiological conditions.

It was interpreted that assimilates are mainly transported as sucrose from shoot to fruit. Here the sucrose is hydrolyzed to form hexoses, which are further transformed to organic anions during glycolysis and the citric-acid cycle. The activity of enzymes for sucrose breakdown in the fruit and the citric-acid cycle were apparently influenced by the nutrient status of the plant, the plant age, and environmental factors such as temperature, light intensity, and photoperiod. Since strawberries produced under different N treatments, were grown in the same environmental conditions the concentration of taste-relevant organic acids was not affected.

The present results show that fertilization with NH_4^+ or NO_3^- does not affect the internal quality parameters of strawberry fruits as long as the pH value of the culture medium is buffered to prevent a strong decrease.

7 Literatur

- Abeles FB, Takeda F (1990). Cellulase activity and ethylene in ripening strawberry and apple fruit. *Scientia Horticulturae* 42, 269–275.
- Allen S, Smith JA (1986). Ammonium nutrition in *Rhizinus communis*: Its effect on plant growth and the chemical composition of the whole plant, xylem and phloem saps. *Journal of Experimental Botany* 37, 1599–1610.
- Amberger A (1986). Potentials of nitrification inhibitors in modern N-fertilizer management. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 149, 469–484.
- Andrews M (1986). The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants. *Plant, Cell & Environment* 9, 511–519.
- Barber KL, Maddux L, Kissel DE, Pieruynski GM, Bock BR (1992): Corn responses to ammonium- and nitrate-nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 56, 1166–1171.
- Belvins DG, Hiatt AJ, Lowe RH (1974). The influence of nitrate and chloride uptake on expressed sap pH, organic acid synthesis and potassium accumulation in higher plants. *Plant Physiology* 54, 82–87.
- Bergmann W (1993). Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. *Gustav Fischer Verlag*, Jena-Stuttgart.
- Birgül A, Knözinger S, Willershausen B (2008). Der Einfluss von Apfelsaftgetränken auf den pH-Wert des Gesamtspeichels. *Zahnärztliche Mitteilungen*.
- Bradfield EG (1976). Calcium complexes in the xylem of apple shoots. *Plant and Soil* 44, 495–499.
- Bruchou C, Génard M (1999). A space-time model of carbon translocation along a shoot bearing fruits. *Annals of Botany* 84, 565–576.

- Claussen W, Lenz F (1999). Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. *Plant and Soil* 8, 95-102.
- Cox WJ, Reisenauer HM (1973). Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, or ammonium, or both. *Plant and Soil* 38, 363–380.
- Davies DD (1986). The fine control of cytosolic pH. *Physiologia Plantarum* 67, 702–706.
- Deshpande WM, Ramakrishnan CV (1961). Formation and breakdown of citric acid in garcinia fruit (*Xanthochamus guttifer*). *The Journal of Biological Chemistry* 236, 2377–2380.
- Etienne C, Moing A, Dirlewanger E, Raymond P, Monet R, Rothan C (2002). Isolation and characterisation of six peach cDNAs encoding key proteins in organic acid metabolism and solute accumulation: involvement in regulating peach fruit acidity. *Physiologia Plantarum* 114, 259–270.
- Exteberria E, Gonzàles P, Tomlinson P, Pozueta-Romero J (2005). Existence of two parallel mechanisms for glucose uptake in heterotrophic plant cells. *Journal of Experimental Botany* 56, 1905–1912.
- Felle H (1988). Short-term pH-regulation in plants. *Physiologia Plantarum* 74, 583–591.
- Finck A (1976): Pflanzenernährung in Stichworten. 3. überarbeitete Auflage, Verlag Ferdinand Hirt, Kiel.
- Fleischhauer C (2008). Geschmacksstoffe in Erdbeerfrüchten nach Anzucht der Pflanzen in Wasserkultur und Bodenkultur. *Bachelorarbeit am Institut für Pflanzenernährung*, JLU Giessen.
- Forney CF, Breen PJ (1985). Collection and characterization of phloem exudates from strawberry pedicels. *HortScience* 20, 413–414.
- Forney CF, Breen PJ (1986). Sugar Content and Uptake in the Strawberry Fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111, 241–247.

- Franzke C (1999). "Geschmackvolle" Lebensmittel sind gefragt. *Moderne Ernährung Heute* 7, 121–123.
- Génard M, Souty M, Holmes S, Reich M, Breuils L (1994). Correlations among quality parameters of peach fruit. *Journal of Science of Food and Agriculture* 66, 241–245.
- Gerendás J, Sattelmacher B (1994). Einfluss des Ammoniumangebotes auf Wachstum, Mineralstoff- und Polyamingehalt junger Maispflanzen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 158, 299–305.
- Gijsman AJ (1990). Rhizosphere pH along different root zones of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), as affected by source of nitrogen. *Plant and Soil*. 124, 161–167.
- Hakerlerler H, Höfner W (1982). Wechselwirkungen von Fe, Zn und Mn bei Mais im Gefäßversuch. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 145, 88–90.
- Hale CR (1962). Synthesis of organic acids in the fruit of the grape. *Nature* 195, 917–918.
- Hancock JF (1999). Strawberries. Crop Production Science in Horticulture. *Canadian Association of Business Incubation*, Oxfordshire/UK.
- Handsack W (1961). Der Säurestoffwechsel der Erdbeerpflanze in der vegetativen Phase während des Fruchtens. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 74, 479–484.
- Hane M (1962). Untersuchungen über den Säurestoffwechsel von Erdbeerfrüchten. *Institut für Obstbau Bonn*. Inaugural-Dissertation (Originalarbeit)
- Heeb A, Lundegardh B, Ericsson T, Savage GP (2005). Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes. *Journal of Science of Food and Agriculture* 85, 1405–1414.
- Hertrampf A (2006). Einfluss der Tageszeit und der Kaliumernährung auf Geschmack- und Pflanzennährstoffe der Erdbeere (*Fragaria x ananassa*). *Bachelorarbeit am Institut für Pflanzenernährung*, JLU Giessen.
- Hirano YN, Hijii N(1998). Effects of low pH and aluminium on roots morphology of Japanese red cedar sapling. *Environmental Pollution* 101, 339–347.

- Ho LC (1988). *Metabolism and compartmentation imported sugars in sink organs in relation to sink strength. Annual Review of Plant Physiology, Plant Molecular and Plant Biology* 39, 355–389.
- Hoberg E (2005): Fruchtsäurebestimmung in Erdbeeren. *Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen, Quedlinburg*, (persönliche Mitteilung).
- Jackson WA, Williams DC (1968). Nitrate-stimulated uptake and transport of strontium and other cations. *Soil Science Society of America Proceedings* 32, 698–702.
- Jungk A (1968). Die Alkalität der Pflanzenasche als Maß für den Kationenüberschuß in der Pflanze. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 120, 99–105.
- Kafkafi U (1990). Root temperature, concentration and the ratio $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ effect on plant development. *Journal of Plant Nutrition* 10, 1291–1306.
- Kallio H, Hakala M (2000). Sugars and acids of strawberry varieties. *European Food Research and Technology* 212, 81–85.
- Kanai S, Ohkura K, Abu-Gyamfi JJ, Mohapatra P K, Nguyen N T, Saneoka H, Fujita K (2007). Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany* 58, 1–12.
- Keutgen A, Pawelzik E (2007). Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. *Food Chemistry* 105, 1487–1494.
- Kirkby EA, Mengel K (1967). Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition. *Plant Physiology* 42, 6–14.
- Kirkby EA (1968). Influence of ammonium and nitrate nutrition on the cation-anion balance and nitrogen and carbohydrate metabolism of white mustard plants grown in dilute nutrient solutions. *Soil Science and Plant Nutrition* 105, 133–141.
- Kirkby EA, Knight AH (1977). Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiology* 60, 349–353.

- Kreusel U, Lenz F (1996): Einfluss der N-Düngung auf die Verteilung von Kohlenhydraten in Sprossen und Wurzeln von Erdbeergrünpflanzen. *Erwerbsobstbau* 38, 179-183
- Kühn C, Franceschi VR (1997): Macromolecular trafficking indicated by localization and turnover of sucrose transporters in enucleate sieve elements. *Science* 275, 1298–1300.
- Lobit P, Génard M, Soing P, Habib R (2006): Modelling malic acid accumulation in fruits: relationships with organic acids, potassium, and temperature. *Journal of Experimental Botany* 57, 1471–1483.
- Magalhães JR, Huber DM (1989): Ammonium assimilation in different plant species as affected by nitrogen form and pH control in solution culture. *Fertilizer Research* 21, 1–6.
- Makinen KK, Söderling E (1980): A quantitative study of mannitol, sorbitol, xylitol and xylose in wild berries and commercial fruits. *Journal of Food Science* 45, 367–371.
- Markakis P, Embs RJ (1964): Conversions of sugars to organic acids in the strawberry fruit. *Journal of Food Science* 29, 629–630.
- Marschner H (1985 a): Nährstoffdynamik in der Rhizosphäre. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 98, 291–309.
- Marschner H (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd edition. Academic Press, London, UK.
- Matisek R, Schnepel F-M, Steiner G (1992): Lebensmittelanalytik, 2. Auflage. Springer Verlag, 350-358.
- McClure PR, Kochian LV, Spanswick RM, Shaff JE (1990a): Evidence for Cotransport of Nitrate and Protons in Maize Roots. I. Effects of Nitrate on the Membrane Potential. *Plant Physiology* 93, 281-289.
- McClure PR, Kochian LV, Spanswick RM, Shaff JE (1990b): Evidence for Cotransport of Nitrate and Protons in Maize Roots. II. Measurement of NO₃⁻ and H⁺ Fluxes with Ion-Selective Microelectrodes. *Plant Physiology* 93, 281-289.

- Mengel K (1990): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 6. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Mengel K (1980): Effect of potassium on the assimilate conduction of storage tissue. *Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft* 93, 353–362.
- Mengel K, Kirkby E (2001): Principles of Plant Nutrition. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, the Netherlands.
- Mengel K, Schubert S (1985): Active extrusion of protons into deionized water by roots of intact maize plants. *Plant Physiology* 79, 344–348.
- Mengel K, Pilbeam DJ (1992): Nitrogen Metabolism of Plants. *Clarendon Press, Oxford, UK*.
- Mitcham B (1996): Quality assurance for strawberries: A case study. *Perishables Handling Newsletter* 85, 6–8.
- Neumann W D, Seipp D (1989): Erdbeeren. Fachbuch Obstbau, *Eugen-Ulmer-Verlag, Stuttgart*.
- Olsthoorn AFM, Keltjens WG, Van Baren B, Hopman MCG. (1991): Influence of ammonium on fine root development and rhizosphere pH of Douglas-fir seedlings in sand. *Plant and Soil* 133, 75–81.
- Pasqualini S, Ederli L, Piccioni C, Batini P, Bellucci M, Arcioni S, Antonielli M (2001): Metabolic regulation and gene expression of root phosphoenolpyruvate carboxylase by different nitrogen sources. *Plant, Cell & Environment* 24, 439–447.
- Perez AG, Olias R, Espada J, Olias J M, Sanz C (1997): Rapid determination of sugars, nonvolatile acids, and ascorbic acid in strawberry and other fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45, 3545–3549.
- Perez AG, Olías R, Luaces P, Sanz C (2002): Biosynthesis of strawberry aroma compounds through amino acid metabolism. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 4037–4042.
- Perkins-Veazie P (1995): Growth and ripening of strawberry fruit. *Horticultural reviews* 17, 267–297.

- Raven JA, Smith FA (1976): Nitrogen assimilation and transport in vascular land plants in relation to intracellular pH regulation. *New Phytologist* 76, 415–431.
- Römheld V (1986): pH-Veränderungen in der Rhizosphäre verschiedener Kulturpflanzenarten in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot. *Kali-Briefe* 18, 13–30.
- Rosopulo A, Hahn M, Stärk H, Fiedler J (1976): Vergleich verschiedener Veraschungsmethoden für die nasschemische Bestimmung von Mengen- und Spurenelementen in Kulturpflanzen. *Landwirtschaftliche Forschung* 29, 199–209.
- Rule JH, Graham ER (1976): Soil labile pools of manganese, iron and zinc as measured by plant uptake and DTPA equilibrium. *Soil Science Society of America Journal* 40, 853–857.
- Sarkar AN, Jones RG (1982): Effect of rhizosphere pH on the availability and uptake of Fe, Mn and Zn. *Plant and Soil* 3, 361–372.
- Schaller G (1986): Einige Ursachen und Wirkungen der pH-Änderungen in der Rhizosphäre. *Kali-Briefe* 18, 1–12.
- Schnug E, Finck A (1981): Einfluß unterschiedlicher Stickstoffdüngungsformen auf die Mobilisierung von Spurennährstoffen. *Landwirtschaftliche Forschung* 37, 234–523.
- Schortenmeyer M, Feil B, Stamp P (1993): Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root-system. *Annals of Botany* 72, 107–115.
- Schubert S (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor, *Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart*.
- Schubert S, Yan F (1997): Nitrate and ammonium nutrition of plants: Effects on acid/base balance and adaptation of root cell plasma membrane H⁺ ATPase. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160, 275–281.

- Schubert S, Schubert E, Mengel K (1990): Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans (*Vicia faba*). *Plant and Soil*, 124, 239-244.
- Shaw DV (1988): Genotypic variation and genotypic correlation for sugars and organic acids of strawberries. *Journal of American Society for Horticultural Science* 5, 770–774.
- Siddiqu MY, Malhotra B, Min X, Glass AD (2002): Effects of ammonium and inorganic carbon enrichment on growth and yield of a hydroponic tomato crop. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 191–197.
- Skupien K, Oszmianski J (2004): Comparison of six cultivars of strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.) grown in northwest Poland. *European Food Research and Technology* 219, 66–70.
- Smith FA, Raven JA (1979): Intracellular pH and its regulation. *Annual Review of Plant Physiology* 30, 289–311.
- Somers I I, Shive J W (1942): The iron-manganese relation in plant metabolism. *Plant Physiology* 17, 582–602.
- Sommer K, Titz R, Wendt T (1987): Ammonium-Depotdüngung: Eine Möglichkeit zur umweltverträglichen Stickstoffdüngung im Feldgemüsebau. *Forschung und Beratung, wissenschaftliche Berichte der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn* 36, 18–41.
- Steffens D, Mühling KH, Schubert S (2004): Agrikulturchemisches Praktikum. Verlag Grauer, Beuren, Stuttgart
- Sturm K, Koron D, Stampar F (2003): The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage. *Food Chemistry* 83, 417–422.
- Sweeny JP, Chapman VJ, Hepner PA (1970): Sugar, acid and flavour in flesh fruits. *Journal of the American Dietetic Association* 57, 432–435.

- Taureilles-Saurel C, Romieu CG, Robin JP, Flanzly C (1995): Grape (*Vitis vinifera* L.) malate dehydrogenase. II. Characterisation of the major mitochondrial and cytosolic isoforms and their role in ripening. *American Journal for Enology and Viticulture* 46, 29–36
- Toldam-Andersen TB, Hansen P (1997): Growth and development in black currant (*Ribes nigrum*). III. Seasonal changes in sugars, organic acid, chlorophyll and anthocyanins and their possible metabolic background. *Journal of Horticultural Science* 72, 155–169.
- Trewavas A, Malhó R (1997): Signal perception and transduction: The origin of the phenotype. *The Plant Cell* 9, 1181–1195.
- Ulrich D, Hoberg E, Olbricht K (2006): Pflanzenzüchtung und sensorische Qualität. *Aktuelle Ergebnisse der BAZ-Forschung*. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen.
- Van Beusichem ML (1985): Intracellular pH regulation during NO₃⁻-assimilation in shoot and roots of *Ricinus communis*. *Plant Physiology* 78, 768–773.
- Van Beusichem ML, Kirkby EA, Baas R (1988): Influence of nitrate and ammonium nutrition on the uptake, assimilation and distribution of nutrients in *Ricinus communis*. *Plant Physiology* 86, 914–921.
- Walker AJ, Ho LC (1976): Carbon translocation in the tomato: Carbon import and fruit growth. *Annals of Botany* 41, 813–823.
- Walker AJ, Ho LC (1977): Carbon translocation in the tomato: Effects of fruit temperature on carbon metabolism and the rate of translocation. *Annals of Botany* 41, 825–832.
- Whiting GC (1958): The nonvolatile organic acids of some berry fruits. *Journal of Science of Food and Agriculture* 9, 244–248.
- Wiesler F (1997): Agronomical and physiological aspects of ammonium and nitrate nutrition of plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160, 227–238.

- Woodward JR (1972): Physical and chemical changes in developing strawberry fruits. *Journal of Science of Food and Agriculture* 23, 465–473.
- Wu BH, Génard M, Lobit P, Longuenesse JJ, Habib R, Li SH (2007): Analysis of citrate accumulation during peach fruit development via a model approach. *Journal of Experimental Botany* 58, 1–12.
- Yamaki S (1995): Physiology and metabolism of fruit development/biochemistry of sugar metabolism and compartmentation in fruits. *Acta Horticulturae* 398, 109–120.
- Yan F, Schubert S, Mengel K (1992): Effect of low root medium pH on net proton release, root respiration, and growth of corn (*Zea mays* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.). *Plant Physiology* 99, 415–421.
- Yan F, Feuerle R, Schaeffer S, Fortmeier H, Schubert S (1998): Adaptation of active proton pumping and plasmalemma ATPase activity of corn roots to low root medium pH. *Plant Physiology* 117, 311–319.
- Zentralverband Gartenbau (Mai 2008): Heimische Erdbeeren beim Verbraucher immer beliebter. Berlin, *ZVH-News, Aktuelle Verbandsinformationen auf einen Blick*. www.g-net.de/content/news

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Sven Schubert für die Bereitstellung des Themas und für das Vertrauen und die Unterstützung die er mir entgegengebracht hat. Auch möchte ich Herrn Prof. Dr. Diedrich Steffens danken, auf dessen Hilfe ich bei fachlichen und nicht-fachlichen Problemen immer zählen konnte.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Mitgliedern des Institutes für ihre Unterstützung bedanken. Besonders möchte ich dabei Anita Langer und Frau Dr. Britta Pitann erwähnen, die mir mit Rat und Tat beiseite standen.

Gedankt sei auch meinen Eltern, Gudrun und Lothar Naujoks, die mir in einer besonders schwierigen Lebenslage den Rücken freigehalten haben und meinen beiden Kindern Rosa und Sophia, die mit mir in den vergangenen Jahren, gemeinsam Höhen und Tiefen durchlebt haben.

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen
Version der Arbeit entfernt.**

**The curriculum vitae was removed from the
electronic version of the paper.**



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN 3-8359-5477-6



9 783835 195477

© Patrizia Tilly - Fotolia.com