



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Pflanzenernährung und Bodenkunde

Prof. Dr. Bernhard Seggewiß

Bachelor-Studienarbeit

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2010-0053-2

„Bor in der Natur, in landwirtschaftlich genutzten Böden und im Rapsanbau“

Von

Hans-Martin Lüth

Februar 2010

Inhaltsverzeichnis

<i>I</i>	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	4
<i>II</i>	<i>Tabellenverzeichnis</i>	5
<i>III</i>	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	5
1	Einleitung	6
2	Bor in der Natur	7
2.1	<i>Historie und Wachstum des Borverbrauchs in der Landwirtschaft</i>	7
2.2	<i>Vorkommen und Eigenschaften</i>	8
2.3	<i>Physiologische Rolle des Bors in der Pflanze</i>	11
2.3.1	<i>Bormangel</i>	13
2.3.2	<i>Bortoxizität</i>	16
3	Bor in landwirtschaftlich genutzten Böden	20
3.1	<i>Verfügbarkeit von Bor in landwirtschaftlich genutzten Böden</i>	20
3.2	<i>Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit von Bor im Boden</i>	21
3.3	<i>Bestimmungsmethoden des pflanzenverfügbaren Borgehalts und anzustrebende Borgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden</i>	24
4	Bor im Rapsanbau	27
4.1	<i>Bedeutung des Bors im Rapsanbau</i>	27
4.2	<i>Bordüngung im Raps</i>	31
4.2.1	<i>Bodendüngung</i>	31
4.2.2	<i>Blattdüngung</i>	33
4.3	<i>Einfluss der Bordüngung auf den Rapsertag</i>	35
5	Fazit	37
6	Zusammenfassung der Arbeit	38

7 Literaturverzeichnis	40
7.1 Bücher und Zeitschriften	40
7.2 Onlinequellen	42
8 Eidesstattliche Erklärung	43

I Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Futterrübenblattstiel mit Narbenbildung auf der Stieloberseite infolge von Bormangel 16
- Abb. 2 Aufgeschnittene Zuckerrübe (*Beta vulgaris saccharifera*) links: „wasserfleckiges“ Gewebe, Mitte: Höhlenbildung, rechts: Herz- und Trockenfäule durch Bormangel 16
- Abb. 3 Querschnitt durch Zuckerrüben (*Beta vulgaris saccharifera*) links: kranke Rübe, rechts: gesunde Rübe 16
- Abb. 4 Einzelpflanze der Sommergerste (*Hordeum vulgare*) mit charakteristischen Symptomen von Borüberschuss 19
- Abb. 5 Blätter von Sommergerste (*Hordeum vulgare*) mit stark ausgeprägten Borüberschuss-symptomen: braunen, nekrotischen Flecken, vorwiegend entlang der Blattränder und in den chlorotisch aufgehellten Blattspitzen 19
- Abb. 6 Borüberschuss-symptome bei Zuckerrüben (*Beta vulgaris saccharifera*) in einem Gefäßversuch mit + 10 ppm Bor 19
- Abb. 7 Bormangel bei Raps (*Brassica napus*); Symptome: eingerollte jüngere Blätter und rot-violette Verfärbung von Unterseite und Rand eines älteren Blattes 29
- Abb. 8 Bormangel bei Raps (*Brassica napus*); Symptome: verdickte Stängel und Blattstiele mit zum Teil verkorkten Längsrissen, Verbräunungen und Hohlräumen 29
- Abb. 9 Bormangel bei Raps (*Brassica napus*); Symptome: gehemmte und verkümmerte Blütenbildung 29
- Abb. 10 Bormangel bei Raps (*Brassica napus*); Symptome: verkümmerte und samenlose Schoten 29

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Borgehalt in der Natur	8
Tabelle 2	Einfluss von Bor auf die Keimung von Machorkapollen	11
Tabelle 3	Vergleich von TSG und TEG ausgewählter Nutzpflanzen	17
Tabelle 4	Gehaltsklassen zur Beurteilung des Borversorgungszustandes von Ackerböden	25
Tabelle 5	Gehaltsklassen zur Bestimmung des Borversorgungszustandes von anmoorigem und moorigem Boden nach der Heißwasserextraktionsmethode von Berger und Truog	26
Tabelle 6	Empfehlung zur Bodendüngung mit Bor im Rapsanbau	32
Tabelle 7	Zeitpunkt der Bordüngung und Einfluss auf den relativen Kornertrag	35

III Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Abkürzung</u>	<u>Erläuterung</u>
a	Jahr	S.	Seite
Abb.	Abbildung	t	Tonne
B	Bor	Tab.	Tabelle
dt	Dezitonne	TS	Trockensubstanz
g	Gramm		
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten		
ha	Hektar		
i.d. TS	in der Trockensubstanz		
kcal	Kilokalorien		
kg	Kilogramm		
l	Liter		
m ³	Kubikmeter		
mg	Milligramm		
ppm	parts per million		
s.	siehe		

1 Einleitung

Die Welternährung nimmt auch im Jahr 2010 eine wichtige Rolle ein. Es gibt noch zahlreiche Länder, in denen die Menschen hungern, weil nicht genug Nahrungsmittel zur Verfügung stehen. Dies ist hauptsächlich in Entwicklungs- und Kriegsländern der Fall, da das Geld, die oft veraltete Produktionstechnik, die Niederschlagsmengen, der Nichteinsatz von Düngemitteln, das Know How der Farmer und noch viele andere Faktoren für entsprechend hohe Erträge auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht ausreichen. Obwohl die weltweite landwirtschaftliche Produktion rein rechnerisch zur Ernährung eines jeden Menschen mit 3000 kcal und 80 g Eiweiß pro Tag ausreicht, sterben trotzdem noch tausende Menschen am Tag durch die Folgen der Unte-
rernährung, weil Nahrungsmittel in vielen Ländern der Welt sehr knapp und für einen Großteil der Bevölkerung zu teuer sind. Ziel ist es daher in der Zukunft, die bedarfsgerechte, gesunde Ernährung der Bevölkerung mit hochwertigen Nahrungsmitteln und die Bereitstellung von Rohstoffen für die Industrie durch die eigene landwirtschaftliche Produktion abzusichern. Dazu ist es vor allem in den Entwicklungsländern notwendig, über die Intensivierung der Pflanzenproduktion eine wesentliche Steigerung des Ertragsniveaus sowie eine Stabilisierung der Erträge zu erreichen. Um dies auf den meistens durch Monokulturanbau ausgelaugten Böden durchsetzen zu können, müssen Düngemittel eingesetzt werden, um dem Boden die entzogenen Nährstoffe wieder zuzuführen. Nur durch diese Maßnahme und durch eventuelle Bewässerung in trockenen Gebieten, können diese Länder langfristig ihre eigene Versorgung mit landwirtschaftlichen Produkten sichern. Ein Nährstoff, der möglicherweise zu einer besseren Entwicklung und Ertragsbildung der Pflanzen beiträgt, ist das Spurenelement Bor.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag über die Wichtigkeit dieses Elementes für die Pflanzenentwicklung, vor allem für Nutzpflanzen auf landwirtschaftlich genutzten Böden leisten.

2 Bor in der Natur

2.1 Historie und Wachstum des Borverbrauchs in der Landwirtschaft

Borverbindungen sind bereits seit Jahrtausenden bekannt. Im alten Ägypten wurde zur Mumifizierung Natron eingesetzt, was unter anderem auch Borverbindungen enthielt. Im Kaiserreich China und im antiken Rom wurden Borverbindungen zur Herstellung von Glas genutzt. Erst im Jahr 1808 konnten die französischen Chemiker Joseph Louis Gay-Lussac (1778 – 1850) und Louis Jacques Thenard (1777 – 1857) reines Bor durch Reduktion mit Kalium herstellen. Zeitgleich gewann der Engländer Sir Humphry Davy (1778 – 1829) durch Elektrolyse von Borsäure reines Bor. Ursache für diese späte Entdeckung war, dass Bor auf Grund seiner hohen Sauerstoffaffinität hohe Temperaturen für die Reduktionsprozesse benötigt. Und auch dann bleiben nach der Reduktion des Sauerstoffes noch Oxidreste zurück (Möllinger, 1976; Seilnacht, 2002). Gegen Ende des 19. Jahrhunderts befassten sich Wissenschaftler wie Peligot (1876), Archangeli (1885) und Hotter (1890) näher mit diesem Element. Sie konnten aber, wie andere Forscher in den folgenden Jahren auch, nur Schädigungen an Pflanzen durch Bor feststellen, da die Konzentrationen in den Versuchen zu hoch angesetzt waren. Bor wurde zu dieser Zeit wegen seiner hohen negativen Wirksamkeit, auch in geringen Mengen, als giftiges Element angesehen (Katalymow, 1969).

In der Landwirtschaft wurde der Bor-, beziehungsweise der gesamten Mikronährstoffversorgung bis in die 1950er Jahre keine große Aufmerksamkeit geschenkt. Grund dafür waren die geringen Hektarerträge der Ackerkulturen, die auch ohne zusätzliche Mikronährstoffdüngung erzielt werden konnten. Die Versorgung konnte durch die Verwitterung und Mineralisierung der dem Boden zugeführten organischen Substanz weitestgehend gedeckt werden (Katalymow, 1969).

In der heutigen Landwirtschaft hat die zusätzliche Versorgung der Ackerflächen mit Mikronährstoffen (Spurenelementen) eine wichtige Rolle übernommen, denn deren Verbrauch ist aufgrund der Züchtung neuer Sorten mit wesentlich höheren Hektarerträgen deutlich angestiegen. Somit ist durch den erhöhten Bedarf an Mikronährstoffen eine zusätzliche Düngung bei der Erzeugung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen sehr wichtig. Bor ist neben Kupfer, Mangan, Molybdän, Zink und anderen Spurenelementen vor allem im Anbau von dikotylen (zweikeimblättrigen) Nutzpflanzen wie Raps und Zuckerrüben unerlässlich, da es hier bei unzureichender Borversorgung zu erheblichen Ertragsausfällen und Qualitätsverlusten kommen kann. Bor kommt in allen Bodenarten vor. Es ist aber in den verschiedenen Bodenarten in unterschiedlichen Mengen enthalten, so dass es notwendig ist, eine optimale Borversorgung für ein gleichmäßiges Wachstum der

Pflanzen sicherzustellen. Für die Düngung der Ackerflächen in der Bundesrepublik Deutschland werden jedes Jahr 800 bis 1000 t Bor verbraucht (Bergmann, 1993; Katalymow, 1969).

2.2 Vorkommen und Eigenschaften

Bor gehört zu den Elementen, die auf der Welt fast überall zu finden sind. Es ist Bestandteil aller pflanzlichen und tierischen Organismen und ein für Mensch, Tier und Pflanze unentbehrliches Spurenelement. Es ist in allen Gesteinen, Böden, Flüssen, Seen und im Wasser der Meere enthalten. Wie in Tabelle 1 aufgezeigt, variieren die Borgehalte der verschiedenen Gesteine sehr stark. So sind die Eruptivgesteine, das sind Oberflächengesteine wie zum Beispiel Vulkanit, bedeutend borärmer als die Sedimentgesteine. Sedimentgesteine sind Ablagerungs- und Schichtgesteine,

Tabelle 1

Borgehalt in der Natur (n. V. M. Goldschmidt und L. C. Peters aus Katalymow, 1969)

Untersuchtes Objekt	Borgehalt %	Untersuchtes Objekt	Borgehalt %
Eruptivgesteine	0,0003	Dolomit	0,00016...0,03
Sedimentgesteine	0,016...0,03	Meereswasser	0,0009
Meteoriten	0,00016...0,0003	Steinkohleasche	0,03...0,3
Manganerz	0,0016	Asche von Meeresalgen	0,016...0,3
Kalksteine	etwa 0,0003	Asche von Landpflanzen	0,003...0,16
Böden	0,00016...0,003		

wobei die Teilchen auf Grund ihrer Schwerkraft aus Flüssigkeiten oder Gasen abgelagert wurden. Hier ist Bor vor allem in Illiten und Smectiten enthalten. Hohe Anteile an Bor enthalten unter anderem auch die Asche von Meeresalgen, Steinkohleasche, einige Landpflanzen, Meer- und Erdölwasser sowie Wasser aus Schlammquellen. Insgesamt enthält die kontinentale Erdkruste im Durchschnitt etwa 10 mg B/kg Boden (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Der Masseanteil in der Erdkruste beträgt 0,0016 % und Bor steht an der 37. Stelle der Elementhäufigkeit. In der Natur kommt Bor nur in sauerstoffhaltigen Verbindungen und nicht als elementares Bor vor. Diese Verbindungen werden als Borate bezeichnet. Neben Calcium-, Magnesium- und Natriumboraten gibt es noch eine Vielzahl anderer Borverbindungen, die zum großen Teil unterschiedliche Borgehalte aufweisen. Abgebaut werden die Minerale Borsäure ($B(OH)_3$) und ihre Salze Borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), Ulexit ($NaCa[B_5O_6(OH)_6] \cdot 5H_2O$), Colemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$), Ker-

nit ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_6(\text{OH})_2] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) und noch einige andere. Bei der Verwitterung der Gesteine wird Bor vorwiegend als Borsäure freigesetzt. Diese ist, wie auch die Salze, leicht wasserlöslich. Der Abbau borhaltiger Mineralien wird als Boratabbau bezeichnet. Wichtigstes Mineral zur Gewinnung von Bor ist Kernit, das in sehr großen Mengen in Kalifornien vorkommt. Es ist sehr rein und wird dort großtechnisch abgebaut. Das weltweit größte Vorkommen an Bor befindet sich in der Türkei. Dort lagern 72 % des Weltvorkommens und abgebaut werden die Mineralien Pandernit, Ulexid und Kernit. Weitere, aber weitaus geringere Vorkommen befinden sich in den GUS-Staaten, in Argentinien, in der Toscana, in Deutschland und in einigen anderen Ländern. In Deutschland wird in den Salzlagerstätten von Straßfurt in erster Linie Borsäure abgebaut, die weltweit gesehen aber nur eine geringe wirtschaftliche Bedeutung hat (Möllinger, 1976; Binder, 1999; Hesse et al., 2002).

Nach Scheffer und Schachtschabel (2002) beträgt der Borgehalt der Böden des humiden Bereiches zwischen 5 und 80 mg B/kg Boden, wobei die Gehalte auf sandreichen Böden deutlich niedriger sind, als auf humosen und tonreichen Böden. Häufig korreliert der Borgehalt mit dem Kohlenstoff- und Tongehalt der Böden, was darauf hinweist, dass Bor zum Großteil an Tonminerale und organische Substanzen gebunden ist. In der Natur kann Bor durch Verbrennungsvorgänge sowie durch versprühtes Meerwasser auch in die Atmosphäre und weiter durch Niederschläge in den Boden gelangen. Die Boreinträge sind vor allem in meernahen Gebieten hoch.

In der Chemie ist Bor ein nichtmetallisches Element und befindet sich im Periodensystem der Elemente in der dritten Hauptgruppe, neben Aluminium (Al), Gallium (Ga), Indium (In) und Thallium (Tl), mit der Ordnungszahl fünf. Auf Grund seiner hohen Schmelz- (2075°C) und Siedetemperatur (4000°C) ist es sehr hitzebeständig. Bor hat eine geringe Dichte von nur 2,35 bis 2,46 g je Kubikzentimeter, besitzt aber nach Diamant die zweithöchste Härte. Die elektrische Leitfähigkeit des Bors ist bei Raumtemperatur gering, steigt aber beim Erhitzen stark an. So ist sie bei 600°C etwa 100-mal höher als bei Raumtemperatur. Auf Grund dieser Eigenschaften findet Bor in verschiedenen Verbindungen mit anderen Stoffen hauptsächlich Verwendung in der Elektro- und der chemischen Industrie (Möllinger, 1976).

Wie in Absatz zwei erwähnt, kommt Bor in der Natur nicht elementar vor. Es kann aber durch chemische Verfahren aus seinen Verbindungen gelöst werden. Nach Möllinger (1976) sind zwei kristalline Borformen, das α -rhomboedrisches und das β -rhomboedrisches Bor und eine amorphe Borform bekannt. Bei dem amorphen Bor befinden sich die Atome nicht in einer geordneten Struktur, sondern sind in einem unregelmäßigen Muster angeordnet. Die Atome der kristallinen Formen sind nicht zufällig, sondern in einem regelmäßigen Kristallgitter angeordnet. Das amorphe Bor ist schwarz, glasig, undurchsichtig und scheidet sich im Allgemeinen als Halbkugel ab.

Das α -rhomboedrische, oder auch rote Bor liegt als „mikrokristallines“ oder „grobkristallines“ Bor in Form von Kristallen vor. Diese Kristalle sind mit einer Schicht aus amorphem Bor umgeben. Rotes Bor erhielt seinen Namen, weil die Kristalle unter dem Mikroskop rubinrot leuchten. Aufgrund der schwachen Atombindungen des α -rhomboedrischen Bors kommt es bei hohen Temperaturen zu einer Unbeständigkeit der Form dieses Kristalls. Bei einer Temperatur von 1200°C geht diese instabile Form in die einzige stabile Form, das β -rhomboedrische Bor über. Dieses Molekül besteht aus 105 bis 108 Boratomen (Möllinger, 1976; Seilnacht, 2002). Aber die Unsicherheit der Zusammensetzung dieses Moleküls (105 bis 108 Atome) lässt darauf schließen, dass das β -rhomboedrische Bor noch nicht vollkommen erforscht ist.

2.3 Physiologische Rolle des Bors in der Pflanze

Bor ist ein unersetzliches Element für das Leben der Pflanzen. Es hat, wie auch alle anderen Makro- und Mikronährstoffe spezifische Aufgaben und kann durch kein anderes Element in seinen Funktionen ersetzt werden. W. E. Brenchley und K. Warrington stellten Versuche mit insgesamt 52 anderen Elementen an und wollten dadurch einen Borsatz finden. Doch die Versuche zeigten, dass nur durch Zugabe von Bor zu den Nährmedien die Symptome des Bormangels unterdrückt wurden (Katalymow, 1969).

Die Pflanzen nehmen in den Boden gebrachtes Bor sehr schnell auf, wobei die Aufnahmemenge und die Verlagerung des Bors in der Pflanze in starkem Maße von der Konzentration in der Bodenlösung abhängen. Eine Pflanzenart kann je nach Borgehalt des Bodens unterschiedliche Bormengen enthalten. In diesem Punkt unterscheidet sich Bor von anderen, für die Pflanze auch lebenswichtigen Nährstoffen. So liegt der optimale Borgehalt in den Blättern von Zuckerrüben kurz vor Bestandsschluss auf unterschiedlichen Böden zwischen 35 und 100 ppm i.d. TS. Die optimalen Borgehalte im Boden (Gehaltsklasse C) variieren zwischen 0,15 mg B/kg Boden, auf Sandböden bis hin zu 0,7 mg B/kg Boden, auf tonigem Lehm und Ton (Kape/Klingenberg, 2004). Daraus ist zu erkennen, dass die Gehalte an Bor in den Blättern eng mit der Verfügbarkeit im Boden im Zusammenhang stehen.

Vielfach enthalten die unteren, älteren Teile der Pflanze mehr Bor als die jüngeren. Das zum Großteil in den alten Blättern gespeicherte Bor kann nicht an die jungen Blätter abgegeben werden, weshalb die Mangelsymptome zuerst an den jungen Blättern auftreten. Damit es nicht zu einem verzögerten Wachstum kommt, muss Bor während der gesamten Vegetationszeit immer in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen. Es ist für das Wachstum ungünstig, wenn Bor in

den Anfangsstadien nur in geringen Mengen und dafür in den späteren Entwicklungsstadien in ausreichenden Mengen bereit gestellt werden kann, da die Entwicklung der Pflanzen auf Grund der schlechten Verlagerbarkeit nicht optimal verläuft. Wie schon erwähnt, variiert der Borgehalt in den Pflanzen je nach Pflanzenart und Borgehalt im Boden. Er liegt nach Scheffer/Schachtshabel (2002) zwischen 2 und 100 ppm B i.d. TS. Monokotyledonen (einkeimblättrige Pflanzen) sind in der Regel mit 2 bis 10 ppm B i.d. TS ausreichend versorgt, während Dikotyledonen (zweikeimblättrige Pflanzen) etwa 20 bis 60 ppm B i.d. TS benötigen. Milchsaftführende Gewächse wie Löwenzahn und Mohn haben einen besonders hohen Borbedarf, er liegt zwischen 80 und 90 ppm B. Die Borentzüge betragen bei guten Weizerträgen ca. 50 g B/ha*a, bei Kartoffeln ca. 300 g B/ha*a und bei Zuckerrüben und Raps einschließlich der Blätter ca. 450 g B/ha*a (Bergmann, 1993).

In den Pflanzen erfüllt Bor viele wichtige Aufgaben, so hat es große Bedeutung bei der Entwicklung und Ausbildung der generativen Organe. Reich an Bor sind die Staubgefäße, Narbe, Griffel und die Fruchtknoten. Wie Analysen einiger Forscher ergaben, enthalten die Blüten der Pflanzen mehr Bor als andere Organe, was zu der Vermutung führt, dass Bor wichtige Funktionen in der Befruchtung und Samenbildung hat (Katalymow, 1969). E. V. Bobko und V. V. Cerling haben Versuche durchgeführt, bei denen sie den Einfluss von Bor auf das Keimen der Pollen und das Wachstum der Pollenschläuche von Machorka (s. Tab. 2), einer russischen Tabaksorte, untersuchten.

Tabelle 2

Einfluss von Bor auf die Keimung der Machorkapollen (n. V. V. Cerling aus Katalymow, 1969)

Versuchsvariante	Gekeimter Pollen (%)		Länge der Pollenschläuche (µm)	
	In Saccharose	In Saccharose + H ₃ BO ₃	In Saccharose	In Saccharose + H ₃ BO ₃
Bor verfügbar während der gesamten Zeit	52	82	31,9	59
Bor verfügbar bis zur Ausscheidung der generativen Zelle im Pollenkorn	35	75	3,0	60
Bor verfügbar bis zum Beginn der Knospenbildung	8	55	3,0	33,5

Hier ist erkenntlich, dass durch die Zugabe von Bor in das Nährmedium die Anzahl der gekeimten Pollen bis zu sieben Mal höher ist als ohne diesen Nährstoff. Dabei ist es entscheidend, bis zu welchem Wachstumsstadium Bor bereit gestellt wird. Je länger die Pflanze es aus dem Nährmedium aufnehmen kann, desto größer ist die Anzahl der gekeimten Pollen. Auch bei der Länge der Pollenschläuche ist ersichtlich, dass Bor das Längenwachstum fördert. Die Pollenschläuche sind bis zu 20-mal länger. Durch die Zugabe von Bor verläuft die Keimung der Pollen schneller, beziehungsweise ohne Bor nur langsam oder gar nicht. Außerdem führt der Ausschluss des Nährstoffs während des Reifens der Samen zu einer verminderten Anzahl von Früchten. Das Abfallen dieser letztendlich unreifen Früchte weist darauf hin, dass Bor in allen Entwicklungsphasen für die Pflanze unbedingt erforderlich ist (Katalymow, 1969).

Besonders große Bedeutung hat Bor für den Kohlenhydratstoffwechsel. Bei einem Mangel kommt es zu einer Anhäufung von Zuckern in den Blättern, was hauptsächlich bei Rüben und anderen Hackfrüchten der Fall ist. Ursache hierfür ist eine Störung des Kohlenhydrattransportes. Weitere Funktionen hat Bor beim Aufbau von Zellwand und Zellmembran. So ist es in der Zellwand wichtig für den ungestörten Ablauf der Gewebedifferenzierung, für den Aufbau der Feinstruktur der Zellwände und dient zur Stabilisierung. Beim Aufbau der Zellmembran ist es an der Bildung der Pektinstoffe beteiligt. Weiterhin hat Bor Einfluss auf den Stickstoffwechsel in der Pflanze, es ruft eine Störung der Eiweißsynthese hervor. Bei einem Mangel sinkt der Eiweißgehalt in den Blättern beträchtlich ab, wogegen der Gehalt an Nichteiweißstoffen steigt. Allerdings sind diese Fakten noch kein Beweis für die direkte Beteiligung an der Eiweißsynthese, da diese Störung auch auf die Folge der Störung des Kohlenhydratstoffwechsels durch Bormangel sein kann, was aber noch nicht genau bewiesen werden konnte. Es ist aber bestätigt, dass Bor direkt oder indirekt fast alle Stoffwechselfvorgänge beeinflusst, auch den Stickstoffstoffwechsel (IFZ-Göttingen, 2009; Katalymow, 1969).

Ebenfalls ist Bor am Nucleinsäurestoffwechsel beteiligt, wo es nach M. J. Skol'nik (1966) für die Aufrechterhaltung des Ribonuclein- und des Desoxyribonucleinsäuregehaltes (RNA- und DNA-Gehalt) von großer Bedeutung ist. Bei der Photosynthese führt die Anwesenheit von Bor zu erheblich höheren Photosyntheseleistungen. Des Weiteren erhöht sich der Zuckergehalt von Rüben und Beeren, der Vitamin C-Gehalt in Karotten und der Fettgehalt von Ölsaaten. Außerdem verfügen die Pflanzen über eine bessere Widerstandsfähigkeit gegen ungünstige Witterungsbedingungen (Bergmann, 1993). Alles in allem nimmt Bor eine äußerst wichtige und vielseitige Rolle in den Lebensprozessen der Pflanzen ein.

2.3.1 Bormangel

Die Bormangelgebiete nehmen auf der Erde eine Fläche von insgesamt etwa 8 Millionen Hektar ein. So wird allgemein die Meinung vertreten, dass der Anteil der zu niedrig mit Bor versorgten Böden im Vergleich zu anderen Mikronährstoffen am größten ist. Da die Pflanzen unterschiedliche Bormengen für die Ausbildung der lebenswichtigen Organe benötigen, liegt es auf der Hand, dass die Bormangelsymptome bei Pflanzen, je nach Art und Gattung, erst bei sehr unterschiedlichen Borkonzentrationen auftreten. Bei Weizen und Gerste, die zu den einkeimblättrigen Pflanzen zählen, tritt Bormangel erst bei weniger als 2 ppm B i.d. TS auf, wo hingegen Zuckerrüben, die zu den zweikeimblättrigen Pflanzen zählen, schon bei unter 20 ppm B i.d. TS Mangelercheinungen aufweisen (Bergmann, 1993).

Nach Kluge et al. (Bergmann, 1993) muss der für die Pflanzen verfügbare Borgehalt im Boden als eine durch die Faktoren pH-Wert und Trockenheit bestimmte dynamische Größe betrachtet werden. So kommt es durch niedrige und mittlere Borgehalte im Boden in Verbindung mit Trockenheit zu Bormangel in den Pflanzen, da diese durch den verringerten Massenfluss sowie der verminderten Diffusionsrate der Borationen nur noch unzureichende Mengen an Bor aufnehmen können. Durch Niederschläge und einer daraus resultierenden erhöhten Bodenfeuchte wird die Borverfügbarkeit und -aufnahme begünstigt. So kann bei geringen verfügbaren Borgehalten und unterschiedlicher Witterung abwechselnd Bormangel und normales Wachstum auftreten. Bei Futter- und Zuckerrüben kommt es nach Trockenperioden und bereits vorher abgestorbenem Vegetationspunkt häufig zu einem seitlichen Neuaustrieb von Blättern. Außerdem kommt es durch mehrmalige Durchfeuchtung und Austrocknung zu einer erhöhten Boradsorption im Boden, sodass der für die Pflanzen verfügbare Borgehalt absinkt. Dies ist aber eher auf borarmen als auf borreichen Standorten der Fall (Bergmann, 1993; Lieberoth, 1982).

Neben Trockenheit hat auch der pH-Wert des Bodens großen Einfluss auf den Borgehalt in den Pflanzen. In Versuchen von Peterson und Newman (Bergmann, 1993) kam es auf Böden mit pH-Werten von 5,2 bis 5,5 durch eine Aufkalkung auf 6,3 bis 7,4 zu einer starken Abnahme des Borgehaltes in den Pflanzen. Auch Kluge et al. (Bergmann, 1993) zeigten, dass der Borgehalt in den Pflanzen nach einer Aufkalkung sank, vor allem, wenn vorher hohe Bordüngergaben verabreicht worden sind. Dieser Rückgang der Gehalte ist aber stark abhängig von der Spanne der pH-Wert-Erhöhung und des extrahierbaren Ausgangs-Bor-Gehalts.

Bormangel wirkt sich bei den Pflanzenarten durch unterschiedliche visuell wahrnehmbare und charakteristisch morphologische Veränderungen aus. Auf Grund der hohen Immobilität des Bors treten die Mangelsymptome zuerst an den jungen Blättern, beziehungsweise an den Vegetations-

punkten von Spross und Wurzel auf. Mangelsymptome können nach Baumgärtel et al. (2006), Bergmann (1993), Ernert (2005), Haberland (2005) und Zorn (2008) sein:

- chlorotische, gelbe bis rötliche Verfärbungen der jüngsten Blätter, mit oder ohne nachfolgende Nekrosen;
- rosettenförmig angeordnete jüngere Blätter;
- kleine und deformierte, oft in der Blattform vereinfachte Blätter mit asymmetrischer Nervatur;
- Blatt- und Stengelverdickungen, hauptsächlich unterhalb des abgestorbenen Vegetationspunktes, sowie -brüchigkeit;
- Riss- und Korkbildungen auf den Blattstielen, Stengeln und oft auch auf den Blattadern;
- die Kotyledonen sind oft vergrößert, die Stengelquerschnitte häufig unregelmäßig und das Internodienwachstum ist gestaucht;
- Absterben des Vegetationskegels beziehungsweise der Terminalknospen und bei starkem Mangel auch Absterben des Sprosses („Spitzensterben“ und „Knospenfall“);
- verstärktes Austreiben von Seitenknospen die sich normal entwickeln, oder aber auf Grund des Verlustes der Apikaldominanz bald absterben (besonders nach Niederschlägen bei vorausgehender Trockenheit);
- reduzierte Knospen-, Blüten- und Samenbildung, verbunden mit vorzeitigem Samenkapsel-fall;
- keine oder nur mangelhafte Befruchtung, da die Pollenkeimung und das Wachstum der Pollenschläuche einen relativ hohen Borbedarf haben;
- gehemmtetes Wurzelwachstum mit starker Vermehrung der Seitenwurzeln, was zu einem „struppigen“ Aussehen der Wurzeln führt;
- die kurzen Wurzeln sind oft „keulenartig“ verdickt, braun, häufig aufgeplatzt und schleimig;
- Glasigkeit, Braunfleckigkeit, Trockenfäuleerscheinungen und Ausbildung von zadrigem Gewebe;
- zum Teil Hohlrumbildungen in Früchten, Rübenkörpern und Wurzelstrünken, verstärkt in der Nähe von Gefäßbündeln und Leitgewebe;
- geringer Samenertrag im Verhältnis zum gesamten Masseertrag und Qualitätseinbußen.

Neben diesen äußeren Mangelercheinungen treten auch wesentliche Veränderungen im anatomischen Bau der Pflanzen auf. Bormangel ist Ursache für Störungen der Teilung, des Wachstums und der Differenzierung der Zellen, was zu unnormalen Formen und Größen führt. Es gibt zahlreiche Bormangelerkrankungen, die bekannteste ist die Herz- und Trockenfäule der Zucker-

und Futterrüben (s. Abb. 1-3 S.16). Diese tritt hauptsächlich ab Ende Juli und verstärkt im August auf. Insbesondere in trockenen Jahren oder nach längeren Trockenperioden ist mit Bormangel zu rechnen. Die jungen, an der Blattbasis schmalere Blätter sitzen infolge des gestauchten Wachstums sehr dicht und eng. Die Interkostalfelder längs der Mittelrippe sind wellig, spröde, brüchig und zwischen den Adern sind grüngelbe bis gelbe Flecken erkennbar. Es kommt zu Verkrümmungen und Verdrehungen der Blätter. An den Stielen der jungen und mittleren Blätter sind pustel- oder schorfähnliche, graue bis dunkelbraune verfärbte Erhebungen zu sehen, die sich zunehmend schwarz verfärben und unter Austritt einer sirupartigen Flüssigkeit narbig aufreißen (s. Abb. 1, S.16). An den Blattkränzen sind Welkeerscheinungen erkennbar, die Blätter trocknen schließlich von den Rändern her ein und werden braun bis schwarz. Bei fortgeschrittenem Mangel greift die Braun- und Schwarzfärbung auch auf die älteren Blätter und den Rübenkörper über, vor allem auf die Gefäßbündelringe (s. Abb. 2 und 3, S.16). Nach Niederschlägen kann es zur Ausbildung neuer Blattkränze mit gedrungenen Blättern kommen. Oft sind bei der Ernte nur angedeutete, sich jedoch während der Lagerung zunehmend bemerkbar machende Trockenfäuleschäden zu finden, die zu hohen Verlusten führen können (Bergmann, 1993; Incona 2007, Scheffer/Schachtschabel, 2002).

Bei näherem Hinsehen und nach mikroskopischer Betrachtung ist bei starkem Bormangel die Ausdifferenzierung der Zellen, Leitbündel- und Mesophyllzellen gehemmt, wodurch es zu Zellwachstumsanomalien kommt. Die Kambium-Zellwandausbildung ist gehemmt. An Stelle von Phloem und Xylem entsteht hauptsächlich parenchymatisches Gewebe, das später, wie auch die nicht vollkommen ausgebildeten Leitbündel, zusammenbricht. Das meristematische Gewebe stirbt ab, da es die Verbindung zu den Leitbündeln verliert. Verdickungen der Kambiumregionen führen zu einem Aufreißen und Abbrechen von Stielen, Stengeln und Früchten. Zum Teil sind aufgelöste Zellkerne zu erkennen und in den Zellen fehlen die Interzellularen. Bei Bormangel sind auch erhöhte Zellteilungsraten des Kambiums zu erkennen, was wahrscheinlich auf Grund mangelnder Auxin-Inaktivierung eintritt. In Versuchen mit der Injektion nicht pflanzeigener Purin- und Pyrimidinbasen kam es zu Anomalien an den Blättern (Bergmann, 1993). Nach Skol'nik (1966, 1974) ist für das Absterben des Vegetationspunktes ein Überschuss an Phenolen und Auxinen verantwortlich, wodurch es zu den beschriebenen Stoffwechselstörungen kommt. Durch die Komplexbildung des Bors werden Phenole inaktiviert, die dann auch das Enzym IES-Oxidase (Indolylessigsäure-Oxidase), welches die Auxinbildung hemmt, inaktivieren. Bei Bormangel kommt es nicht zu dieser Inaktivierung, sodass sich in den Pflanzen große Mengen an Auxinen anreichern. Andere Autoren vertreten die Meinung der Auxinanreicherung nicht. So sind die Bormangelsymptome nach Angaben von Bussler (Bergmann, 1993) auf das primäre

Symptom „Zellteilung ohne Differenzierung“ und somit auf irregulär wachsendes Gewebe zurückzuführen, ähnlich wie die Bildung von Tumorgewebe bei Mensch und Tier. Nach Untersuchungen von Fackler et al. (Bergmann, 1993) soll bei Bormangel die Konzentration an Auxinen in den Wurzel- und Sprossspitzen reduziert sein. Aufgrund dieser unterschiedlichen Meinungen zur Bormangelproblematik in den Pflanzen kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Punkt noch nicht alles ausreichend erforscht ist. Sicher ist aber, dass auf Grund der mikroskopischen Betrachtung der verschiedenartigen Symptomausbildungen alle Symptome auf die gleichen Zell- und Gewebeveränderungen zurückgeführt werden können.



Abbildung 1

Futterrübenblattstiel mit charakteristischer Narbenbildung auf der Stieloberseite infolge von Bormangel (Quelle: Bergmann, 1993)



Abbildung 2

Aufgeschnittene Zuckerrübe (*Beta vulgaris saccharifera*) links: „wasserfleckiges“ Gewebe, Mitte: Höhlenbildung, rechts: Herz- und Trockenfäule durch Bormangel (Quelle: Bergmann, 1993)

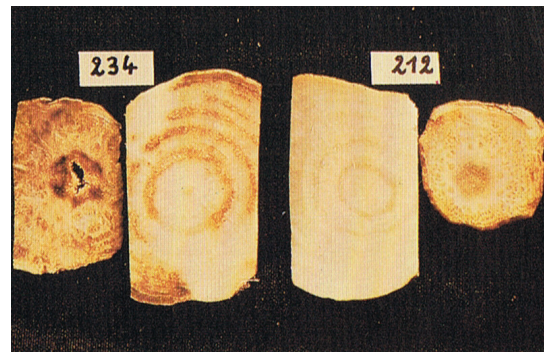


Abbildung 3

Querschnitt durch Zuckerrüben (*Beta vulgaris saccharifera*) links: kranke Rübe, rechts: gesunde Rübe (Quelle: Bergmann, 1993)

2.3.2 Bortoxizität

Bei dem Mikronährstoff Bor ist die Spanne zwischen einer ausreichenden Versorgung und Überschuss sehr gering, so dass es schnell zu Überdosierungen kommen kann. In den humiden Klimabereichen kommt es nur selten zu Bortoxizität an Pflanzen, es sei denn, dass bei festgestell-

tem Bormangel darauf hin mehrere Jahre eine Düngung mit borhaltigen Düngemitteln durchgeführt wurde, die auch bei bortoleranten Pflanzenarten Überschusserscheinungen hervorruft. Von wesentlich größerer Bedeutung ist Bortoxizität in den ariden und semiariden Gebieten, in denen es durch natürliche Prozesse, wie Salzakkumulation oder durch Verwendung von borhaltigem Wasser zur Beregnung der Ackerflächen zu einer Anreicherung im Boden und anschließend auch in den Pflanzen kommen kann. Das Auftreten von Bortoxizität hängt einerseits von der Borempfindlichkeit der Pflanzen und andererseits von den Borgehalten im Boden ab. Empfindliche Pflanzen, wie Gerste, Hafer und Weizen können bereits bei pflanzenverfügbaren Bodenborgehalten von 0,3 mg B/kg Boden geschädigt werden, während Kartoffeln, Futter- und Zuckerrüben deutlich höhere Borgehalte tolerieren (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Aufgrund dieser Toleranzgeigenschaften sollen nach Bergmann (1993) in der Landwirtschaft nur die nachfolgenden, borintensiven Pflanzen mit Bor gedüngt werden, dies sind unter anderem: Zucker- und Futterrüben, Raps, Sonnenblumen, Blumenkohl, Mais, Kartoffeln, Rot- und Weißklee, Ackerbohnen, Spinat und einige weitere, weniger bekannte Nutzpflanzen.

Nach Kluge (Bergmann, 1993) haben Untersuchungen mit verschiedenen Pflanzen ergeben, dass die Borgehalte im Spross, die zu beginnenden Borschädigungen führen (toxische Symptommengrenzwerte „TSG“), noch keine Ertragsausfälle bewirken. Erst bei wesentlich höheren Borgehalten kommt es durch Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums zu Ertragsausfällen. Die toxischen Ertragsgrenzwerte (TEG) betragen im Mittel das zwei- bis vierfache der TSG und diese das Mehrfache des optimalen Borgehaltes der Pflanzen (s. Tab. 3).

Tabelle 3

Vergleich von toxischem Symptommengrenzwert (TSG) und toxischem Ertragsgrenzwert (TEG) ausgewählter Nutzpflanzen (n. Kluge aus Bergmann, 1993)

Pflanzenart	Grenzwertbereiche im Spross in mg B/kg TS		
	Optimal	Toxisch TSG ¹⁾	TEG ²⁾
Sommergerste	5 ... 10	15 ... 35	80 ... 130
Winterweizen	5 ... 10	70 ... 130	220 ... 280
Kartoffeln	20 ... 50	130	250 ... 410
Zuckerrüben	30 ... 100	290 ... 370	350 ... 550

¹⁾ bezogen auf beginnende Bortoxizität

²⁾ Toxische Borgehalte in der Sprossmasse während der Vegetation, die zur Ernte eine 10 %ige Ertragsminderung hervorrufen

Hohe Mengen an Bor werden durch Kohlekraftwerke bei unzureichender Feststaubabscheidung freigesetzt, die auf benachbarten Ackerflächen zu hohen Borgehalten führen können. Bei der Bewässerung mit borhaltigem Wasser, das bis zu 2 mg B/l enthalten kann, kommt es häufig zu einer Boranreicherung im Boden und damit auch in den Pflanzen. Bei Gräsern, die hohe Borgehalte aufweisen, kann die Borkonzentration durch kurze Schnittintervalle abgeschwächt werden. Auf Böden mit niedrigen pH-Werten und sich toxisch auswirkenden Borgehalten kann durch eine Aufkalkung der Böden eine Pflanzenschädigung größtenteils vermieden werden, während bei hohen Boden-pH-Werten und hohen Bodenborgehalten eine Aufkalkung wirkungslos ist. Hier ist eine Entfernung des Bors, wenn überhaupt, nur über die Auswaschung in tiefere Bodenschichten möglich (Schinner/Sonnleitner, 1997).

Wie in Gliederungspunkt 2.3 erwähnt, lagert sich Bor in den Pflanzen hauptsächlich in den Blattspitzen und -rändern und insbesondere in den älteren Blättern ein. Daher sind die Überschusssymptome im Allgemeinen auch an den Blattspitzen und -rändern der älteren Blätter zu finden, die sich dann weiter auf das gesamte Blatt ausbreiten können. Borüberschuss führt zu Stoffwechselstörungen und später zur Ausbildung von Chlorosen (ein durch Chlorophyllmangel bedingtes Krankheitssymptom) und Nekrosen (Absterben des Blattgewebes). Nekroseflecken treten hauptsächlich bei borempfindlichen bis semitoleranten Pflanzen wie Getreide, Bohnen und Kartoffeln, weniger bei toleranten Pflanzen wie Zucker- und Futterrüben auf (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Die Blätter verfärben sich bei Bortoxizität mehr oder weniger hell- bis dunkelbraun, werden fleckig und zeigen später zusammenfließende Absterbeerscheinungen mit Kräuselungen der Blätter und/oder Blattverkrümmungen (Bergmann, 1993).

Getreide, besonders die Gerste, ist sehr borempfindlich. Hier sind an den älteren Blättern die Spitzen gelb verfärbt und mit dunkelbraunen pustelförmigen Flecken durchsetzt (s. Abb. 4 und 5, S.19). Bei starkem Bormangel treten die dunkelbraunen Pusteln im noch grünen Blatt auf. Die Chlorose und Fleckenbildung breiten sich unter Spitzen- und Blattrandverbrennungen auf das gesamte Blatt aus. Bei Getreide kann auch häufig eine Rotfärbung des Stängels beobachtet werden. Im Gegensatz zur Gerste sind bei Hafer und Weizen die Blattspitzen mehr ausgebleichen. Toxizitätssymptome treten schon bei über 14 ppm B i.d. TS auf (Bergmann, 1993).

Bei Zuckerrüben sind gelbweißbraune Randnekrosen zu erkennen, die auf die Interkostalflächen übergreifen. Die älteren Blätter sind durch unterbundenen Blattrandwachstum löffel- oder auch kaputzenartig verformt (s. Abb. 6, S.19). Nach Bussler und Döring (Bergmann, 1993) werden 800 bis 1000 ppm B i.d. TS als „blattlokale Grenzwerte“ für Chlorosen und 1500 ppm B i.d. TS für Nekrosen bei Sonnenblumen und in ähnlicher Höhe auch für Zuckerrüben, Sojabohnen und Baumwolle angegeben.



Abbildung 4

Einzelpflanze der Sommergerste (*Hordeum vulgare*) mit charakteristischen Symptomen von Borüberschuss
(Quelle: Bergmann, 1993)



Abbildung 5

Blätter der Sommergerste (*Hordeum vulgare*) mit stark ausgeprägten Überschusssymptomen: braunen, nekrotischen Flecken, vorwiegend entlang der Blattränder und in den chlorotisch aufgehellten Blattspitzen (Quelle: Bergmann, 1993)



Abbildung 6

Borüberschusssymptome bei Zuckerrüben (*Beta vulgaris saccharifera*) in einem Gefäßversuch mit + 10 ppm Bor
(Quelle: Bergmann, 1993)

3 Bor in landwirtschaftlich genutzten Böden

3.1 Verfügbarkeit von Bor in landwirtschaftlich genutzten Böden

Der Gehalt an Mikronährstoffen im Boden ist im Allgemeinen um ein Vielfaches höher, als der Bedarf der Pflanzen. Die geringe Konzentration des pflanzenverfügbaren Bors in der Bodenlösung beruht darauf, dass Bor im Boden nur in geringen Mengen durch Mineralisation und Verwitterung freigesetzt wird. Je höher der Zersetzungsgrad ist, desto mehr Bor liegt in pflanzenverfügbarer Form vor. Für die Pflanzenernährung ist lediglich der in der Ackerkrume verfügbare Borgehalt entscheidend. Dieser wird noch heute in den meisten Ländern mit der Heißwasserextraktionsmethode nach Berger und Truog bestimmt. Im Allgemeinen gilt, dass die Mikronährstoffversorgung mit steigender Güte der Ackerböden ansteigt. Dies ist auch bei Bor der Fall. Löslichkeit und Dynamik des Bors werden durch die Bodeneigenschaften wie Bodenart und pH-Wert, aber auch durch die Bearbeitungstiefe und -intensität beeinflusst (Haberland, 2005).

Der Großteil des im Boden enthaltenen Bors ist an Tonminerale und organische Substanzen, wie zum Beispiel Humus gebunden. Deswegen korreliert der Borgehalt im Boden auch häufig mit dem Ton- und C_{org} - Gehalt. Bor ist im Allgemeinen in ausreichenden Mengen im Boden vorhanden, aber der für die Pflanzen nutzbare Borgehalt ist gering. Entscheidend für die Pflanzenernährung sind der Borgehalt in der Bodenlösung und der leicht nachlieferbare Boranteil des „labilen Nährstoff-Pools“ der Böden (Bergmann 1993). Katalymow (1969) hat Untersuchungen zum Borgehalt auf verschiedenen Böden der ehemaligen UdSSR durchgeführt. Nach seinen Angaben beläuft sich der in der organischen Substanz der Ackerkrume enthaltene Borgehalt auf 0,5 bis 8 kg B/ha. Der Gehalt des anorganisch in Mineralen gebundenen Bors beläuft sich nach Kundler (1989) auf etwa 20 bis 400 kg B/ha. Austauschbar sind 0,3 bis 3 ppm als Borat und wasserlöslich 0,1 bis 1 ppm als Borat.

Die Pflanzen können Bor nur in gelöster Form aufnehmen. Der Großteil des pflanzenverfügbaren Bors liegt in Form von Borsäure ($B(OH)_3$) im Boden vor. Die Borsäure ist eine schwache Säure und wie auch ihre Salze temperaturabhängig wasserlöslich. In geringen Mengen löst sie sich nur schwer in Wasser, aber mit zunehmender Konzentration beschleunigt sich dieser Vorgang. Bei einem pH-Wert von 7 ist das für die Pflanzen nutzbare Bor zu 99% als Borsäure und zu 0,9% als Tetrahydroxo-Borat-Ion ($B(OH)_4^-$) in der Bodenlösung enthalten. Bei steigendem pH-Wert werden aus $B(OH)_3$ durch Anlagerung von Wasserstoffatomen vermehrt $B(OH)_4^-$ Ionen gebildet. Des Weiteren bilden sich Natrium-, Calcium- und Magnesiumborate, sodass beispielsweise bei einem pH-Wert von 8,4 das pflanzenverfügbare Bor zu 80% als Borsäure, zu 18% als Tetrahyd-

roxo-Borat und zu 2% als undissoziiertes Natrium-, Calcium-, und Magnesiumborat, dies sind Salze der Borsäure, vorliegt. Die $\text{B}(\text{OH})_4^-$ -Ionen werden bei pH-Werten über 7 zunehmend an Tonminerale oder organische Substanz adsorbiert und müssen für die Aufnahme in die Pflanzen erst wieder aus ihren Bindungen gelöst werden. Bei sehr hohen Borkonzentrationen im Boden und durch Polymerisation auf Austauschoberflächen können außerdem auch Polyborate wie $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH}_4)^-$ und $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH}_5)$ gebildet werden (Scheffer/Schachtschabel, 2002).

Auf schweren lehmigen Böden ist in der Regel mehr Bor in der Ackerkrume gebunden, als auf leichteren Sandböden. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Tonminerale und der organischen Substanz in den schweren Böden höher ist als in leichteren sandigen Böden und Bor in größeren Mengen gebunden und nicht so schnell ausgewaschen werden kann. Böden, die von Natur aus hohe Tongehalte und pH-Werte aufweisen, haben in der Regel hohe Heißwasserborgehalte, sodass der kritische Boden-pH-Wert für eine noch ausreichende Borversorgung der Pflanzen umso höher sein kann, je höher der Tongehalt der Böden ist. Dagegen kann es auf Böden mit hohen Tongehalten und niedrigen pH-Werten zu erheblichen Schwankungen im Gehalt des heißwasserlöslichen Bors kommen. Dies ist bedingt durch die unterschiedlichen Borgehalte der Ausgangsgesteine der Bodenbildung (Schinner/Sonnleitner, 1997). Nach Bergmann (1993) ist der pflanzenverfügbare Boranteil in tonarmen Böden höher als in tonreichen, da das Bor auf Grund des geringeren Tonanteils nicht in so großen Mengen adsorbiert werden kann. Tonreiche Böden benötigen höhere extrahierbare Bodenborgehalte und bei Bormangel auch höhere Düngergaben. Bei Trockenheit und hohen Temperaturen ergibt sich vor allem auf schweren Böden der Nachteil, dass Bor, hauptsächlich in Verbindung mit hohen pH-Werten (pH-Werte über 7), leicht festgelegt werden kann und für die Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht. Dies wird als Trockenfixierung bezeichnet (Scheffer/Schachtschabel, 2002).

Auf sandigen Böden mit auch noch leicht saurem pH-Wert kommt es bei starken Niederschlägen und daraus resultierenden hohen Wassermengen vermehrt zur Auswaschung von Bor in tiefere Bodenschichten. Pro Jahr können so zwischen 10 und 200 g B/ha verlagert werden (Incona, 2007). Dieses Bor kann von den Pflanzen nicht mehr aufgenommen werden.

Der Borgehalt im Boden ist in gewissem Maße auch von der Fruchtfolge abhängig. Wie bereits erwähnt, benötigen Zucker- und Futterrüben, Kartoffel und Raps bedeutend größere Mengen an Bor, als die Getreidearten, um das Wachstum und die Ausbildung von Früchten und Blattmasse sicherzustellen. So sind die Entzüge aus dem Boden auf Grund des unterschiedlichen Borverbrauchs der Ackerkulturen sehr verschieden. Wird in einer Fruchtfolge ein hoher Anteil an borintensiven Kulturen angebaut, sind die Entzüge aus dem Boden so hoch, dass nicht genug pflanzenverfügbares Bor durch Verwitterung und Mineralisation zur Verfügung gestellt werden kann

(Bergmann, 1993). Nach Angaben von Kape und Klingenberg (2004) benötigt eine Fruchtfolge aus Getreide, Raps und Hackfrüchten im Durchschnitt 150 bis 500 g B/ha*a. Um die Versorgung sicherzustellen, muss dem Boden pflanzenverfügbares Bor durch Düngung zugeführt werden, wobei der Gehalt an pflanzenverfügbarem Bor für den Getreideanbau in der Regel auch ohne zusätzliche Düngung ausreicht.

3.2 Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit von Bor im Boden

Die Borverfügbarkeit im Boden wird von vielen Faktoren beeinflusst. Neben pH-Wert und Tongehalt der Böden wird der Gehalt an verfügbarem Bor auch durch die Temperatur und durch den Calcium-, Magnesium-, Eisen- und Aluminiumgehalt positiv oder negativ beeinflusst. Den höchsten Einfluss haben nach aid (2006) hohe Temperaturen. Bor wird bei steigenden Temperaturen reaktionsfreudiger und geht festere, durch Wasser schwerer lösliche Bindungen ein. Wie in Gliederungspunkt 3.1 bereits erwähnt, kommt es hier vermehrt, auch im Zusammenhang mit Trockenheit und bei hohen pH-Werten (pH-Werte über 7), zu einer erhöhten Festlegung des Bors. Aufgrund dieser Fixierung steht das Bor den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung, da es durch häufig unzureichende Wassermengen schlecht wieder aus seiner festen Bindung gelöst werden kann. Diese Festlegung, insbesondere durch hohe Temperaturen verursacht, wird als Trockenfixierung bezeichnet. Sie tritt häufiger in besseren Böden mit höheren Ton- und Humusgehalten als in sandigen Böden auf. Bei niedrigen Temperaturen ist Bor reaktionsträge, weshalb es weder festere Verbindungen eingeht, noch aus seinen schwachen Verbindungen an Ton und Humus vermehrt gelöst wird (aid, 2006; Seilnacht, 2002; Bergmann, 1993).

Wie die Temperatur hat auch der pH-Wert Einfluss auf die Borverfügbarkeit. Nach Lieberoth (1982) liegt das pflanzenverfügbare Bor im sauren pH-Bereich vor allem als Borsäure ($B(OH)_3$) vor, die im neutralen Bereich stärker dissoziiert und sich $B(OH)_4^-$ bildet. Die Adsorption an die Bodenteilchen erfolgt somit vorwiegend im neutral-alkalischen Bereich. Oberhalb von pH 6 wird der Borrücktausch gehemmt und die Verfügbarkeit reduziert. Die starke Bindung des Bors an die organische Substanz, vor allem im Austausch mit alkoholischen OH-Gruppen, ist der Grund für die biologische Speicherung im Boden. So nimmt nach Scheffer/Schachtschabel (2002) die Borverfügbarkeit mit pH-Werten zwischen 6 und 10 auf Grund erhöhter Boradsorption stark ab und steigt bei Boden- pH-Werten von mehr als 10 aber wieder an. Bei einer pH-Erhöhung auf bis zu pH 10 werden nach Katalymow (1969) aber hauptsächlich die pflanzenverfügbaren bororganischen Verbindungen beständiger und schwerer pflanzenaufnehmbar, während sich die Verfüg-

barkeit der mineralischen Borverbindungen bei einer pH-Wert-Erhöhung nicht wesentlich ändert.

Der Tongehalt eines Bodens beeinflusst die Borverfügbarkeit auch in geringem Maße. Das an Tonminerale gebundene Bor wird bei pH-Wert-Änderungen nicht in so starkem Maße festgelegt, wie das organisch gebundene Bor. Deshalb können Böden mit höheren Tonanteilen bei pH-Schwankungen mehr pflanzenverfügbares Bor zur Verfügung stellen, als tonärmere Böden. Weiterhin kann der kritische Boden-pH-Wert für eine ausreichende Borversorgung der Pflanzen umso höher sein, je höher der Tongehalt des Bodens ist. In den Boden gebrachtes Bor kann auf tonreichen Böden in größeren Mengen gespeichert werden und ist deshalb nicht so stark gegen Auswaschung gefährdet, als wenn es frei in der Bodenlösung vorliegt (Scheffer/Schachtschabel, 2002; aid, 2004).

Der Makronährstoff Calcium (Ca) beeinflusst auch die Borverfügbarkeit im Boden. Durch eine Aufkalkung der Böden steigt der pH-Wert, dadurch sinkt wie oben beschrieben der Anteil an pflanzenverfügbarem Bor. Diese Maßnahme wird vor allem auf Böden mit sehr hohen Borgehalten angewandt, denn durch ein Überangebot an Ca im Boden und in den Pflanzen wird die Boraufnahme gehemmt, sodass es nicht so rasch zu Bortoxizität in den Pflanzen kommt. Bei Ca-Mangel sind die Pflanzen weniger widerstandsfähig gegen Borüberschuss und entziehen dem Boden erhöhte Mengen an Bor (Katalymow, 1969). Nach Angaben von Bergmann (1993) kann aber das Ca/B-Verhältnis in ziemlich weiten Bereichen schwanken, ohne jegliche Nachteile zu haben.

Vor Allem bei hohen pH-Werten wirken sich hohe Eisen- (Fe) und Aluminium- (Al) Hydroxidgehalte nachteilig auf die Borverfügbarkeit aus. Dies ist häufig in Böden der tropischen und subtropischen Gebiete mit pH-Werten von über 7,3 der Fall, da Al- und Fe-Gele vermehrt die hier stärker dissoziierte Borsäure (siehe auch Punkt 3.1) adsorbieren. Die Boradsorptionskapazität der Al- und Fe-Hydroxide nimmt aber mit fortlaufendem Alter durch Alterungsprozesse ab. Anders ist dies bei den Magnesium- (Mg) Hydroxiden, die nicht der Alterung unterliegen. Um also eine zu hohe Boradsorption an Mg-Hydroxide und damit geringere pflanzenverfügbare Borgehalte zu vermeiden, muss auf das Mg/B-Verhältnis, besonders auf Böden mit hohen Mg-Gehalten, geachtet werden.

3.3 Bestimmungsmethoden des Borgehalts und anzustrebende Borgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden

Um eine ausreichende Borversorgung zu garantieren, ist nach § 4 Abs. 4 der Düngeverordnung der Bedarf an Makro- und Mikronährstoffen, also auch der Bedarf an Bor, mittels Boden- oder Pflanzenanalysen zu ermitteln. Nach Schweder et al. (2004) müssen Bodenuntersuchungen zur Bestimmung des Borgehalts in der Regel nur erfolgen, wenn Kulturen mit hohen Ansprüchen angebaut werden, da die Entzüge dann höher sind, als die natürliche Nachlieferung aus dem Boden.

Seit einigen Jahren wird vom Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) zur Bestimmung der pflanzenverfügbaren Mikronährstoffgehalte von Bor, Kupfer, Mangan und Zink im Boden von Ackerland mit einem Gehalt an organischer Bodensubstanz von weniger als 4%, die CAT-Methode angewandt. Für Grünland, sowie Moor und Anmoor gibt es zurzeit keine Einstufungen. Die CAT-Methode ist ein Extraktionsverfahren, das auf einer Mischlösung aus 0,01 Mol Kalziumchlorid und 0,002 Mol DTPA (Diethylentriaminpentaessigsäure) basiert. Die Grenzwerte für die Gehaltsklassen (GK) wurden erstmals bundesweit erarbeitet. Die Düngeempfehlungen orientieren sich seit der Einführung der CAT-Methode nicht nur an den Gehalten im Boden, sondern auch an der Bedürftigkeit der Kulturen. Es können somit Düngeempfehlungen für die Boden- und die Blattdüngung und für den richtigen Einsatzzeitpunkt gegeben werden (Kape/Klingenberg, 2004).

Vor der Einführung der CAT-Methode wurde die Verfügbarkeit der Spurenelemente für das Pflanzenwachstum auf Ackerböden mit speziellen Extraktionsverfahren für jeden einzelnen Mikronährstoff bestimmt. Für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Borgehalts im Boden war die Extraktion mit siedendem Wasser (Heißwasserextraktionsmethode) nach Berger und Truog aus dem Jahr 1940 am weitesten verbreitet. Dazu muss das Verhältnis von Boden und Wasser 1:2 betragen. Die Siedezeit beträgt fünf Minuten (Scheffer/Schachtschabel, 2002). Auf Ackerland mit einem Gehalt an organischer Bodensubstanz von mehr als 4 %, oder auf Grünland, muss der verfügbare Borgehalt auch weiterhin mit der Heißwasserextraktionsmethode ermittelt werden, da die Ergebnisse bei Einsatz der CAT-Methode nicht korrekt sind.

Um hohe Erträge auf den Feldern zu erzielen, besonders bei borintensiven Kulturen, ist es wichtig, eine optimale Borversorgung sicherzustellen. Der Versorgungszustand in den Böden wird für alle Makro- und Mikronährstoffe im Allgemeinen in fünf Gehaltsklassen eingeteilt, diese sind: GK-A = sehr niedriger Gehalt; GK-B = niedriger Gehalt; GK-C = anzustrebender Gehalt; GK-D = hoher Gehalt; GK-E sehr hoher Gehalt. Nach Kape und Klingenberg (2004) können die

Gehaltsklassen B und D aber vernachlässigt werden, sie werden in die Gehaltsklassen A und E mit eingeschlossen. So wird der Versorgungszustand der Böden mit Bor und anderen Makro- und Mikronährstoffen häufig in die 3 Gehaltsklassen A, C und E eingeteilt. Dabei trifft für die Versorgungsstufe A ein sehr niedriger bis niedriger Bodenborgehalt, für die Versorgungsstufe C der anzustrebende Bodenborgehalt und für die Versorgungsstufe E, ein hoher bis sehr hoher Bodenborgehalt zu. Der Gehalt wird mit der CAT-Methode in Abhängigkeit vom pH-Wert angegeben, da der pflanzenverfügbare Bodenborgehalt wie in 3.2 beschrieben, von diesem beeinflusst wird. In Tabelle 4 sind die Grenzwerte für die Einstufung der Borgehalte in Deutschlands Ackerböden nach der CAT-Methode aufgeführt. In Tabelle 5 S.26 sind die Borgehalte für anmoorigen und moorigen Boden dargestellt, die nicht mit CAT-Methode bestimmt werden können.

Tabelle 4

Gehaltsklassen zur Beurteilung des Borversorgungszustandes von Ackerböden nach der CAT-Methode (n. Kape/ Klingenberg, 2004)

Bodenart	pH-Bereich	Gehaltsklassen (GK)		
		A	C	E
		Angaben in mg B/kg lufttrockener Boden		
Sand	< = 5,4	< 0,15	0,15 – 0,25	> 0,25
	> 5,4	< 0,20	0,20 – 0,35	> 0,35
schwach lehmi- ger Sand	< = 5,8	< 0,17	0,17 – 0,27	> 0,27
	> 5,8	< 0,25	0,25 – 0,40	> 0,40
stark lehmiger Sand	< = 6,0	< 0,20	0,20 – 0,35	> 0,35
	> 6,0	< 0,30	0,30 – 0,50	> 0,50
sandiger/ schluf- figer Lehm	< = 6,0	< 0,25	0,25 – 0,45	> 0,45
	> 6,0	< 0,40	0,40 – 0,70	> 0,70
Toniger Lehm bis Ton	< = 6,0	< 0,25	0,25 – 0,45	> 0,45
	> 6,0	< 0,40	0,40 – 0,70	> 0,70

Tabelle 5

Gehaltsklassen zur Bestimmung des Borversorgungszustandes von anmoorigem und moorigem Boden nach der Heißwasserextraktionsmethode von Berger und Truog (n. Kape/Klingenberg, 2004)

Bodenart	Gehaltsklassen (GK)		
	A	C	E
Angaben in mg B/kg lufttrockener Boden			
Anmoor und Moor	< 0,15	0,15 – 0,25	> 0,25

Pflanzen mit einem hohen Borbedarf wie Zuckerrüben, Kartoffeln und Raps zeigen auf Böden der Gehaltsklasse A Mangelerscheinungen, während Pflanzen mit einer geringen Bedarf, zum Beispiel die meisten Getreidearten oder Gräser, auf Böden der Gehaltsklasse E schon deutliche Toxizitätserscheinungen aufweisen können (Bergmann, 1993; Kape/Klingenberg, 2004).

4 Bor im Rapsanbau

Raps (*Brassica napus*) wird seit dem 14. Jahrhundert in Deutschland angebaut und ist hier bis heute die Ölf Frucht Nummer eins. Die Anbaufläche ist in den letzten Jahrzehnten rapide angestiegen. Während Anfang der 1980er Jahre gerade mal 20000 Hektar angebaut wurden, stieg die Anbaufläche bis 2009 auf 1,5 Millionen Hektar. Innerhalb der Europäischen Union war Deutschland im Erntejahr 2008/09 mit etwa 5,2 Millionen Tonnen Raps Spitzenreiter (BMELV, 2009). Im Jahr 2007 wurden dreiviertel des in Deutschland erzeugten Rapsöls zur Erzeugung von Biokraftstoffen oder zur Verwendung in der Industrie genutzt (Goldhofer/Schmid, 2008). Mecklenburg-Vorpommern dominiert den Rapsanbau in Deutschland. Im Jahr 2009 wurden 244.800 Hektar angebaut, das entspricht fast 23 % des Ackerlandes. Im Durchschnitt wurden etwas mehr als 45 Dezitonnen je Hektar geerntet (Makowski/Gienapp, 2009). Um diese hohen Erträge im Rapsanbau auch langfristig zu erzielen, bedarf es einer ausreichenden und angepassten Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, auch mit Bor.

4.1 Bedeutung des Bors im Rapsanbau

Mögliche Auswirkungen auf das Wachstum und den Ertrag von Rapsbeständen hängen von der im Boden vorhandenen Menge des Bors und dessen Löslichkeit, dem Nährstoffgehalt in der Rapspflanze und von einer optimalen und bedarfsgerechten Borgabe ab.

Nach Bergmann (1993) können die einzelnen Kulturen je nach ihrer Borbedürftigkeit in drei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe beinhaltet die Kulturen mit einem geringen, die zweite die Kulturen mit einem mittleren und die dritte Gruppe die Kulturen mit einem hohen Borbedarf. Raps steht in der dritten Gruppe. Er gehört zu den Nutzpflanzen, die eine hohe Borbedürftigkeit haben. Für eine optimale Entwicklung sind die Rapspflanzen mit einem Borgehalt von 40 bis 70 ppm i.d. TS ausreichend versorgt (Bergmann, 1993).

Ein guter Rapsbestand nimmt während der Vegetationszeit etwa 350 bis 500g B/ha*a aus dem Boden auf (K+S, 2008). Die Getreidearten haben einen Borbedarf, der nur circa 1/10 des Bedarfs des Rapses entspricht. Auf Grund dieser Unterschiede in der Bedürftigkeit wird ersichtlich, dass Bor bei der Entwicklung und dem Wachstum der Rapspflanze eine große Bedeutung zukommt. Es hat Einfluss auf die Zellbildung und Zelldifferenzierung, sowie auf die Zellwandbildung. Bor ist für die Funktionsfähigkeit der Membranen wichtig. Weiterhin erhöht es die Enzymaktivität, reguliert den Energiehaushalt und hat Einfluss auf den Kohlenhydratstoffwechsel. Weitere wichtige Funktionen erfüllt Bor in der Eiweiß- und Nukleinsäuresynthese, im Stofftransport und bei

der Blütenbildung, Pollenkeimung und im Fruchtsatz. Besonders hoch ist der Borbedarf in der Zeit des größten Blattwachstums (BBCH 21-29), während der Blühperiode (BBCH 61-69) und zum Zeitpunkt des Fruchtsatzes (BBCH 71-79). Die reproduktiven Organe, wie Antheren, Narben, Griffel und Fruchtknoten sind besonders reich an Bor. Durch die Ausbildung von Pektin-Borat-Komplexen soll das vorzeitige Platzen der Pollenschläuche und damit deren Wachstum einschließlich der Befruchtungsvorgänge gefördert werden. Weiterhin wird die Samenbildung gefördert und das Abfallen der Fruchtknoten verhindert. Durch einen optimalen Borgehalt in der Pflanze kann während der Samenbildung der Anteil an tauben Samen vermindert werden (Bergmann, 1993; Neumayer, 2009).

Die pflanzenverfügbaren Bodenborgehalte sollten nach der CAT-Untersuchungsmethode in leichten Böden 0,2 – 0,5 mg B/kg Boden und in schweren Böden 0,25 – 1,2 mg B/kg Boden nicht unterschreiten, da es sonst zum Mangel in den Rapspflanzen kommen kann (K+S, 2008). Nach Haberland (2005) kann ein Mangelrisiko im Rapsanbau schnell auftreten. Bormangel kann Ertragsausfälle von bis zu 30 % verursachen, wobei akuter Mangel mit deutlichen Symptomausprägungen eher selten der Fall ist. Häufiger zu finden ist latenter Mangel, das heißt, dass Schädigungen an den Pflanzen von außen noch nicht zu erkennen sind, obwohl Wachstum und Entwicklung bereits eingeschränkt sind. Bormangel ist in wüchsigen Beständen oft nur schwer zu erkennen, da Aufhellungen und Deformationen zuerst an den jüngeren, noch kleinen Blättern sichtbar werden. Nach Bergmann (1993) zeigt Raps, je nach dem wann der Mangel auftritt, ein mehr oder weniger gestauchtes Wachstum, was als „Sitzbleiben des Rapses“ bezeichnet wird. Oft sind die Blattränder der jüngeren Blätter gerollt (s. Abb. 7, S. 29) und die Blätter selbst leicht aufgeheilt. Bei fortgeschrittenem Mangel sind die neugebildeten Blätter oft verformt und die Blattstiele weisen Risse auf. Es kann zur Ausbildung von Chlorosen und Nekrosen kommen. Die Nerven- und Blattspreitenentwicklung ist reduziert, sodass die fast nur aus Mittelrippe bestehenden Blätter dunkler erscheinen. An den älteren Blättern sind oftmals rot-violette Verfärbungen (s. Abb. 7, S. 29) an der Blattunterseite und am Blattrand sichtbar (Hege, 2003). Die betont kurzen und im Längenwachstum gehemmten Pflanzen haben häufig hohle oder bräunliche, glasige, verdickte Stängel (s. Abb. 8, S. 29) mit nekrotischen Narben und Rissen. Nach dem Aufschneiden der Pflanze sind häufig Verbräunungen am Wurzelhals zu erkennen. Im Zentralzylinder der Wurzeln kann es zur Bildung von Hohlräumen kommen, sodass der Assimilatetransport eingeschränkt ist. Auch Verwachsungen und Verkorkungen sind möglich (Ernert, 2005).

Bormangel hat auch negativen Einfluss auf die Blütenbildung. Die Blüten werden nicht oder nur verkümmert ausgebildet (s. Abb. 9, S. 29). Der Blütenstand kann in Folge von Mangel gedrungen und unregelmäßig sein und entwickelt darauf hin nur wenige, missgestaltete und nicht fertile

(unfruchtbare) Einzelblüten. Bei nur schwachem Mangel entwickeln sich zwar Blüten und Samen, doch sind die jüngsten Schoten verkümmert, nicht ausgebildet oder samenlos (s. Abb. 10).



Abbildung 7

Bormangel bei Raps (*Brassica napus*);
Symptome: eingerollte jüngere Blätter und rot-violette Verfärbung von Unterseite und Rand eines älteren Blattes
(Quelle: KWS, 2008)



Abbildung 8

Bormangel bei Raps (*Brassica napus*);
Symptome: verdickte Stängel und Blattstiele mit zum Teil verkorkten Längsrissen, Verbräunungen und Hohlräumen (Quelle: Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Roth, 2009)



Abbildung 9

Bormangel bei Raps (*Brassica napus*)
Symptome: gehemmte und verkümmerte Blütenbildung (Quelle: Bergmann, 1993)



Abbildung 10

Bormangel bei Raps (*Brassica napus*)
Symptome: zum Teil verkümmerte und samenlose Schoten (Quelle: KWS, 2008)

Alle diese Veränderungen an den einzelnen Organen der Rapspflanzen, die durch Bormangel entstehen können, wirken sich ab einer bestimmten Ausprägungshöhe auch auf den Ertrag aus. Besonders ertragsmindernd kann ein Mangel in der Zeit der größten Blattmasseentwicklung (BBCH 21-29), der Blüte (BBCH 61-69) und des Fruchtansatzes (BBCH 71-79) sein. Der Borgehalt für den Ertragsgrenzwert beträgt nach Bergmann (1993) und Hege (2003), 30 ppm i.d. TS für die jüngeren und 40 ppm i.d. TS für die älteren Blätter. Unterhalb dieser Pflanzengehalte muss mit Ertragsverlusten gerechnet werden.

Raps hat eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Bor. Er gehört zu den Pflanzen, die hohe Bor-konzentrationen tolerieren. Borüberschusschäden sind nur sehr selten im Rapsanbau zu beobachten. Trotzdem kann es auf vor allem schweren Böden mit einem sehr hohen Anteil an pflanzenverfügbarem Bor zu Toxizität in den Rapspflanzen kommen. Dies ist hauptsächlich der Fall, wenn gut versorgte Böden zusätzlich und dauerhaft mit borhaltigem Wasser beregnet werden, oder wenn zu hohe Bordüngergaben verabreicht wurden. Bei der Bewässerung mit Wasser, das 1 bis 2 mg B/l enthält, wird dem Boden bei 100 l/m² bereits eine Menge von 1 bis 2 kg B/ha zugeführt, was einer Borgabe zur Verhinderung von Bormangel entspricht. Auch bei hohen Borentzügen von 350 bis 500g B/ha*a durch den Raps, der aber nur alle drei bis vier Jahre in der Fruchtfolge angebaut werden sollte, führt dies langfristig zu Borüberschuss im Boden und somit auch in den Pflanzen (Hege, 2003). Die Überschusssymptome sind nach Bergmann (1993) zuerst an den Spitzen und Rändern der älteren Blätter zu sehen. Diese verfärben sich mehr oder weniger hell- bis dunkelbraun und weisen ein fleckiges Muster auf. Später fließen die Flecken zusammen und die Blätter zeigen auf Grund der Absterbeerscheinungen, Kräuselungen und/oder Blattrandverkrümmungen auf. In Versuchen von Abercron (Bergmann, 1993) wurde bei Raps ein Rückgang des Samenertrages bei 190 ppm B i.d. TS der jüngeren Blätter beobachtet, was in etwa der vier- bis fünffachen Menge des optimalen Borgehaltes entspricht. Die Reduzierung der Pflanzenmasse trat erst bei über 300 ppm B i.d. TS der jüngeren Blätter ein.

Der Bereich zwischen Mangel und Toxizität (30 bis 300 ppm i.d. TS) ist beim Raps um ein Vielfaches größer als bei Getreide. Trotzdem muss auch im Rapsanbau auf eine optimale Borversorgung geachtet werden, um die Ertragsverluste so gering wie möglich zu halten.

4.2 Bordüngung

Die Düngung mit hochkonzentrierten Einzeldüngern sichert die Versorgung der Böden und der Rapspflanzen mit Hauptnährstoffen. Die Mikronährstoffe, auch Bor, geraten durch die hohen Nährstoffgehalte einiger Makronährstoffe oft ins Minimum. Die Borverfügbarkeit wird besonders durch hohe Kalk- und Magnesiumgaben und -gehalte eingeschränkt (s. Punkt 3.2). Außerdem spielen Trockenheit und Niederschläge eine große Rolle, da Bor stärker festgelegt bzw. leicht ausgewaschen werden kann. Um also eine optimale Versorgung bei einem oft hohen Anteil an Raps in der Fruchtfolge (bis zu 33 %) und hohen Erträgen bis über 50 dt/ha zu erzielen, ist eine Bordüngung unerlässlich (Haberland, 2005). Die Düngung kann als Boden- oder Blattdüngung ausgeführt werden, wobei der Bodenborgehalt in der Gehaltsklasse C (anzustrebender Gehalt) liegen soll.

4.2.1 Bodendüngung

Durch die Bodendüngung soll in erster Linie dem Boden wieder pflanzenverfügbares Bor zugeführt werden, um langfristig einen optimalen Bodenborgehalt zu erzielen. Deshalb wird diese Düngungsmethode hauptsächlich zur Vorratsdüngung angewendet und sollte nur zu boranspruchsvollen Kulturen wie Raps und anderen eingesetzt werden, da Borgaben bei weniger borintensiven Pflanzen zu Toxizität führen können (Schweder et al., 2004).

Die Bodendüngung soll den oberen Bereich des durchwurzelbaren Raumes (Krume) mit Bor versorgen, damit den Pflanzen genug Bor für Wachstum und Entwicklung zur Verfügung steht (Baumgärtel et al., 2006). Sie ist vor allem notwendig, wenn der Boden nach einer Bodenuntersuchung in die Gehaltsklasse A (niedrig/sehr niedrig) eingeteilt, also unterversorgt ist. Hier eignen sich hochkonzentrierte Bordünger oder mikronährstoffhaltige Bodendünger. Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenborgehaltes erfolgen in der Regel vor der Aussaat (Baumgärtel et al., 2006; Haberland, 2005). Die Ausbringungsmenge für eine Bodendüngung sollte sich nach der Bodenart und dem Versorgungszustand des Bodens richten, da dann sowohl der Entzug durch die Rapspflanzen als auch eine Anhebung des Borgehaltes auf die Gehaltsklasse C im Boden abgesichert ist (Haberland 2005). Eine Bodenborgabe bezieht sich dabei auf einen Wirkungszeitraum von drei bis vier Jahren. Bei einer Düngung wird in der Regel zu Raps, der in der Fruchtfolge höchstens alle drei Jahre angebaut werden sollte, je nach Bodenart und Versorgungszustand des Bodens 1 bis 2 kg B/ha (s. Tab. 6, S. 32) gedüngt (Schweder et al., 2004; Zorn, 2008).

Da ein Rapsbestand dem Boden aber nur etwa 350 bis 500 g B/ha*a entzieht, ist es nach Zorn (2008) vorteilhaft, wenn in einer Fruchtfolge neben Raps noch eine andere Kultur mit einem hohen Borbedarf angebaut wird, weil es sonst langfristig durch zu hohe Borgaben zu einem Überschuss im Boden kommen kann.

Tabelle 6

Empfehlung zur Bodendüngung mit Bor im Rapsanbau (n. Schweder et al., 2004)

Bodenart	Gehaltsklasse	Bordüngung kg/ha für Raps
Sand schwach lehmiger Sand	A	1,5
	C	1 – 1,5
	E	0
stark lehmiger Sand sandiger/schluffiger Lehm	A	2
	C	1 – 2
	E	0
toniger Lehm bis Ton	A	2
	C	1 – 2
	E	0
Wirkungsdauer einer Bodendüngung beträgt 3 Jahre		

Auch auf Böden, die in den Gehaltsstufen C und E einen niedrigen und mittleren Borbedarf aufweisen, kann zur bedarfsgerechten Düngung im Raps eine Bodendüngung durchgeführt werden. Hier ist der Einsatz von mineralischen Mehrnähstoffdüngern von Vorteil. Diese Dünger sind beispielsweise NPK-, PK-, oder N-Dünger mit teilweise veränderten Formulierungen der Hauptnährstoffe und beinhalten zusätzlich Bor und/oder andere Mikronährstoffe (Haberland, 2005). Organische Dünger, wie Rinder-, Hühner-, Schweinegülle und Rinderdung enthalten auch Bor, aber die Mengen sind mit 2 bis 6 g B/m³ oder t für eine Bordüngung im Raps nicht ausreichend. Nach Haberland (2005) haben sich wasserlösliche Dünger wie Ammonsulfatsalpeter +Bor (0,3 % B), Nitrophoska perfect (0,02 % B), Hakaphos (0,01 % Bor) und andere Dünger bewährt. Die in diesen Düngern enthaltenen Mengen an Bor sind für eine Erhaltungsdüngung im Raps ausreichend. Der Vorteil ist, dass hauptsächlich während der Stickstoffdüngung im Frühjahr, zur Zeit

des größten Blattwachstums (BBCH 21-29), auch gleichzeitig Bor ausgebracht werden kann. Nachteilig ist allerdings, dass in den Boden gebrachtes Bor durch einen hohen pH-Wert oder Trockenheit leicht festgelegt werden kann und dann nicht mehr pflanzenverfügbar ist (Baumgärtel, 2006). Dies ist besonders während des größten Blattwachstums (BBCH 21-29), der Blüte (BBCH 61-69) und des Schotenansatzes (BBCH 71-79) von Nachteil, da zu diesen Zeitpunkten die größten Mengen an Bor benötigt werden (Bergmann, 1993).

4.2.2 Blattdüngung

Trotz der in Punkt 4.2.1 angegebenen Nachteile der Bodendüngung, stellt diese aber in erster Linie die Versorgung der Pflanzen mit Bor sicher. Neben der Bodendüngung besteht im Rapsanbau auch die Möglichkeit, den Bedarf an Bor, insbesondere bei einer schlechten Borversorgung über den Boden, sei es durch trockene Witterung oder schlechte Standortfaktoren und daraus resultierender verminderter Verfügbarkeit, durch eine Blattdüngung zu decken. Die Bor-Blattdüngung hat sich in der heutigen Zeit im Rapsanbau durchgesetzt (Schweder et al., 2004; Zorn, 2008).

Um besonders in den Stadien des höchsten Borbedarfs einem Mangel und eventuellen Ertragsausfällen vorzubeugen, wird in den meisten Betrieben mittels der Blattdüngung während der Pflanzenschutzmaßnahmen zusätzlich Bor ausgebracht (Haberland, 2005). Durch die Blattdüngung kann kurzfristig und gezielt auf sichtbare Bormangelscheinungen an den Rapspflanzen reagiert werden. Tritt Bormangel bereits im Herbst auf, kann nach Ernert (2005) bereits eine Gabe von 200 g B/ha während des 5-6-Blattstadiums (BBCH 22/23) gegeben werden, um diesen zu beseitigen. Nach Schweder et al. (2004) ist bei der Borblattspritzung zu beachten, dass die Maßnahmen in Zeiten bzw. in Entwicklungsstadien erfolgen müssen, in denen der Raps einen hohen Bedarf und somit auch ein gutes Verwertungsvermögen hat. Vornehmlich werden Blattdüngungen deshalb im Frühjahr zum Ende des Schossens (BBCH 39), im Knospenstadium (BBCH 51-59), maximal bis zur Vollblüte (BBCH 61) durchgeführt. Die Bordüngung kann zu diesen Zeitpunkten gut mit einer Wachstumsregler- oder Insektizidmaßnahme kombiniert werden und ist besonders bei einer unzureichenden Versorgung über den Boden wichtig, damit kein Mangel eintritt (Ernert, 2005; Haberland, 2005; Makowski/Gienapp, 2005).

Um eine Düngewirkung zu erreichen, muss bei der Applikation eine Mindestmenge auf die Blätter der Rapspflanzen gelangen. Das bedeutet, es muss auch genügend Blattfläche vorhanden sein. Nach Schweder et al. (2004) und Ernert (2005) ist der Raps bei einem optimalen Bodenborgehalt

von 0,15 bis 0,70 mg B/kg Boden (Gehaltsstufe C) je nach Bodenart, mit Düngermengen von insgesamt 300 bis 500 g B/ha*a durch eine Blattdüngung ausreichend versorgt. Auf Grund der schlechten Verlagerbarkeit des Bors in der Pflanze sollten die höheren Mengen gesplittet werden, was in der Praxis in der Regel auch gemacht wird. Außerdem können hohe Gaben zu Bortoxizität in den Pflanzen führen.

Nach Haberland (2005) können Borblattspritzungen mit Einzel- oder Kombinationsdüngern durchgeführt werden. Das enthaltene Bor ist wasserlöslich. Einzeldünger, wie zum Beispiel Borax mit einem Borgehalt von 11 %, Solubor DF mit 17,5 % Bor, oder Folicin Bor, das ebenfalls 17,5 % Bor enthält, eignen sich zur Erhaltungsdüngung, aber auch zur Beseitigung von akutem Bormangel (Baumgärtel et al., 2006). Um den Borentzug aus dem Boden durch die Rapspflanzen zu decken, müssen von diesen Einzeldüngern insgesamt Mengen von etwa 2 bis 5 kg/ha ausgebracht werden. Die Kombinationsdünger werden vor allem dann im Rapsanbau ausgebracht, wenn neben Bor auch Bedarf an anderen Nährstoffen besteht, denn sie enthalten unter anderem auch N, Mn, Mo, Zn, Mg, S und weitere Elemente (je nach Hersteller). Kombinationsdünger sind zum Beispiel Folicin-Bor-Plus-flüssig mit einem Borgehalt von 10,5 %, Nutribor mit 8 % Bor und Epso Microtop mit einem Borgehalt von 1 %. Die Aufwandmengen betragen zwischen 3 und 6 kg bzw. l/ha, je nach Düngemittel und Versorgungszustand des Rapsbestandes (Haberland, 2005).

Wie bereits erwähnt, werden Blattdüngungsmaßnahmen häufig mehrfach während der Bedarfsphasen ausgebracht. Durch ungünstige Witterung (Niederschlag) nach der Applikation kann es sein, dass eine Düngung erneut ausgeführt werden muss, da das ausgebrachte Bor abgewaschen wurde. Um eine bessere Haftung an den Blättern zu erzielen und die Abwaschung zu verringern, können die meisten Blattdünger auch in Verbindung mit Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung (AHL) ausgebracht werden (Schweder et al., 2004). Die Verwendung von AHL ist auch von Vorteil, wenn die Blattmasse des Rapses noch gering ist, Bor aber auf Grund einer Unterversorgung ausgebracht werden muss, da eine größere Menge an den Blättern haften bleibt (Hege, 2003).

4.3 Einfluss der Bordüngung auf den Ertrag

Raps hat einen hohen Borbedarf, deshalb kommt zum Erreichen hoher und stabiler Erträge der bedarfsgerechten Borernährung große Bedeutung zu. Der Einfluss von Bor auf den Samenertrag bei Raps wurde in zahlreichen Feldversuchen untersucht. Nach Makowski und Gienapp (2005) führt eine Bordüngung auf Mangelstandorten, oder Böden mit einer eingeschränkten Pflanzenverfügbarkeit, zu Mehrerträgen. Auf solchen Standorten konnte durch Blattspritzungen zu den Zeitpunkten des größten Borbedarfs (s. Punkt 4.1) der relative Kornertrag um bis zu 18 % gesteigert werden (s. Tab. 7). Auf Böden, in denen dem Rapsbestand genügend aufnehmbares Bor zur Verfügung steht, wird durch eine zusätzliche Düngung kein Mehrertrag erzielt. Zusätzliche Borgaben können sogar zu einem Überschuss in den Pflanzen führen, wodurch der Ertrag negativ beeinflusst werden kann.

Tabelle 7

Zeitpunkt der Bordüngung und Einfluss auf den relativen Kornertrag (n. Makowski/Gienapp, 2005)

Applikationszeitpunkt	Kornertrag relativ
ohne Blattdüngung	100
Rosettenstadium/Knospenstadium klein	102
Knospenstadium mittel	98
Knospenstadium groß	99
Blühbeginn	118
Vollblüte	111

In Tabelle 7 wird auch ersichtlich, dass Düngungsmaßnahmen im Knospenstadium, die zu spät ausgeführt wurden, zu einem geringen Minderertrag von 1 bis 2% führen.

Auch das ehemalige Institut für Pflanzenernährung Jena untersuchte den Einfluss der Bordüngung in Verbindung mit der Ertragsentwicklung. Die Versuchsstandorte wiesen nach Bodenuntersuchungen sehr niedrige bis mittlere Borgehalte auf. Durchgeführte Blatt- und Bodendüngungsmaßnahmen brachten einen Ertragsanstieg. Dieser lag im Mittel zwischen 2,2 und 2,3 dt/ha (Zorn, 2008).

In Versuchen von Abercron (Bergmann, 1993) war bei ausreichend versorgten Rapspflanzen, im Gegensatz zu unterversorgten, ein erhöhtes Ertragspotenzial, vor allem an den Haupttrieben zu erkennen. Nach einer Bodendüngung wurde gegenüber unterversorgten Rapspflanzen eine erhöhte Anzahl an „großen Schoten“ festgestellt. Die Kornanzahl je Schote war im Durchschnitt um etwa 20 % erhöht. Die Ertragskomponenten „Anzahl der Schoten je Pflanze“ und „Anzahl der Samen je Schote“ werden durch eine ausreichende Borversorgung am stärksten positiv beeinflusst (Bergmann, 1993).

Abschließend kann also gesagt werden, dass die Bordüngung, vor allem in den Stadien des größten Bedarfs (s. Punkt 4.1), einen positiven Einfluss auf den Ertrag hat, denn in allen Versuchen waren die Erträge bei einer optimalen Versorgung der Rapspflanzen höher, als bei einer schlechten Versorgung. Steht dem Raps allerdings im Boden in allen Entwicklungsstadien genügend aufnahmefähiges Bor zur Verfügung, werden durch eine Düngung keine Mehrerträge erzielt (Makowski/Gienapp, 2005).

5 Fazit

Bor ist ein für alle Pflanzen unentbehrlicher Nährstoff, der durch kein anderes Element ersetzt werden kann. Es erfüllt lebenswichtige Funktionen in den Pflanzen. Bei unzureichender Versorgung kommt es in der Regel zu Wachstums- und Entwicklungsstörungen und im schlimmsten Fall zum Absterben der Pflanze. Andererseits können auch zu hohe Borgehalte die Pflanzen schädigen, sodass die Funktionsfähigkeit ebenfalls eingeschränkt wird.

In der heutigen Landwirtschaft hat die Borversorgung, anders als noch vor 50 Jahren, einen hohen Stellenwert eingenommen. Von besonderer Bedeutung ist sie im Anbau von Dikotyledonen, da diese einen höheren Bedarf haben als die Monokotyledonen. So ist der Borverbrauch auf Grund der Entwicklung neuer, deutlich ertragsreicherer Nutzpflanzen angestiegen. Raps, Zucker- und Futterrüben, Sonnenblumen, Mais und Kartoffeln haben einen bis zu zehnmal höheren Borbedarf als Weizen und Gerste.

Beim Anbau borintensiver Früchte muss vor allem der Versorgung über den Boden besonderes Augenmerk geschenkt werden, da die Verfügbarkeit durch viele Faktoren beeinflusst wird. Ist das Nachlieferungsvermögen an pflanzennutzbarem Bor aus dem Boden zu gering, sei es durch zu niedrige Bodenborgehalte, oder schlechte Standortfaktoren, können durch eine Düngung Mehrerträge erzielt werden. In vielen Rapsanbauversuchen wurden durch Düngungsmaßnahmen auf schlecht versorgten Böden deutliche Mehrerträge erzielt, wenn die Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt wurden.

6 Zusammenfassung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird die Bedeutung des Spurennährstoffs Bor, vor allem für die Pflanzenentwicklung, und die Verfügbarkeit in landwirtschaftlich genutzten Böden dargelegt. Weiterhin wird speziell auf die Notwendigkeit des Bors für den Rapsanbau eingegangen.

Reines Bor wurde erstmals 1808 gewonnen. Erste Versuche im 19. Jh. mit diesem Element zeigten, dass die Pflanzen durch die Zugabe von Bor geschädigt wurden, weil die verabreichten Mengen in den Versuchen viel zu hoch angesetzt waren. Bor wurde zu dieser Zeit als giftiges Element angesehen. In der Natur ist es in allen Gesteinen, Böden und Gewässern enthalten, wobei die Gehalte sehr stark variieren.

In der Pflanzenernährung erfüllt Bor wichtige Funktionen im Stickstoff- und Kohlenhydratstoffwechsel, beim Aufbau von Zellwand und Zellmembran, sowie bei der Blüten- und Fruchtbildung. Der Borbedarf der Ackerkulturen beträgt zwischen 50 und 500 g B/ha*a, wobei die Dikotyledonen deutlich größere Mengen benötigen als die Monokotyledonen. Durch eine unzureichende Versorgung kann es zu Mangel in den Pflanzen kommen, was zur Einschränkung vieler Funktionen und im schlimmsten Fall zum Absterben führt. Auch eine überhöhte Versorgung (Toxizität) kann Wachstums- und Entwicklungsstörungen hervorrufen.

Der überwiegende Teil des Bors wird von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommen. Im Boden ist der Gehalt an pflanzenverfügbarem Bor von vielen unterschiedlichen Faktoren wie pH-Wert, Ton- und Humusgehalt, Wasserverfügbarkeit und den Gehalten von Calcium, Eisen, Magnesium und Aluminium abhängig. Diese können die Verfügbarkeit sowohl positiv, als auch negativ beeinflussen. Die optimalen Bodenborgehalte nach der CAT-Methode betragen je nach Bodenart zwischen 0,15 mg B/kg Boden (auf Sandboden) und 0,7 mg B/kg Boden (auf Lehm/Ton).

Raps zählt zu den borintensiven Pflanzen. Er entzieht dem Boden bis zu 500 g B/ha*a, was in etwa der zehnfachen Menge des Entzuges eines Weizenbestandes entspricht. Deshalb kommt der Borversorgung im Rapsanbau eine große Bedeutung zu. Durch den in der heutigen Zeit hohen Anteil an Raps in der Fruchtfolge kann in Verbindung mit einer schlechten Versorgung des Ackerbodens schnell Bormangel im Bestand auftreten, welcher Ertragseinbußen zur Folge haben kann. Um dies zu vermeiden, werden in der Regel Düngungsmaßnahmen durchgeführt. Mit der Bodendüngung soll der Gehalt an pflanzenverfügbarem Bor in der Ackerkrume angehoben werden. Die Blattdüngung kann die Versorgung sichern, wenn die Nachlieferung aus dem Boden nur eingeschränkt möglich ist. Sie hat den Vorteil, dass sie zusammen mit Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt werden kann. Düngungsmaßnahmen haben aber nur positiven Einfluss auf

den Ertrag, wenn der Boden unterversorgt ist und den Pflanzen rechtzeitig Bor zur Verfügung gestellt wird.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Bücher und Zeitschriften

Baumgärtel, G.; Hege, U.; Meyer, P.: Düngung nach guter fachlicher Praxis. aid infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V. 2006, Nr. 1167/2006, S. 43- 46

Bergmann, W.: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. 3. Auflage Jena: Gustav Fischer Verlag, 1993

Binder, H. H.: Lexikon der chemischen Elemente. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1999

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (Hrsg.): Ernte 2009: Mengen und Preise. 26.08.2009

Goldhofer, H.; Schmid, W.: Agrarmärkte 2007. 1. Auflage. München: Bayrisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Februar 2008

Haberland, R.: Bor darf nicht fehlen. Bauernzeitung (2005), 16. Woche, S. 18/19

Hesse, M., Meier, H., Zeeh, B.: Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie. Thieme Verlag, 2002

Kape, H.-E., Klingenberg, U.: Rationelle Mikronährstoffbestimmung in Ackerböden durch Anwendung der CAT-Methode. Fach-Info 115. Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Rostock, LUFA Rostock der LMS, 05/2004

Katalymow, M. W.: Mikronährstoffe/ Mikronährstoffdüngung. 1. Auflage Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1969

Kundler, P.: Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. 1. Auflage Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1989

Lieberoth, I.: Bodenkunde. 3. Auflage Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1982

Makowski, N.; Gienapp, C.: Rapsland Mecklenburg-Vorpommern. Den Grundstein im Herbst legen. Landpost (10. Oktober 2009), S. 31 – 32

Makowski, N.; Gienapp, C.: Mikronährstoffe zum Raps. Bauernzeitung (2005), 3. Woche, S. 26/27

Möllinger, H.: Themen zur Chemie des Bors. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag, 1976

Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.-H., Schwertmann, U.: Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1992

Scheffer, F., Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2002

Schinner, F., Sonnleitner, R.: Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Band 2/3/4. 1. Auflage Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997

Schweder, P., Kape, H.-E., Boelcke, B.: Düngung. Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis, Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. LUFA Rostock der LMS, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, 2004

Skol'nik, M. J.: Die physiologische Rolle von Bor in den Pflanzen. In Mineralstoffversorgung von Pflanze und Tier. Tag.Ber. Nr. 85 AdL der DDR, Berlin 1966

Skol'nik, M. J.: Mikroelemente im Leben der Pflanzen. Isdatel'stvo „Nauko“, Leningrad 1974

Stöcker, F. W., Dietrich, G.: Brockhaus abc biologie. 1. Auflage Leipzig: VEB F. A. Brockhaus Verlag, 1967

7.2 Internetquellen

Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Roth (Hrsg.): Bormangel bei Raps macht sich spät bemerkbar. 2009 <http://www.alf-rh.bayern.de/pflanzenbau/31030/index.php>. 04.12.2009

Ernert, S.: Bor vernachlässigen oder düngen?. 2005. <http://www.dlr-westerwald-osteifel.rlp.de>. 12.11.2009

Hege, U.: Hinweise für die Düngung mit Bor. 2003
http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/13734/linkurl_0_13_0_4.pdf. 23.11.2009

Incona (Hrsg.): Mikronährstoffe. 2007. <http://www.incona.de/files/mikronaehrstoffe.php>. 19.11.2009

Institut für Zuckerrübenforschung (IFZ) Göttingen (Hrsg.): Bor in der Pflanze. 2009
<http://www.ifz-goettingen.de/site/de/63/bor-in-der-pflanze.html>. 03.12.2009

KWS (Hrsg.): Winterraps Anbauplaner. 2008.
http://www.kws.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaafhcoy. 09.12.2009

K+S Kali GmbH (Hrsg.): Bor-Düngung – Eine Standardmaßnahme im Rapsanbau. 2008.
http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory_service/crops/oilseed_rape.html. 07.12.2009

K+S Kali GmbH (Hrsg.): Nährstoffe: Bor. 2008.
http://www.kali-gmbh.com/dede/fertiliser/advisory_service/nutrients/boron.html. 23.11.2009

Neumayer, I.: Hohe Rapsertträge – ein Zusammenspiel vieler Faktoren. 31.03.2009
http://www.saatbaulinz.at/sor_showArtikel.asp?id=68. 19.01.2010

Seilnacht, T.: Seilnachts Didaktik der Naturwissenschaften. Chemielexikon. 2002
<http://www.seilnacht.com/Lexikon/05Bor.htm>. 04.01.2010; 17.01.2010

Zorn, W.: Raps mit Mikronährstoffen düngen?. 2008
http://www.syngenta.de/syngenta_infos/pdf_dateien/raps/mikronaehrstoffe.pdf. 05.01.2010

8 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelor-Studienarbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht weiter veröffentlicht. Ich bin damit einverstanden, dass meine Bachelorarbeit in der Hochschulbibliothek eingestellt und damit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Vitense, den 25. Februar 2010

Hans-Martin Lüth