

Department für Angewandte Pflanzenwissenschaften und Pflanzenbiotechnologie

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Betreuer:

Ao.Univ.Prof. Dr. Peter Liebhard Univ.Doz. Dr. Hubert J. Müller

EINFLUSS EINER CARBOKALKDÜNGUNG BEI KALKHÄLTIGEN BÖDEN AUF DAS ERTRAGSVERHALTEN SOWIE AUF AUSGEWÄHLTE BODENCHEMISCHE UND –PHYSIKALISCHE PARAMETER

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von Dipl.-Ing. Josef Wasner

Wien, September 2009

Danksagung

Ich bedanke mich bei Prof. Liebhard für die langjährige Begleitung durch diese Arbeit sehr herzlich. Durch sein umfassendes pflanzenbauliches Wissen konnte er mir viele wertvolle Anregungen geben, wie man dieses interessante Thema aufarbeiten kann. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern des Institutes und der Versuchswirtschaft Großenzersdorf, die mich bei den praktischen Arbeiten auf den Versuchsflächen unterstützt haben.

Bei Dr. Müller bedanke ich mich für die Betreuung. Seine Diskussionsbereitschaft und umfangreiche Literaturkenntnis ermöglichten eine kritische Beurteilung und Bewertung der Ergebnisse.

Rektor Prof. Gerzabek danke ich für die Diskussion und wertvollen Anregungen, durch die ich die Beurteilung der Ergebnisse noch verfeinert werden konnte.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern der Zuckerforschung Tulln, die mir sowohl bei der Versuchsdurchführung als auch bei der Probenaufbereitung geholfen haben. Mein ganz besonderer Dank gilt dabei Dipl.-Ing. Eigner, der mich bei der Auswertung und Darstellung der Ergebnisse vielfach unterstützt hat. In zahlreichen Besprechungsterminen hat er die Resultate kritisch hinterfragt und hat so maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Kurzfassung

Aufgrund stetig knapper werdender Rohstoffe sollen bedeutende Pflanzennährstoffe, die Zuckerrüben dem Boden entziehen, mit der Ausbringung von Carbokalk als Dünger wieder in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt werden. Auf Ackerstandorten mit hohem pH-Wert, jedoch unterschiedlichem Kalkgehalt wurde der Einfluss einer mehrjährigen, überhöhten Carbokalkdüngung (0, 75, 150, 300 t/ha Carbokalk) auf den Ertrag sowie auf bodenchemische und -physikalische Parameter untersucht. Durch die steigenden Carbokalkmengen wurden weder die Erträge noch die Gehalte an den bedeutendsten Makro- und Mikronährstoffen verändert. Der pH-Wert im Oberboden erhöhte sich nur geringfügig bei einem nativen Kalkgehalt kleiner 0,5 %. Die Gehalte an Phosphor sowie an austauschbarem Magnesium im Boden stiegen an. Bei Intensitäten über 150 t/ha Carbokalk verminderten sich die pflanzenverfügbaren Mengen an Eisen und Mangan. Die Gehaltswerte bei Kupfer. Zink und Bor blieben unverändert. Bei Einsatz von Carbokalk kam es bei der hydraulischen Leitfähigkeit sowie beim Eindringwiderstand zu günstigeren Werten, die Durchwurzelungsintensität erhöhte sich. Bei einer praxisüblichen Carbokalkdüngung von etwa 10 t/ha je Fruchtfolgerotation ist auch auf Böden mit hohem Kalkgehalt kein vermindertes Pflanzenwachstum bzw. keine Qualitätsveränderung des Erntegutes zu erwarten.

Schlüsselwörter: Carbokalk, kalkhältige Böden, bodenchemische Kennzahlen, bodenphysikalische Kennzahlen

Abstract

With regard to more and more limited resources, important plant nutrients which are removed from soil with the sugar beet crop can be brought back into the nutrient cycle by the application of Carbonation lime. On sites with high pH value, but differing in lime content, the influence of an excessive application of Carbonation lime over several years (in total 0, 75, 150, 300 t/ha Carbonation lime) on yield as well as on chemical and physical soil parameters was examined. Neither yield nor the content of the most important macro and micro nutrients was modified by a rising amount of Carbonation lime. On sites with a native lime content smaller than 0.5%, the pH value of the topsoil increased only slightly. The content of phosphorus as well as of exchangeable magnesium in the soil increased with increasing Carbonation lime application. However, at intensities of above 150 tons/ ha Carbonation lime, the plant available amount of iron and manganese decreased. The contents of copper. zinc and boron remained unchanged. With the application of Carbonation lime, more favourable values for hydraulic conductivity as well as for penetration resistance were detected. Intensity of root penetration increased with increasing Carbonation lime application. At a conventional level of carbonation lime application of approximately 10 t/ha per crop rotation, even on soils with high lime content, neither a decrease in plant growth nor in quality of the harvested crop can be expected, whereas physical soil parameters are likely to be improved.

Keywords: Carbonation lime, calcareous soils, chemical soil parameters, physical soil parameters

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	11
2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung	13
3 Literatur	15
3.1 Kalk als Element	15
3.2 Kalk als Pflanzennährstoff	
3.2.1 Calciumaufnahme durch die Pflanze	15
3.2.2 Funktion des Calciums in der Pflanze	16
3.2.3 Calciummangel bzw. –überschuss in der Pflanze	17
3.3 Bedeutung von Kalk für den Boden	17
3.3.1 Wirkung des Kalkes auf bodenchemische Parameter	18
3.3.2 Wirkung des Kalkes auf bodenphysikalische Parameter _	20
3.3.3 Wirkung des Kalkes auf bodenbiologische Parameter	21
3.4 Bodenstruktur und ausgewählte bodenphysikalische Param	eter 21
3.4.1 Eindringwiderstand	21
3.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit (Wasserleitfähigkeit)	22
3.4.3 Durchwurzelung	22
3.5 Carbokalk als Dünger	23
3.5.1 Basische Wirksamkeit von Carbokalk	24
3.5.2 Nährstoffwirkung von Carbokalk	25
4 MATERIAL UND METHODEN	27
4.1 Material	27
4.1.1 Untersuchungsgebiet	27
4.1.1.1 Versuchsstandorte	27
4.1.1.1 Versuchsstandort Mannsdorf	28
4.1.1.1.2 Versuchsstandort Altlichtenwarth	29
4.1.1.3 Versuchsstandort Schönfeld	30
4.1.1.1.4 Versuchsstandort Halbturn	31
4.1.1.2 Klima und Witterung der Versuchsstandorte	32
4.1.2 Versuchsanlage	37
4.1.3 Ertragsermittlung und Probenziehung	38
4.1.3.1 Allgemeine Untersuchungen 1992 bis 1999	38
4.1.3.2 Ergänzende Untersuchungen im Jahr 1999	39
4.1.4 Bodenprobenahme	39
4.2 Methoden	39
4.2.1 Anpassung der Standortkartierung	39
4.2.2 Pflanzenanalysen	39

	4.2.3 Bodenchemische Untersuchungen	_ 40
	4.2.3.1 Analysenmethoden	_ 40
	4.2.4 Bodenphysikalische Messungen	_ 41
	4.2.4.1 Eindringwiderstand	_ 42
	4.2.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit	_ 42
	4.2.4.3 Wurzeluntersuchungen	_ 44
	4.2.5 Datenerfassung	_ 45
	4.2.5.1 Statistische Auswertungen	_ 45
5	Ergebnisse	47
5	.1 Standortkartierung	_ 47
5	.2 Pflanzenwachstum und Ertrag	_ 51
	5.2.1 Ertragsverhalten in Abhängigkeit steigender Carbokalkdüngermengen (Tabelle 22)	_ 51
	5.2.2 Ausgewählte Qualitätsparameter in Abhängigkeit steigender Carbokalkdüngermengen (Tabelle 23)	_ 54
	5.2.3 Ausgewählte Ertrags- und Qualitätsparameter in Abhängigkeit steigender Mengen an Carbokalk in den Jahren nach Abschluss der Zufuhr (Tabellen 24 u. 25)	_ 56
	5.2.4 Ertrag und Qualitätsparameter bei Weizen im Jahr 1999	_ 59
	5.2.4.1 Zwischenernte im Jahr 1999	_ 59
	5.2.4.2 Ertrags- und Qualitätsparameter bei Weizen im Jahr 1999	_ 61
	5.2.4.3 Ertragsstruktur bei Weizen im Jahr 1999	
5	Bodenchemische Eigenschaften	
	5.3.1 Nährstoff- und Spurenelementgehalt im Boden	
	5.3.1.1 Bodendauereigenschaften	
	5.3.1.1.1 pH-Wert	_ 63
	5.3.1.1.2 Karbonat (CaCO ₃)	_ 64
	5.3.1.2 Makronährstoffe	
	5.3.1.2.1 Phosphor (CAL)	
	5.3.1.2.2 Kalium (CAL)	
	5.3.1.3 Austauschbare Kationen:	
	5.3.1.3.1 Austauschbares Calcium (Ca)	
	5.3.1.3.2 Austauschbares Magnesium (Mg)	
	5.3.1.3.3 Austauschbares Kalium (K)	
	5.3.1.3.4 Austauschbares Natrium (Na)	
	5.3.1.4 Mikronährstoffe	
	5.3.1.4.1 Mangan (Mn)	
	5.3.1.4.2 Kupfer (Cu)	
	5.3.1.4.3 Zink (Zn)	
	5 3 1 4 4 Fisen (Fe)	74

	5.3.	1.4.5 Bor (B)	75
	5.3.2 P	_{vasser} -Werte im Jahr 1999	76
Ę	5.4 Bod	enphysikalische Eigenschaften	77
	5.4.1 E	ndringwiderstand	77
	5.4.1.1	Standort Mannsdorf	77
	5.4.1.2	2 Standort Altlichtenwarth	78
	5.4.1.3	Standort Schönfeld	79
	5.4.1.4	Standort Halbturn	80
	5.4.1.5 Stando	Bodenwassergehalt und Eindringwiderstand im Durchschnitt aller orte	81
	5.4.	1.5.1 Wassergehalt	81
	5.4.	1.5.2 Eindringwiderstand	81
	5.4.2 H	ydraulische Leitfähigkeit	83
	5.4.3 W	urzeluntersuchungen	85
	5.4.4 S	patendiagnose	86
6	Diskus	sion	_ 89
		uss unterschiedlicher Carbokalkmengen auf das Pflanzenwachstum und d Weizen und Zuckerrübe	
6	6.2 Einf	uss auf Pflanzeninhaltsstoffe	90
6	3.3 Einf	uss unterschiedlicher Carbokalkmengen auf bodenchemische Parameter	92
		uss unterschiedlicher Carbokalkdüngermengen auf bodenphysikalische	98
7	Zusamı	nenfassung und Schlussfolgerungen	
8	Literatu	rverzeichnis	107
9	Tabelle	nverzeichnis	119
10		ingsverzeichnis	
11	l ehens	-	123

1 Einleitung

In Produktionsgebieten mit silikatischem Ausgangsmaterial der Bodenbildung sowie bei Verwendung von physiologisch sauer wirkenden Düngemitteln werden regional zum Teil hohe Kalkmengen aus der Krume ausgewaschen. Hohe Niederschlagsmengen verstärken den Kalkverlust. Hinzu kommt der langjährige Entzug durch die aufwachsenden Pflanzen.

Kalk stellt im Boden und als Nährstoff eine Besonderheit dar. Er ist nicht nur ein wichtiger Pflanzendünger, sondern seine größere Bedeutung hat er als Bodendünger. Der Mengenbedarf als Makronährstoff ist im Vergleich zu Stickstoff oder Kalium relativ gering. Entscheidend ist vielmehr der Einfluss auf die Fruchtbarkeit des Bodens, die sich u. a. in den physikalischen Eigenschaften wie der Strukturstabilität, der Porengrößenverteilung oder dem Infiltrationsvermögen äußert (HAFNER und GUTSER 1998). Diese Eigenschaften kommen sowohl auf kalkfreien als auch auf kalkreichen Böden zum Tragen. Zur langfristigen Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist nach MÜLLER (1988) und MENGEL (1991) der Kalkzustand des Bodens zu beachten.

Durch eine gezielte Kalkdüngung kann auf sauren Böden der pH-Wert und nach HORN und BECKER (2004) auf carbonatfreien Böden der Kalkstatus auf ein standörtliches Optimum eingestellt werden Daher ist auf vielen landwirtschaftlich genutzten Böden eine stetige Kalkdüngung eine wesentliche Voraussetzung für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit.

Zur Auf- und Erhaltungsdüngung werden überwiegend oxidische oder kohlensaure Kalkdünger eingesetzt. Der bei der Saftreinigung im Zuge der Zuckergewinnung anfallende Carbokalk stellt eine Möglichkeit dar, regional die Kalkversorgung der Böden sicherzustellen. Der Einsatz von Carbokalk als Düngemittel ist u. a. auch in der EU-Verordnung 834/2008 geregelt.

2 Zielsetzung und Abgrenzung der Fragestellung

2.1 Zielsetzung der Fragestellung

Auf vier Standorten mit Böden unterschiedlichen Kalkgehalts wurden seit 1992 die Auswirkungen unterschiedlich hoher Carbokalkgaben beurteilt. Die Feldversuche wurden im pannonischen Becken, einem Senkungsgebiet im Südosten Mitteleuropas, im Osten Österreichs durchgeführt. Untersucht wurden

- 1 der Ertrag und der Gehalt an ausgewählten Inhaltsstoffen der Ernteprodukte
- 2 die Nährstoffverfügbarkeit vor allem der Mikronährstoffe und
- 3 ausgewählte bodenphysikalische Parameter sowie Veränderungen der Bodenstruktur.

In der ersten Versuchsphase, während eines fünfjährigen Zeitraumes wurden - bei sonst ausgesetzter Düngung – praxisbezogen stark überhöhte Mengen an Carbokalk ausgebracht.

Ziel war es, die Auswirkungen der Aufdüngung mit Carbokalk auf den Nährstoffhaushalt verschiedener Böden sowie die Ertragsleistungen und den Gehalt ausgewählter Inhaltsstoffe zu beurteilen. In der zweiten Phase, nach der Aufdüngung, wurden die oben angeführten Untersuchungen und Messungen weitergeführt. Zusätzlich wurde auf allen Parzellen jährlich eine ertragsbezogene Ausgleichsdüngung mit Stickstoff vorgenommen. Eine allfällige Unterversorgung an Spurenelementen wäre möglicherweise durch eine zu geringe Stickstoffversorgung überdeckt worden. Am Ende der Aufdüngungsphase wurden zur Beurteilung der Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen in Abhängigkeit der unterschiedlich hohen Kalkdüngung Boden- und Pflanzenanalysen durchgeführt.

Ein wesentliches Ziel der Arbeit war es, anhand von ausgewählten bodenphysikalischen Parametern die Auswirkungen auf die Bodenstruktur zu beurteilen.

2.2 Abgrenzung der Fragestellung

Auf Böden mit niedrigem pH-Wert wirkt eine Kalkdüngung einer weiteren Bodenversauerung entgegen. Damit können schädliche Einflüsse bestimmter Elemente u. a. wie Aluminium oder Mangan beseitigt werden (SCHÖNHARD 1979; BLASL und BACHLER 1982) bzw. die Verfügbarkeit wichtiger Nährstoffe und Spurenelemente wie z. B. Phosphor oder Bor erhöht werden (GERTH 1973; SCHWERTMANN et al. 1976; GRASS und HEYN 1980; SCHEFFER und SCHEFFER 1984; SCHAUP 1984, 1988; EDELMANN und SCHRÖDER 1987). Ein weiteres bedeutendes Ziel ist, bodenphysikalische Eigenschaften zu erhalten bzw. zu verbessern (HARRACH et al. 1972; SCHWERTMANN und ATTENBERGER 1979).

Carbokalk steht überwiegend in jenen Ackerbaugebieten zur Verfügung, in denen es Zuckerfabriken gibt. Gemessen an der verarbeiteten Rübenmenge fallen bis zu fünf Prozent Carbokalk an. Umgelegt auf die Anbaufläche ergeben sich bei einer durchschnittlichen Ernte etwa drei Tonnen Carbokalk je Hektar. Durch laufende technische Verbesserungen bei der Zuckerrübenverarbeitung bzw. bei der Zuckergewinnung konnte in den letzten zehn Jahren der Einsatz von Kalkstein bei der Saftreinigung um etwa ein Drittel gesenkt werden (HEIN et al. 2007).

Die Böden in den Zuckerrübenanbaugebieten im Osten Österreichs weisen überwiegend hohe pH-Werte auf. Daher stellt sich im Besonderen die Frage, wie sich eine Düngung mit Carbokalk auf kalkreichen Standorten auswirkt: Sind Auswirkungen auf die Ertragsleistung verschiedener Kulturpflanzen gegeben? Wird die Verfügbarkeit spezieller Makro- und

Mikronährstoffe beeinflusst? Wie reagieren ausgewählte bodenphysikalische Parameter auf die Zufuhr von hohen bzw. praxisbezogen überhöhten Carbokalkdüngermengen?

Nach CHRISTENSON et al. (2000) gibt es bis dato in der Literatur keine Berichte über Langzeitversuche, die den Einfluss einer Kalkzufuhr auf alkalischen Böden auf den Ertrag und die Nährstoffversorgung der Pflanzen aufzeigen.

3 Literatur

3.1 Kalk als Element

Der durchschnittliche Calciumgehalt der Erdkruste beträgt etwa 3,6 % (HABY et al. 1990). Der Calciumgehalt der verschiedenen Bodentypen schwankt in einem weiten Bereich und hängt hauptsächlich vom Muttergestein ab. Böden, die auf Kalkstein entstanden sind, enthalten bis zu 20 % Calcium und hohe Mengen an CaCO₃. Im Vergleich zu den Gehalten an anderen Makronährstoffen sind die Calciumgehalte der Mineralböden sehr hoch (MENGEL 1991). Als calciumhältige Minerale sind in den Böden vorwiegend Al-Si-Silikate wie z.B. Feldspat und Amphibole, Ca-Phosphate und Ca-Carbonate zu finden. Letztere sind besonders in kalkhältigen Böden wichtig und liegen überwiegend als Calcit (CaCO₃) oder Dolomit (CaCO₃ MgCO₃) vor (MENGEL und KIRKBY 1982, 2001).

Da calciumhältige Minerale leicht verwitterbar sind und das Calcium-Ion an den Austauschern der Böden stark gebunden wird, liegt ein großer Anteil des Calciums in austauschbarer Form vor. Das austauschbare Calcium ist für die Bodenstruktur von besonderer Bedeutung (MENGEL und KIRKBY 1982, 2001, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002). Aus dem gesamten Calciumvorrat im Boden ist nach HABY et al. (1994) das austauschbare Calcium der wichtigste Anteil, der für die Pflanzenwurzel verfügbar ist. Die Gehalte können von < 25 mg/kg bis über 5000 mg/kg reichen.

Mit der Ernte der Kulturpflanzen werden dem Boden zwischen 5 und 250 kg Calcium je Hektar und Jahr entzogen (MENGEL 1991, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002). Weiters werden Calciumcarbonate im Boden durch das Einwirken von Kohlendioxid und Wasser in leicht bewegliches Calciumbicarbonat umgewandelt, das sehr leicht ausgewaschen werden kann. MENGEL (1991) beziffert die Auswaschungsverluste auf 300 bis 400 kg CaO/ha. Dadurch kommt es auf vielen Böden zu einer Calciumverarmung. Nach FEGER (1996) wird die Calciumauswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Böden sehr stark durch die standortsabhängige Konstellation der Einflussgrößen Klima, Bodenart und -gefüge, Vegetation, Düngung und Kalkung bestimmt. DERSCH und HÖSCH (2003) ermittelten im pannonischen Anbaugebiet im Osten Österreichs einen jährlichen Calciumaustrag von 182 kg/ha. Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen stehen jährlichen Auswaschungsverlusten von 30 bis 350 kg Calcium je Hektar und Jahr und den Entzügen durch die Pflanze Einträge aus der Luft in der Höhe von 3 bis 21 kg gegenüber. Zum Ausgleich dieser Verluste ist daher eine regelmäßige Kalkdüngung erforderlich. Wenn trotz ausreichender Calciumkonzentration in der Bodenlösung häufig eine Calciumdüngung bei tonreichen Böden erfolgt, so geschieht dies im Hinblick auf die Verbesserung des Gefüges (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

3.2 Kalk als Pflanzennährstoff

3.2.1 Calciumaufnahme durch die Pflanze

Nach TISDALE et al. (1985) sind zahlreiche Bodenfaktoren u. a. der Gesamtgehalt an Calcium, der pH-Wert und die Kationenaustauschkapazität für die Pflanzenverfügbarkeit des Calciums von Bedeutung.

Calcium wird als Ion (Ca²⁺) von der Pflanzenwurzel aufgenommen. MARSCHNER (1995) gibt einen Calciumgehalt von 0,1 bis 5,0 % der Trockenmasse an - in Abhängigkeit von Wachstumsbedingungen, Pflanzenart und Pflanzenorgan. Nach MENGEL (1991) enthalten

Dikotyledonen 10 bis 30 mg Calcium/g in der Trockensubstanz, während Gramineen vielfach Gehalte von unter 10 mg/g in der Trockenmasse aufweisen. Diese, in beiden Fällen hohen Gehalte, sind weniger auf eine effiziente Ca-Aufnahme durch die Wurzelzellen als vielmehr auf die entsprechenden Ca-Konzentrationen in der Bodenlösung zurückzuführen. Das niedrige Ca-Aufnahmepotential liegt darin begründet, dass Ca²+ nur durch die jungen Wurzelspitzen aufgenommen werden kann. In dieser Wurzelzone befinden sich die Zellwände der Endodermis noch in ihrem Primärzustand, d. h. noch ohne flächenhafte Suberin-Einlagerung (CLARKSON und SANDERSON 1978, MENGEL und KIRKBY 1982, 2001, KINZEL 1982). Aufnahmeversuche von CLARKSON (1974) in verschiedenen Wurzelzonen haben gezeigt, dass im Bereich mit primärer Endodermis der größte Teil der Calciumaufnahme stattfindet. In stärker ausdifferenzierten Wurzeln wird kaum noch Ca²+aufgenommen (KINZEL 1982).

Calcium muss in der Bodenlösung in einer sehr hohen Konzentration vorliegen, damit die Ca-Versorgung der Pflanze nicht gefährdet ist. Die Aufnahme des Ca²⁺ wird durch andere Kationen wie z.B. Kalium, Magnesium und Ammonium gehemmt. Der Antagonismus zwischen Ca und K wird im *Kalk-Kali-Gesetz* von *EHRENBERG* beschrieben, welches besagt, dass durch ein hohes Angebot des einen Elementes die Aufnahme des anderen zurückgedrängt wird (AMBERGER 1988, MENGEL 1991).

Das Ca²⁺-Ion kann auf zwei verschiedenen Wegen durch die Wurzelrinde in die Leitgewebe gelangen. Im Zuge des symplasmatischen Transportes wird das Ion aktiv und selektiv in das Cytoplasma der Zellen der Wurzelhaare und Wurzelrinde aufgenommen und kann durch die Plasmodesmen von einer Zelle zur anderen weiterwandern. Auf dem Wege des apoplasmatischen Transportes gelangen Wasser und darin gelöste Ionen durch das zusammenhängende Kapillarsystem der Zellwände ("Apparent Free space") am lebenden Inhalt der Zelle vorbei in die Pflanze. Bei großem Angebot wird der überwiegende Teil des Calciums über diesen passiven Transportweg, der stark von der Transpiration der Pflanze abhängig ist, aufgenommen (KINZEL 1982, RÖSSNER 1986).

In der Pflanze wird Calcium mit dem Wasserstrom fast ausschließlich im Xylem transportiert, sowohl in ionisierter als auch in komplexierter Form. Da der Transport mit dem Transpirationsstrom nur in akropetaler Richtung erfolgt, nimmt der Ca-Gehalt bei den meisten Pflanzen mit dem Alter der Blätter zu (KINZEL 1982). Da in älteren Blättern deponiertes Calcium nicht mehr mobilisiert wird, können bei nachlassendem Ca-Angebot in den jüngeren Blättern Mangelsymptome auftreten (AMBERGER 1988).

In der Pflanze kommt das Calcium als Salz anorganischer und organischer Säuren (Calciumphosphat, -carbonat und -oxalat bzw. -pektinat) oder sorptiv gebunden vor.

3.2.2 Funktion des Calciums in der Pflanze

Das Calcium ist in der Pflanze sowohl Struktur- als auch Funktionselement. Als wichtiges Strukturelement in der Mittellamelle trägt Calcium maßgeblich zur Versteifung der Zellwände bei. Gemeinsam mit anderen Ionen hat die Konzentration von Ca²⁺ in der Vakuole wesentlichen Einfluss auf osmoregulatorische Prozesse (AMBERGER 1988). Nach MARSCHNER (1995) besteht eine inverse Beziehung zwischen dem Ca-Gehalt im Gewebe und der Anfälligkeit von Pflanzen gegenüber Infektionen von Pilz- und Bakterienkrankheiten.

Hinsichtlich der physiologischen Funktion wird das Calcium aufgrund seiner entquellenden Wirkung als Antagonist zu den Nährstoffen Kalium und Magnesium gesehen. Wesentliche Bedeutung hat Calcium für das Wachstum von meristematischem Gewebe und als Regulator von Enzymaktivitäten. Weiters besteht eine enge Beziehung zwischen der Ca-Konzentration und der Stabilität und Funktionsfähigkeit der Membranen (AMBERGER 1988, MARSCHNER 1995).

RÖSSNER (1986) weist darauf hin, dass der Calciumbedarf der meisten Nutzpflanzen relativ gering ist, solange sie optimale Bedingungen vorfinden. Sind sie jedoch schädlichen Einflüssen wie sauren oder schwermetallhältigen Böden ausgesetzt, dann brauchen Pflanzen größere Calciummengen, um die Schädigungen möglichst gering halten zu können.

3.2.3 Calciummangel bzw. –überschuss in der Pflanze

Bei einem Calciummangel muss zwischen dem eigentlichen Calciummangel der Pflanze und dem Kalkmangel des Bodens unterschieden werden. Kalkmangel im Boden induziert eine Festlegung von Phosphat und Molybdän, eine Hemmung der Magnesium- und Kaliumaufnahme sowie eine Reduktion in der Verfügbarkeit von Spurenelementen (BERGMANN 1993). Die Zufuhr von basisch wirksamen Kalkdüngemitteln kann nach AMBERGER (1988) zwar auch als eine Maßnahme der Ca-Versorgung der Pflanze angesehen werden, sie dient aber in erster Linie dazu, den in semihumiden und humiden Klimaten vorherrschenden, durch Auswaschung verursachten Basenverlust auszugleichen.

Auf Kalkstandorten kann die Verfügbarkeit von Phosphat vermindert sein, da es im neutralen bis leicht basischen pH-Bereich mit Calcium unlösliche Verbindungen bildet. Allerdings kann Phosphat durch die mikrobielle Aktivität und der Stoffwechseltätigkeit der Wurzeln bewirkten räumlich begrenzten pH-Änderungen für die Pflanze verfügbar gemacht werden (WOLDENDORP 1981, RÖSSNER 1986).

Die Pflanzen reagieren auf Calciummangel unterschiedlich. Bei Getreide führt dies häufig zu leeren Spelzen; bei Kartoffel sind die jungen Blätter klein, blass grün und nach unten gebogen; junge Zuckerrübenblätter rollen sich nach oben ein. Nach AMBERGER (1988) sind typische Störungen der Ca-Versorgung während der Fruchtausbildung die Stippigkeit der Äpfel oder die Fruchtfäule bei Tomaten.

Direkter Calciumüberschuss ist in der Praxis nicht bekannt (BERGMANN und NEUBERT 1976, BERGMANN 1993). Dagegen sind zahlreiche durch Kalkung induzierte Schädigungen der Pflanze bekannt. Zum Beispiel kommen so genannte kalkinduzierte Chlorosen durch einen Mangel an aktiviertem Eisen zustande (MARSCHNER 1995). In Getreide ist auf kalkreichen Böden Zinkmangel der am weitest verbreitete Mikronährstoffmangel (GRAHAM et al. 1992).

CHRISTENSON et al. (2000) wiederum verweisen auf Versuche, in denen Kalk auf alkalischen Böden ausgebracht wurde. Diese hatten zum Ergebnis, dass durch Kalkzufuhr die Erträge sowie die Aufnahme von Makro- und Mikronährstoffen von verschiedenen Kulturarten nur gering bis gar nicht beeinflusst werden.

3.3 Bedeutung von Kalk für den Boden

SCHNUG und HANEKLAUS (2002) bezeichnen die Kalkung neben der Bodenbearbeitung als eine der Schlüsselmaßnahmen landwirtschaftlicher Produktionstechnik zur Sicherung der Bodenstruktur. Durch Düngung mit Kalk soll eine Verbesserung der bodenphysikalischen, - chemischen und -biologischen Eigenschaften erreicht werden. GRASS und BUDIG (1976) nennen konkret die Aktivierung des Bodenlebens, die Verbesserung der Bodenstruktur, die Erhöhung der Regenverdaulichkeit eines Bodens und die bessere Verfügbarkeit von Nährstoffen. Ebenso liegt nach HAFNER und GUTSER (1998) das Ziel einer Kalkung nicht in der Sicherstellung der Ca-Versorgung der Pflanze, sondern des Fruchtbarkeitszustandes des Bodens, der sich in seinen *chemischen* (Nährstoffmobilität, Verhinderung von Aluminium- und Mangantoxizität), *physikalischen* (Strukturstabilität, Porengrößenverteilung, Wasserinfiltration etc.) und *biologischen* (mikrobielle Aktivität, Umsatz der organischen Substanz) Eigenschaften äußert.

Kalk ist der wichtigste Regulator des Boden-pH-Wertes (DRAYCOTT 1993) und dient nach GUTSER (1984) weniger der Ca-Ernährung der Pflanze, sondern vielmehr der Erhaltung und zum Teil der Verbesserung des Kulturzustandes der Böden.

Basisch wirksame Kalk- (und Mg-) Dünger sind in der Hauptsache Bodendünger und erst in zweiter Linie Ca-Lieferanten für die Pflanze (AMBERGER 1988, SCHAUP 1988, FINCK 1992, v. KESSEL 1993). Auf schweren Böden wird damit vor allem das Bodengefüge verbessert (AMBERGER 1988). Durch die Fähigkeit, stabile Brücken zwischen den Ton- und Humusteilchen des Bodens zu bilden, ist Calcium für die Erhaltung der Bodenstruktur von großer Bedeutung (MENGEL und KIRKBY 1982, 2001).

Um das Mikroorganismenleben, die Krümelstabilität sowie Auf- und Abbauprozesse im Boden günstig zu beeinflussen, ist eine wesentlich höhere Calciumkonzentration in der Bodenlösung notwendig als die Pflanze für ihre Lebenstätigkeit braucht (MENGEL 1991).

3.3.1 Wirkung des Kalkes auf bodenchemische Parameter

SCHWERTMANN et al. (1976) beschreiben auf Standorten mit niedrigem pH-Wert (3,9) im Oberboden (0 bis 20 cm) den Einfluss einer Kalkdüngung auf bodenchemische Parameter. Die Folgerungen sind: Steigerung des pH-Wertes (auf 6,9), Abnahme an austauschbarem Aluminium und Mangan (von 2,89 bzw. 0,23 auf 0 bzw. 0,01 mval/100g Boden), Zunahme des austauschbaren Calciums (von 0,98 auf 16,75 mval/100 g Boden), Erhöhung der Phosphormobilität (von 104 auf 161 ppm P_{CAL}) sowie Steigerung der effektiven Austauschkapazität (von 5 auf 18 mval/100g Boden) und der Basensättigung (von 44 auf 100 %).

Basisch wirkende Düngekalke sind Carbonate und Oxide. Carbonate (oder kohlensaure Kalke) sind in Wasser nur gering löslich; im Gegensatz zu oxidischen Kalken sind diese Kalke nur langsam, aber über längere Zeit anhaltend wirkend. **Abbildung 1** zeigt die basische Wirkung von Düngekalken (AMBERGER 1988).

Abbildung 1: Basische Wirkung von Düngekalken (AMBERGER 1988)

Die Wirkung einer Kalkung des Bodens beruht auf zwei unterschiedlichen Vorgängen: Zum einen werden dem Boden Ca²⁺ - Ionen zugeführt, zum anderen gelangen mit dem Kalk alkalisch wirkende Verbindungen (Calcium- oder Magnesium-Salze) in den Boden. Durch den ersten Prozess wird die Calciumkonzentration, durch den zweiten der pH-Wert erhöht (MENGEL 1991). Im Laufe der Umsetzung des Kalkes im Boden treten HCO₃ - Ionen auf, welche die Protonen der Bodenlösung unter Bildung von Wasser neutralisieren und damit den pH-Wert erhöhen (AMBERGER 1988).

Einer gezielten Erhöhung des pH-Wertes kommt große Bedeutung zu, da nach MENGEL (1991) sowie SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) mit hohem pH-Wert die Verfügbarkeit von Phosphor, Kalium und Mangan wiederum sinkt (vgl. Abbildung 2). Mit steigender OH⁻ - und Ca²⁺ - Konzentration in der Bodenlösung carbonatreicher Böden sinkt die Phosphat-Konzentration und führt zu relativ niedrigen P-Gehalten (ZORN 1998). Bodenphosphate können durch eine Absenkung des pH-Wertes mobilisiert werden. Nach ZORN (1998) reduzieren jedoch hohe CaCO₃-Gehalte die Ausdehnung der pH-Absenkung in

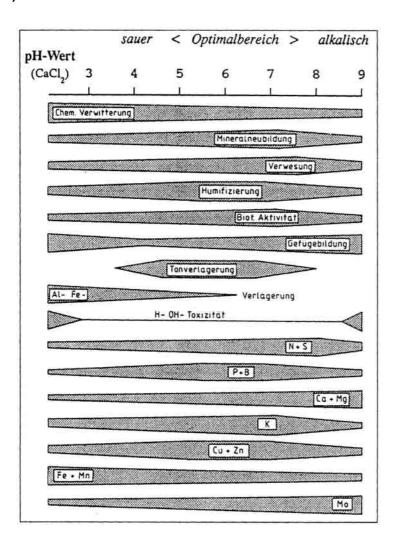
der Rhizosphäre. Versuche von HAUTER (1983) ergaben, dass an der Wurzeloberfläche von Rotklee auf einem Alluvialboden mit 18 % CaCO₃ der pH-Wert nicht absank, auf einer Parabraunerde hingegen schon.

Untersuchungen von STURM und ISERMANN (1978) sowie BAREKZAI (1984) zeigen, dass die Ausnutzung von Düngerphosphaten in Ackerböden mit gutem Kalkzustand höher ist als bei Böden mit schlechtem Kalkzustand.

Nach BERGMANN (1993) wird die Mn- Aufnahme neben einem hohen pH-Wert auch durch hohe Calcium-Gehalte gehemmt. Diese Ergebnisse bestätigt FINCK (1992), wonach ein Mn-Mangel typisch für Böden mit neutraler bis alkalischer Reaktion ist.

Auch die Verfügbarkeit von Bor, Zink, Eisen und Kupfer sowie die Aufnahme der Schwermetalle Cadmium und Blei gehen mit steigendem pH-Wert zurück (MENGEL 1991). HINSINGER et al. (2003) weisen allerdings darauf hin, dass eine wurzelbedingte Absenkung des Boden-pH-Wertes für die Verfügbarkeit von Nährstoffen von besonderer Bedeutung ist (siehe auch Abbildung 2).

Abbildung 2: Beziehung zwischen Bodenreaktion und verschiedenen Prozessen und der Verfügbarkeit von Nährelementen im Boden (nach FEGER 1996, verändert aus KUNTZE et al. 1994)



3.3.2 Wirkung des Kalkes auf bodenphysikalische Parameter

Mineralböden haben zwei Maxima der Gefügestabilität (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002):

- 1 Bei hoher Calciumsättigung im pH-Bereich 7 bis 8, besonders in Gegenwart von nativem Calciumcarbonat, wird die Stabilität durch Calciumbrücken zwischen den Bodenteilchen bedingt.
- 2 Das zweite Maximum liegt bei einem pH-Wert unter 5. In diesem Bereich wird die Stabilität durch Aluminium-Ionen gewährleistet.

Da Aluminium toxisch auf die Pflanze wirkt, ist jedoch im Hinblick auf die Sicherung der Bodenstruktur ein schwach alkalischer Bereich anzustreben.

In der Literatur wird mit unterschiedlichem Ergebnis von der Wirkung einer Kalkung auf bodenphysikalische Parameter berichtet. HARRACH et al. (1972) konnten keine eindeutige Kalkwirkung auf die Gefügeeigenschaften des Ackerbodens nachweisen. Als Ursachen hierfür werden von den Autoren drei mögliche Gründe angeführt. Zum einen wird der zu geringe Tongehalt des Bodens (9 bzw. 21 % im A- bzw. B-Horizont) genannt. Zum anderen könnte auch eine ungenügende Kalkverteilung in der Krume ausschlaggebend gewesen sein. Weiters wird auf Bodenunterschiede innerhalb der Versuchsanlage hingewiesen.

GAESE et al. (1971) stellte auf kalkbedürftigen Böden anhand der Gefüge- und Aggregatstabilität weder einen positiven noch negativen Einfluss der Kalkung auf das Bodengefüge fest. In den Versuchen von SCHWERTMANN und ATTENBERGER (1979) stieg auf Grünland der pH-Wert durch eine Kalkung von 4,5 auf 6,7 an. Eine Wirkung auf die Gefügeeigenschaften des Bodens - anhand der Aggregatstabilität und Lagerungsdichte beurteilt – war dadurch nicht nachweisbar.

SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) verweisen auf Untersuchungsergebnisse, in denen der Einfluss einer Kalkung auf die Gefügestabilität mittels Nasssiebung, Abscherwiderstand, Porenverteilung u.a. nur teilweise und dann nur mit hohen Kalkgaben zu positiven Werten geführt haben. In anderen Untersuchungen konnten dagegen keine eindeutigen Wirkungen festgestellt werden (GAESE et. al. 1971, SCHAFFER und MOSEBACH 1972, BECHER und SCHWERTMANN 1973, SCHEFFER und MEYER 1973, HARTGE 1978).

Diesen Ergebnissen stehen zahlreiche Versuche gegenüber, bei denen es zu einer positiven Wirkung des Kalkes auf bodenphysikalische Parameter kam (SCHMID 1967; SIDIRAS 1969; SCHEFFER und MEYER 1970). GRASS und BUDIG (1976) verweisen darauf, dass nicht allein die direkte Wirkung des Calcium-Ions auf die Pflanze die Ursache sein kann. Die Kalkwirkung auf die Erträge beruht vielmehr auf der indirekten Wirkung über die Anregung von Lebens- und Umsetzungsvorgängen im Boden.

GERTH (1973) stellte fest, dass durch hohe Kalkmengen das Substanzvolumen des Bodens erniedrigt und somit das Porenvolumen erhöht wurde; infolgedessen konnte eine bessere Durchlüftung und eine bessere Ableitung des Niederschlagswassers in die Tiefe beobachtet werden.

IRION (1979) und GUTSER (1984) beschreiben die günstigen Eigenschaften des Kalkes so: Förderung der Krümelbildung und dadurch Verbesserung der Bodenstruktur, Verbesserung der Krümelstabilität und folglich des Luft- und Wasserhaushalts, Neutralisierung der Bodensäure, Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit sowie Förderung der Bildung von wichtigen Huminstoffen.

LARSON et al. (1994) weisen darauf hin, dass durch die Zufuhr von Kalk die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber Verdichtungen erhöht wird. Besonders auf Tonböden ist diese Wirkung durch das Vorhandensein von freiem Kalk sehr effektiv (CANNEL et al. 1978). Nach KUNTZE (1996) bewirkt eine Kalkung in der Regel ein spätes

und lang ausgedehntes Strukturmaximum und vermindert die Strukturschwankungen und verbessert somit die Gefügestabilität.

3.3.3 Wirkung des Kalkes auf bodenbiologische Parameter

Nach STÖVEN (2002) haben Kalkung und pH-Wert eine herausragende Bedeutung für das Bodenleben, aber stets in Wechselwirkung mit Bodenfeuchte, Porenvolumen und Nahrungsangebot. Da nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) durch einen steigenden pH-Wert die Mikroorganismentätigkeit angeregt wird, können Huminstoffe verstärkt abgebaut und Stickstoff freigesetzt werden. Während der Großteil der Bakterien den schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich bevorzugt, gedeihen viele Pilze auch im stärker sauren Bereich.

BACHTHALER et al. (1975) stellten in Versuchen auf saurer Braunerde aus Urgesteinsmaterial (pH-Wert 4,7) fest, dass die durch eine Kalkung hervorgerufene Erhöhung des pH-Wertes auf 7,1 die pflanzenpathogene Bakteriengattung *Streptomyces scabies* fördert und somit das Auftreten von Kartoffelschorf. Die Autoren weisen darauf hin, dass auch die Niederschlagsintensität und –verteilung den Schorfbefall beeinflussen.

Untersuchungen von STENBERG et al. (2000) ergaben, dass durch eine Kalkung die mikrobielle Aktivität in einem gewissen Umfang ansteigt. Dies zeigt sich in der Folge auch in zunehmenden Erträgen.

3.4 Bodenstruktur und ausgewählte bodenphysikalische Parameter

3.4.1 Eindringwiderstand

Der Eindringwiderstand wird oftmals zur Beurteilung des Bodengefüges herangezogen (LIEBHARD et al. 1995, STIRZAKER et al. 1996). Zumeist hat die Ermittlung dieser Messwerte zum Ziel, das Wurzelwachstum der Pflanzen zu charakterisieren. Nach MURER et al. (1991) stellt neben dem luftgefüllten Porenvolumen der mechanische Eindringwiderstand ein wichtiges Kriterium für die Durchwurzelbarkeit von Böden dar. Als Maß für den Widerstand, den der Boden der eindringenden Wurzel entgegensetzt, wird häufig der Penetrometerwiderstand verwendet. Gemessen wird dabei der entsprechende Druck, der einer in den Boden eindringenden Sonde entgegengesetzt wird. Zahlreiche Autoren verwendeten Penetrometermessungen zur Beschreibung der Durchwurzelungsbedingungen (u. a. PHILLIPS und KIRKHAM 1962, GRIMES et al. 1975, EHLERS et al. 1983, DUMBECK 1986, MÜLLER 1993, CLARK 2003).

EITZINGER (1991), LIEBHARD (1995) und LIEBHARD et al. (1995) zeigten, dass mit Penetrometermessungen neben der Charakterisierung des Durchwurzelungswiderstandes auch das Bodengefüge beurteilbar ist.

BECHER und SCHWERTMANN (1973) versuchten den Einfluss einer Kalkung auf Gefügeeigenschaften durch die Bestimmung des Eindringwiderstandes in einzelne Aggregate zu erklären. Aufgrund der erheblichen Streuungen der Messwerte konnte keine signifikante Wirkung der Kalkung festgestellt werden. Um die Streuungen herabzusetzen und die Wurzel besser zu simulieren, schlagen die Autoren vor, Sonden mit geringerem Durchmesser zu verwenden.

3.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit (Wasserleitfähigkeit)

Die Auswirkungen des Bodengefüges auf den Pflanzenertrag werden im Wesentlichen durch den Einfluss auf den Wachstumsfaktor "Wasser" wirksam (HARTGE und BOHNE 1985, HARTGE und EHLERS 1985). Die Struktur bzw. Stabilität des Bodens ist ein wesentlicher Faktor für die Wasserleitfähigkeit. Daher kann nach HARTGE und HORN (1999) das Ausmaß der Veränderung der Wasserleitfähigkeit als Maß für die Strukturstabilität verwendet werden. HELAL (1991), HARTGE (1992), PAIGE und HILLEL (1993), WIMMER et al. (1997) sowie ARVIDSSON (2000) bestätigen, dass die Bodenstruktur einen großen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften (z.B. Wasserleitfähigkeit) des Bodens hat.

Das Ausmaß der Wasserbewegung im Boden ist abhängig vom Potentialgefälle und der Wasserleitfähigkeit des Bodens. Eine hohe Wasserleitfähigkeit bedeutet für die Pflanze eine bessere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Wasserangebotes (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

Die Wasserleitfähigkeit kann auf verschiedene Art und Weise sowohl im Labor als auch im Feld bestimmt werden. Unterschieden wird zwischen gesättigter und ungesättigter Wasserleitfähigkeit. Unter gesättigter Wasserleitfähigkeit (K_s) wird die Fähigkeit des Bodens verstanden, Wasser unter gesättigten Bedingungen zu leiten (KLUTE und DIRKSEN 1986). In terrestrischen Böden liegt weitaus häufiger nur eine teilweise Wassersättigung ("ungesättigter Zustand") vor (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

Für die Beschreibung der Wasserbewegung im Boden ist die Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit im Feld von großer Bedeutung (ZHUANG et al. 2000). Wird K_s im ungesättigten Bereich gemessen, wird diese oft als Wasserleitfähigkeit bei Feldsättigung (K_{fs}) bezeichnet (REYNOLDS 1993). Nach JABRO (1988, 1996) ist dieser Parameter eine der wichtigsten Eigenschaften zur Beschreibung von Wasserbewegungen und -transportvorgängen im Boden. Bei Starkniederschlägen wird die Infiltration zu Beginn von der ungesättigten Wasserleitfähigkeit bestimmt, während die tiefere Ableitung des Niederschlagswassers zunehmend von der Wasserleitfähigkeit unter gesättigten Bedingungen abhängt, die wiederum von der Porengrößenverteilung anhängig ist (EDWARDS et al. 1988).

Eine Möglichkeit der Messung der Wasserleitfähigkeit bei Feldsättigung ist die Verwendung des GUELPH-Permeameters. Es handelt sich hierbei um eine Methode, die direkt im Feld durchgeführt werden kann (REYNOLDS et al. 1983; REYNOLDS und ELRICK 1985; PAIGE und HILLEL 1993; JABRO 1996; ARYA et al. 1998). Nach AMOOZEGAR und WARRICK (1986) liegt der Vorteil dieser Methode darin, dass abhängig von Standortfaktoren (Bodenart, Wassergehalt) schnell ein Ergebnis erzielt und wenig Wasser benötigt wird.

3.4.3 Durchwurzelung

Ein entscheidender Faktor zur Beurteilung des Pflanzenwachstums ist die Fähigkeit der Wurzel, im Boden zu wachsen und dadurch Wasser- und Nährstoffvorräte zu erschließen (CLARK et al. 2003). Nach GRUBER (1988) ist das Ertragsvermögen eines Standortes aber nicht nur durch das pflanzenverfügbare Wasser und den Nährstoffgehalt des Bodens bestimmt, sondern auch durch die Durchwurzelbarkeit des Bodens. Die Durchwurzelungsintensität des Bodens ist wiederum von der Bodenstruktur abhängig.

Zwischen der wachsenden Pflanzenwurzel und dem Boden bestehen zahlreiche Wechselwirkungen. Der Boden beeinflusst die Wurzel bezüglich der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, des Durchwurzelungswiderstandes und Gashaushaltes. Umgekehrt üben die Wurzeln Einfluss auf den Boden in Form von wiederholtem Entzug von Wasser und Ionen, Gefügeänderungen durch mechanische Einwirkungen und Abgabe von Exsudaten aus (HELAL 1991). Nach BODNER (2007) werden durch die Pflanzenwurzeln nicht nur die

Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzen bestimmt, sie beeinflussen auch die Stabilisierung der Bodenstruktur im Wurzelbereich.

Die Durchwurzelung des Bodens ist zwar kein direkter bodenphysikalischer Parameter. Die Wurzelmasse und -verteilung gibt jedoch eine direkte Auskunft darüber, welche physikalischen Bedingungen (z.B. Bodenstruktur) die Wurzel im Boden vorfindet. Nach DANNOWSKI und WERNER (1997) gibt die Durchwurzelbarkeit weiters Aufschluss über den Gefügezustand des Bodens hinsichtlich seiner Eignung als Pflanzenstandort. Neben anderen Wurzelparametern wie z.B. Wurzellängendichte und Wurzelmasse ermöglicht nach o. g. Autoren die Wurzelanzahl wichtige Aussagen zu den Wachstumsbedingungen am Standort.

Zur Feststellung der Durchwurzelung werden in der Literatur verschiedene Methoden - u. a. *Profilwandmethode, Monolithmethode, Bohrkernmethode* - angeführt (KÖPKE 1981; MÜLLER 1993; WINDT und MÄRLÄNDER 1994; WINDT 1995; EHLERS 1996; DANNOWSKI und WERNER 1997, WAGENTRISTL 1998).

Der Vorteil der **Profilwandmethode** besteht darin, dass die Wurzelverteilung sehr genau erfasst werden kann. Weiters erlaubt diese Methode eine Beurteilung des Profilaufbaus und der Gefügeeigenschaften. Nachteil dieser Methode ist der sehr hohe Zeitaufwand.

Nach KÖPKE (1981) ist die **Monolithmethode** die genaueste und gilt daher als Standardmethode. Mit dieser Methode ist es möglich, nicht nur die Verteilung, sondern auch das Gewicht der Wurzeln festzustellen. Dazu sind jedoch beträchtliche Mengen an Boden zu gewinnen, um die Wurzeln auswaschen zu können.

Im Vergleich zur Monolithmethode muss bei der **Bohrkernmethode** weniger Bodenvolumen geworben werden. Dabei können Verteilung und Gewicht der Wurzeln mittels Auswaschung erfasst werden. Im Labor werden die Wurzeln vom Boden befreit (SMUCKER et al. 1982) und mit optischen Verfahren werden Wurzellänge, -durchmesser und –oberfläche bestimmt (HIMMELBAUER et al. 2004, BODNER 2007). Die arbeitsintensive Probenvorbereitung ist jedoch bei hoher Probenzahl ein Nachteil.

Eine Abwandlung dieser Methode besteht darin, dass die Bohrkerne direkt am Feld gebrochen werden und die Wurzeln an beiden Bruchflächen der Bohrkerne gezählt werden. Aufgrund des geringeren Zeitaufwandes können damit erheblich mehr Untersuchungen vorgenommen und Genauigkeit sowie Reproduzierbarkeit verbessert werden. Versuche von VETTER und SCHARAFAT (1964) sowie STOFFEL et al. (1995) zeigten, dass diese Methode gute Informationen über die Verteilung der Wurzeln liefern kann. Allerdings wird bei diesem Vorgehen keine Aussage über die Wurzelmenge je Volumseinheit Boden getroffen (FRÜCHTENICHT 1986).

3.5 Carbokalk als Dünger

Durch Erhitzen wird aus Kalkstein (CaCO₃) Kalziumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO₂) gewonnen, die bei der Zuckergewinnung im Zuge der Saftreinigung Verwendung finden (CaO und CO₂). Das Kalziumoxid wird durch die Zugabe von Wasser ("Löschen") in Kalziumhydroxid umgewandelt. Diese Kalkmilch wird in mehreren Schritten dem Rohsaft zugesetzt. Durch die Einleitung von Kohlendioxid im Zuge der Carbonation fällt Kalkschlamm aus, der im wesentlichen aus gefälltem kohlensaurem Kalk (CaCO₃) und Nichtzuckerstoffen wie Eiweiß, Aminosäuren, Pektinen sowie Mineralstoffen besteht (v. d. POEL et al. 1998).

Mittels Filterpressen wird der Schlamm auf etwa 70 % Trockensubstanz abgepresst, so dass ein Produkt mit entsprechenden Lager- und Streueigenschaften entsteht. Dieses Produkt wird als Carbokalk bezeichnet (GUTSER 1983). Je Tonne verarbeiteter Zuckerrübe werden rund 30 bis 40 kg Kalk für die Reinigung des Zuckersaftes benötigt (IRION 1988).

Die Verwendung von Carbonationskalk stellt eine Möglichkeit der Kalkdüngung dar. Nach der österreichischen Düngemittelverordnung 1994 ist Carbokalk als Mineralischer Kalk- und Magnesiumdünger zugelassen. Die typenbestimmenden Nährstoffe sind CaO (33 % im Produkt) und MgO (1,4 % im Produkt). Der Siebdurchgang beträgt 100 % bei 1 mm und 95 % bei 0,3 mm lichter Maschenweite.

Tabelle 1: Analyseergebnis von Carbokalk (BFL, 1997)

Trockensubstanz		70,40	%
Asche (Glührückstand bei 550℃)		62,83	%
Organische Substanz		7,57	%
Gesamtstickstoff	N	0,27	%
Gesamtphosphat	P ₂ O ₅	1,15	%
Gesamtkalium	K₂O	0,11	%
Calcium	CaO	31,73	%
Magnesium	MgO	1,27	%
Natrium	Na₂O	0,04	%
Gesamtkohlenstoff	TC	9,22	%
Kupfer	Cu	13,87	mg/kg
Mangan	Mn	167,00	mg/kg
Eisen	Fe	1946,00	mg/kg
Zink	Zn	28,60	mg/kg
Blei	Pb	2,59	mg/kg
Cadmium	Cd	0,29	mg/kg
Chrom	Cr	4,27	mg/kg
Nickel	Ni	2,70	mg/kg
Arsen	As	1,33	mg/kg
Quecksilber	Hg	0,01	mg/kg

In der Europäischen Union (EU) wurde Carbokalk in die Liste der im Biolandbau zulässigen Betriebsmittel als Kalkdüngemittel aufgenommen (VO EG Nr. 2092/91) und ist daher in Biolandbaubetrieben und auf Flächen, die im Rahmen des ÖPUL (Österreichisches Programm für umweltgerechte Landwirtschaft) - Programmes bewirtschaftet werden, ohne Einschränkungen verwendbar.

3.5.1 Basische Wirksamkeit von Carbokalk

Carbokalk, mit einem CaCO₃-Gehalt von etwa 45 bis 55 % (i.d. Frischsubstanz), gehört zur Gruppe der kohlensauren Kalke. Er zeigt spezifische Charakteristika dieser Gruppe (siehe 3.3.1). Der Gehalt an basisch wirksamen Bestandteilen, berechnet als CaO, beträgt zwischen 26 bis 32 % (i.d. Frischsubstanz).

Im Gegensatz zu anderen kohlensauren Kalkformen zeigt Carbokalk aufgrund seiner großen Oberfläche - 5,8 m²/g gegenüber 0,78 m²/g herkömmlicher kohlensaurer Kalke bei gleicher

Partikelgrößenverteilung (WEICHERT 1982, IRION 1988) – des frisch ausgefällten Karbonates eine sehr hohe Reaktivität. Zahlreiche Versuche auf sauren Böden bestätigen die höhere Auflösungsrate und damit die höhere Wirksamkeit von Carbokalk gegenüber anderen kohlensauren Kalken bzw. Magnesiumkalken (DELLER und TEICHER 1980, AMBERGER und GUTSER 1982, AMBERGER 1983, GUTSER, 1983, v. KESSEL 1994). GUTSER (1984) sowie HAFNER und GUTSER (1998) bestätigen die gute Löslichkeit des Carbokalkes, weisen aber auf seichtgründigen Standorten auf höhere Kalkauswaschung hin.

3.5.2 Nährstoffwirkung von Carbokalk

Carbokalk enthält neben Calciumcarbonat beträchtliche Mengen an weiteren Makronährstoffen und Spurenelementen. GUTSER (1983) und HAFNER und GUTSER (1998) weisen den im Carbokalk enthaltenen Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor und Magnesium) eine hohe Pflanzenverfügbarkeit nach. IRION (1988) berichtet, dass mit 10 t Carbokalk neben Kalk soviel Nährstoffe zusätzlich ausgebracht werden, dass bei einer mittleren Nährstoffversorgung des Bodens auf eine Düngung mit Phosphor und Magnesium verzichtet werden kann.

Nach AMBERGER und GUTSER (1982) und GUTSER (1983) eignet sich die Carbokalkanwendung besonders in Kombination mit einer Strohdüngung, da die Strohrotte schneller verläuft und der gedüngte **Stickstoff** biologisch fixiert und so vor Auswaschung geschützt wird. Weiters ist Carbokalk gut zur Krumenkalkung (Stabilisierung der Oberflächenstruktur von zur Verschlämmung neigender Böden) geeignet.

Der im Carbokalk enthaltene Stickstoff (0,3 bis 0,4 % i.d. Frischsubstanz) liegt nach AMBERGER und GUTSER (1982) sowie HAFNER und GUTSER (1998) vorwiegend in organischer Form vor. Er erwies sich in Gefäßversuchen (Bodenart sL, pH-Wert 5,2), unmittelbar zur Kultur (Weidelgras) ausgebracht, in seiner Wirkung dem N-Handelsdünger weitgehend ebenbürtig und damit pflanzenverfügbar (GUTSER 1983). Der Autor verweist jedoch auf die Abhängigkeit der N-Wirkung von Ausbringungszeitpunkt und Standortgegebenheiten. HAFNER und GUTSER (1998) zeigten, dass bei Applikation im Frühjahr unter optimalen Mineralisationsbedingungen eine ähnliche gute Wirkung wie mit mineralischen N-Düngern erreicht wird. MAYER und DERSCH (2008) stellten fest, dass u. a. durch die Verwendung von Carbokalk neben einer Steigerung des pH-Wertes auch die Stickstoffnachlieferung deutlich erhöht werden konnte.

Zur **Phosphor**-Wirkung von Carbokalk (P₂O₅-Gehalt 0,6 bis 1,4 % i.d. Frischsubstanz) berichten AMBERGER und GUTSER (1982) sowie GUTSER (1983) von einem Gefäßversuch zu Grünmais. Das zugeführte Phosphat zeigte eine Ausnutzungsrate von 30 %. Damit werden etwa 75 % der Wirkung von Dicalciumphosphat auf Basis gleicher P-Mengen erreicht. Die Autoren vermuten, dass die geringere P-Wirkung auf die durch die Carbokalkanwendung erhöhten pH-Werte zurückzuführen ist.

WERNER und SOLLE (1984) zeigten anhand eines Gefäßversuches, dass die Düngerwirkung des Phosphats im Carbokalk unter praktischen Bedingungen mit derjenigen aufgeschlossener Phosphatdüngemittel (Rhenaniaphosphat) vergleichbar ist. In diesem Versuch wurde eine P-Wirksamkeit von 18 % bei Mais und Alexandrinerklee erreicht. Nach Angaben der Autoren lässt die hohe Citrat- bzw. Citronensäurelöslichkeit des Phosphats im Carbokalk (>90 %) ein hohe P-Wirkung erwarten.

Nach WERNER und SOLLE (1984) sowie HAFNER und GUTSER (1998) liegt das im Carbokalk enthaltene Phosphat vorwiegend als Dicalciumphosphat vor. Diese Phosphatform ist nur bedingt wasserlöslich. Der Großteil des Phosphats im Carbokalk ist in verschieden Säuren löslich. Das Löslichkeitsverhalten des Phosphats im Carbokalk zeigen die Analysenergebnisse des Bundesamtes und Forschungszentrums für Landwirtschaft Wien (BFL 1999).

Tabelle 2: Phosphat-Löslichkeit von Carbokalk (BFL 1999)

	% im Original
P ₂ O ₅ wasserlöslich	0,02
P ₂ O ₅ verfügbar (CAL)	0,05
P ₂ O ₅ ameisensäurelöslich	1,43
P ₂ O ₅ citronensäurelöslich	1,17
P ₂ O ₅ neutralammomcitratlöslich	1,40
P ₂ O ₅ mineralsäurelöslich	1,50

Nach dem Österreichischen Düngemittelgesetz 1994 gibt der Gehalt an wasserlöslichen Nährstoffen die auf allen Standorten rasch und gut pflanzenverfügbaren Nährstoffmengen eines Düngemittels wieder. Neutralammomcitratlöslich sind jene Nährstoffe, die zwar langsam aber gut pflanzenverfügbar sind. Ameisensäurelösliche Nährstoffe sind langsam und nur auf sauren Standorten gut verfügbar.

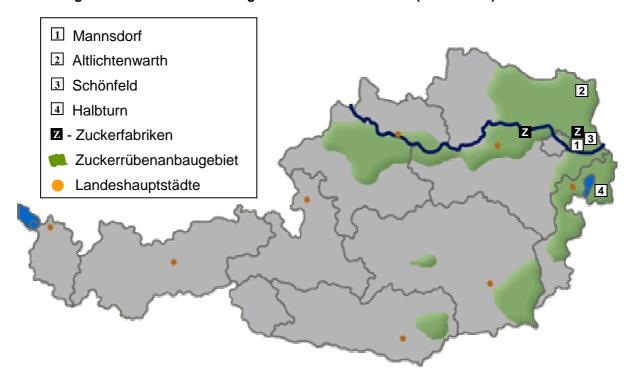
4 MATERIAL UND METHODEN

4.1 Material

4.1.1 Untersuchungsgebiet

Die Auswahl der Versuchsstandorte erfolgte im Einzugsgebiet der Zuckerfabriken (Abbildung 3). Im Osten Österreichs, unter pannonischen Klimabedingungen, befinden sich etwa zwei Drittel der Zuckerrübenanbaufläche Österreichs. Die vorherrschenden Bodentypen in diesem Zuckerrübenanbaugebiet sind entsprechend der internationalen Nomenklatur *Luvic* und *Haplic Chernozems*, *Haplic* und *Calcaric Phaeozems* sowie *Eutric Cambisols* (CEC 1985).

Abbildung 3: Österreichkarte mit Lage der Versuchsstandorte (ÖZVG 2002)



4.1.1.1 Versuchsstandorte

Die Auswahl der Versuchsstandorte erfolgte entsprechend den Ergebnissen der österreichischen Bodenkartierung. Die Grundlage bildeten die Bodenbeschreibungen des Untersuchungsgebietes. Entscheidend war der unterschiedlich hohe Kalkgehalt. Die ausgewählten Standorte schließen unterschiedliche Bodentypen, -arten und chemische Eigenschaften ein. Wie in den Tabellen 3 bis 6 (Seiten 29 bis 33) angeführt, zeichnen sich die Referenzprofile zu den ausgewählten Standorten durch pH-Werte zwischen 7,2 und 7,7 in der obersten Bodenschicht aus. Die Kalkgehalte erstrecken sich von "niedrig" bis "sehr hoch".

Entsprechend dieser Beschreibungen sind die Böden der Standorte Mannsdorf und Altlichtenwarth tiefgründig und von mittlerer Bodenschwere, in Schönfeld und Halbturn sind sie mittelgründig und als leicht einzustufen. Der natürliche Bodenwert dieser Böden entspricht mittel- bis hochwertigem Ackerland. Die Humusverhältnisse werden als schwachbis mittelhumos eingestuft, die Humusform ist Mull. Die Wasserverhältnisse reichen von trocken über mäßig trocken bis gut versorgt. Die Böden auf den Standorten Mannsdorf und

Altlichtenwarth besitzen mäßige Speicherkraft und Durchlässigkeit. Auf den Standorten Schönfeld und Halbturn liegen Böden mit geringer Speicherkraft und hoher Durchlässigkeit vor.

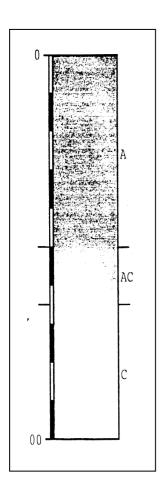
4.1.1.1.1 Versuchsstandort Mannsdorf

Kartierungsbereich 7, Gr. Enzersdorf; Bodenform 19 (Österreichische Bodenkartierung 1993)

Mannsdorf liegt zentral im Marchfeld und gehört zum Landschaftsraum "*Praterterrasse*" (145 bis 152 m Seehöhe), die im Norden durch den *Kleinen Wagram* und im Süden durch die *Donau* abgegrenzt wird.

In diesem Landschaftsraum liegt über einer Unterlage aus Tertiärsedimenten eine mächtige Schicht aus Donauschotter, darüber fluviatile Feinsedimente und weiters lößähnliche Sedimente. Auf diesem Ausgangsmaterial entstanden tiefgründige, tiefkrumige und mit Wasser gut versorgte Tschernoseme von mittlerer Schwere, die einen sehr hohen Kalkgehalt aufweisen.

Abbildung 4: Referenzprofil für den Standort Mannsdorf (Österreichische Bodenkartierung 1993)



Bodentyp und Ausgangsmaterial:

Tschernosem aus kalkhaltigen Feinsedimenten

Wasserverhältnisse:

mäßig trocken, mäßige Speicherkraft, mäßige Durchlässigkeit

Bodenart:

A- u. AC-Horizont: IU, sL oder L C-Horizont: sU bis IU

Humusverhältnisse:

A-Horizont mittelhumos; Mull
C-Horizont schwach humos; Mull

Natürlicher Bodenwert:

Hochwertiges Ackerland

Tabelle 3: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Mannsdorf (Österreichische Bodenkartierung 1993)

Tiefe	Ton-Gehalt	Humus (Walkley)	Kalk (Scheibler)	рН
cm	%	%	%	CaCl ₂
15	21	2,6	14,3	7,3
40	24	2,3	24,2	7,4
60	23	0,8	38,6	7,7
80	11	0,3	30,7	7,9

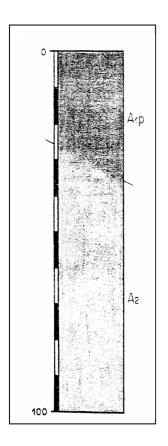
4.1.1.1.2 Versuchsstandort Altlichtenwarth

Kartierungsbereich 146, Poysdorf; Bodenform 78 (Österreichische Bodenkartierung 1997)

Der Versuchsstandort liegt im Nordosten Niederösterreichs, zwischen *Thaya* im Osten und *Laaer Becken* im Westen. Dieses bedeutende Ackerbaugebiet wird dem *inneralpinen-karpatischen Wiener Becken* zugeordnet.

Dieser Landschaftsraum "Hügelland und Höhere Terrassen" wird von Tertiärem Untergrund und von mächtigen Lößschichten bedeckt. Der Standort liegt in einer weitläufigen Mulde, der vorliegende Bodentyp ist ein kalkhaltiges Kolluvium mit einheitlichem Profilaufbau.

Abbildung 5: Referenzprofil für den Standort Altlichtenwarth (Österreichische Bodenkartierung 1997)



Bodentyp und Ausgangsmaterial:

kalkhaltiges Kolluvium aus abgeschwemmtem Krumenmaterial

Wasserverhältnisse:

gut versorgt, mäßige Speicherkraft, mäßige Durchlässigkeit

Bodenart: *IU*

Humusverhältnisse:

A1p-Horizont mittelhumos; Mull

A2-Horizont mittel bis schwach humos; Mull

Natürlicher Bodenwert:

Hochwertiges Ackerland

Tabelle 4: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Altlichtenwarth (Österreichische Bodenkartierung 1997)

Tiefe	Ton-Gehalt	Humus (Walkley)	Kalk (Scheibler)	рН
cm	%	%	%	CaCl ₂
15	20	2,2	9,0	7,5
70	20	1,8	9,2	7,6

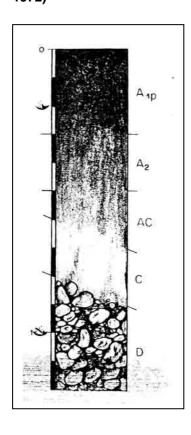
4.1.1.1.3 Versuchsstandort Schönfeld

Kartierungsbereich 6, Marchegg; Bodenform 44 (Österreichische Bodenkartierung 1972)

Schönfeld liegt im Landschaftsraum "Gänserndorfer Terrasse" (160 bis 170 m Seehöhe), der ebenfalls dem Marchfeld zuzuordnen ist. Im Norden grenzt der Große Wagram das Marchfeld gegen das tertiäre Hügelland ab und im Süden bildet der Kleine Wagram die Grenze gegen die tiefer liegende Praterterrasse. Im Osten wird diese Terrasse von der March begrenzt.

Auf der Gänserndorfer Terrasse lagert über den Tertiärsedimenten ein bis zu zehn Meter mächtiger Schotterkörper. Am vorliegenden Standort liegen darüber lößähnliche Sedimente, die von Kalksanden durchsetzt sind und eine Mächtigkeit von etwa 0,6 bis 0,9 m aufweisen. Darauf entstanden tiefgründige, tiefkrumige, aber trockene kalkhaltige Tschernoseme leichter Bodenart.

Abbildung 6: Referenzprofil für den Standort Schönfeld (Österreichische Bodenkartierung 1972)



Bodentyp und Ausgangsmaterial:

Tschernosem aus Flugsand

Wasserverhältnisse:

trocken, geringe Speicherkraft, hohe Durchlässigkeit

Bodenart:

A1p-Horizont IS, uS oder IU
A2-, AC-,C-Horizont IS, uS oder S

Humusverhältnisse:

A1p-,A2-Horizont schwach bis mittelhumos; Mull

AC-Horizont schwach humos; Mull

Natürlicher Bodenwert:

Mittelwertiges Ackerland

Tabelle 5: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Schönfeld (Österreichische Bodenkartierung 1972)

Tiefe	Ton-Gehalt	Humus (Walkley)	Kalk (Scheibler)	рН
cm	%	%	%	KCI
10	10	1,5	0,8	7,2
45	12	1,3	0,4	7,3
75	8	0,7	0,3	7,4
90	4	0,2	13.0	7,9

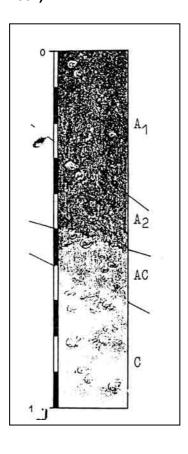
4.1.1.1.4 Versuchsstandort Halbturn

Kartierungsbereich 90, Neusiedl am See Mitte; Bodenform 15 (Österreichische Bodenkartierung 1982)

Halbturn liegt im Landschaftsraum "Niederungen auf der Seewinkelterrasse", der im Norden durch den Wagram gegen die "Parndorfer Platte" abgegrenzt wird und gehört zu den Gebieten mit der niedrigsten Seehöhe Österreichs.

Kalkhaltiges Schwemmmaterial und Löß bilden in diesem Landschaftsraum das Ausgangsmaterial der Böden. Der Bodentyp am Versuchsstandort entspricht einem tiefkrumigen, mittelgründigen, trockenen Tschernosem aus feinem, sandigem Löß.

Abbildung 7: Referenzprofil für den Standort Halbturn (Österreichische Bodenkartierung 1982)



Bodentyp und Ausgangsmaterial:

Tschernosem aus vorwiegend feinem, sandigem Lockermaterial

Wasserverhältnisse:

trocken, geringe Speicherkraft, hohe Durchlässigkeit

Bodenart:

A1-,A2-Horizont IS oder sL

AC-,C-Horizont IS

Humusverhältnisse:

A1-,A2-Horizont mittelhumos; Mull

AC-,C-Horizont schwach humos; Mull

Natürlicher Bodenwert:

Mittel- bis hochwertiges Ackerland

Tabelle 6: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Halbturn (Österreichische Bodenkartierung 1982)

Tiefe	Ton-Gehalt	Humus (Walkley)	Kalk (Scheibler)	рН
cm	%	%	%	KCI
20	14	2,2	6,8	7,7
45	15	2,0	5,0	7,8
60	11	0,6	30,3	7,9
90	9	0,5	33,6	8,2

4.1.1.2 Klima und Witterung der Versuchsstandorte

Die ausgewählten Produktionsgebiete liegen im pannonischen Klimagebiet. Dieses Ackerbaugebiet zeichnet sich durch geringe Niederschlagsmengen (500 bis 700 mm/Jahr) und Jahresdurchschnittstemperaturen von 9,1 bis 9,7 ℃ aus. Weiters durch

Temperaturextreme, die im Winter bis zu -25 ℃ und im Sommer bis zu 40 ℃ ansteigen. In den Monaten April bis August fallen etwa 50 % der Gesamtniederschläge.

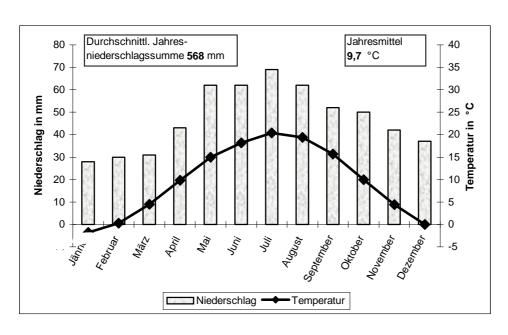
4.1.1.2.1 Versuchsstandort Mannsdorf

Tabelle 7 zeigt die Niederschlagsverteilung am Standort Mannsdorf während der Versuchsjahre. Negative Abweichungen zum langjährigen Mittel sind besonders in den Jahren 1992 und 1997 festzustellen, mehr Niederschläge fielen nur im Jahr 1996. Im langjährigen Mittel weist dieser Standort die höchste mittlere Jahrestemperatur auf (9,7 ℃).

Tabelle 7: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 am Standort Mannsdorf

Jahr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	ΧI	XII	Σ
1992	12	14	73	29	19	76	48	4	32	55	51	30	443
1993	27	19	13	20	9	75	91	79	29	61	47	54	524
1994	35	9	17	66	43	55	53	31	65	58	51	33	516
1995	23	31	47	40	36	97	53	51	147	5	51	33	614
1996	57	33	19	99	77	69	28	63	64	29	18	9	564
1997	19	7	49	23	55	72	158	19	23	29	18	9	481
1998	14	1	19	14	37	52	92	39	118	64	46	23	519
1999	8	38	24	67	55	83	61	55	63	15	51	45	564
Ø													568

Abbildung 8: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Mannsdorf , Messstelle Groß Enzersdorf



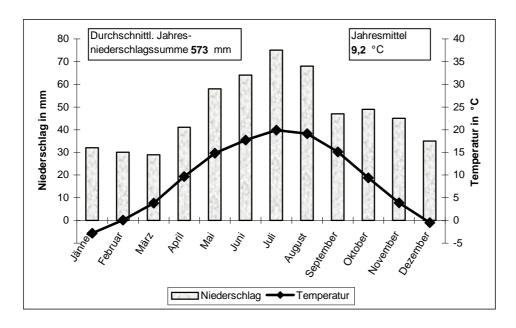
4.1.1.2.2 Versuchsstandort Altlichtenwarth

Aus der Tabelle 8 ist ersichtlich, dass die Niederschlagsmengen nur in den Jahren 1997 und 1998 dem langjährigen Mittel entsprachen. In den Jahren 1992 bis 1994 und 1999 lagen die Niederschläge darunter, in den Jahren 1995 und 1996 darüber.

Tabelle 8: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 am Standort Altlichtenwarth

Jahr	I	II	Ш	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	ΧI	XII	Σ
1992	14	11	67	35	16	70	40	17	48	57	45	33	453
1993	17	25	17	12	34	61	92	87	34	45	30	43	497
1994	25	9	28	69	68	39	52	43	17	38	26	34	448
1995	24	29	44	55	47	96	30	77	124	11	42	47	626
1996	40	19	19	79	91	85	58	83	61	41	25	24	625
1997	13	13	28	20	72	51	188	52	16	19	97	37	579
1998	22	8	30	29	32	106	50	47	133	100	23	17	597
1999	14	31	22	45	52	88	110	28	31	13	43	30	507
Ø													573

Abbildung 9: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Altlichte nwarth, Messstelle Wilfersdorf



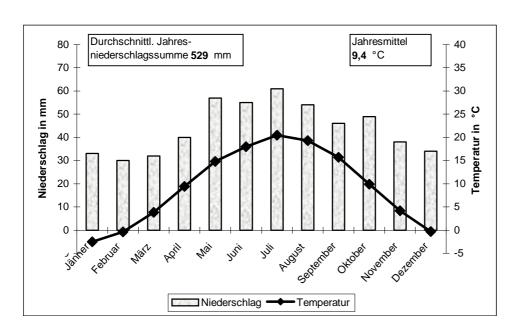
4.1.1.2.3 Versuchsstandort Schönfeld

Auf diesem Standort liegen die Niederschläge im langjährigen Mittel etwas niedriger als in Mannsdorf und Altlichtenwarth. Im Versuchszeitraum waren die Niederschlagsmengen z.T. jedoch deutlich höher als auf den o.g. genannten Standorten (z. B. 1995).

Tabelle 9: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 am Standort Schönfeld

Jahr	I	П	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Χ	ΧI	XII	Σ
1992	16	14	77	20	19	97	38	3	36	55	62	42	479
1993	25	11	22	20	15	50	99	68	33	71	36	50	500
1994	26	9	31	70	47	61	61	40	45	60	44	39	533
1995	17	35	53	68	54	133	35	72	136	6	54	42	705
1996	37	22	14	96	105	87	34	71	65	36	20	16	603
1997	7	13	50	26	67	69	226	13	19	23	76	37	626
1998	23	2	24	21	46	55	92	46	131	98	30	24	592
1999	11	37	25	70	62	97	76	70	55	22	43	40	608
Ø	·												529

Abbildung 10: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Schönfeld , Messstelle Obersiebenbrunn



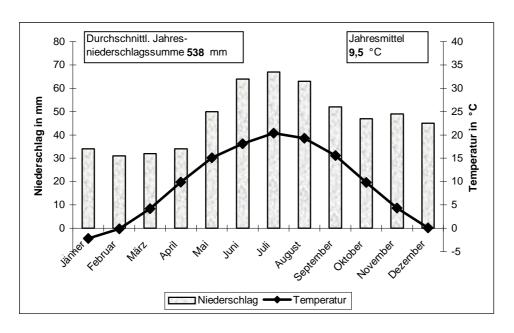
4.1.1.2.4 Versuchsstandort Halbturn

Die Tabelle 10 zeigt, dass auch am Standort Halbturn im Versuchszeitraum die Niederschläge deutlich über dem langjährigen Mittel lagen, besonders in den Jahren 1994 bis 1996. Nur im Jahr 1999 entsprachen die Niederschläge dem langjährigen Mittel.

Tabelle 10: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 am Standort Halbturn

Jahr	I	П	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Х	ΧI	XII	Σ
1992	28	27	77	21	22	92	20	3	55	67	97	71	577
1993	36	9	30	11	26	91	69	42	37	82	88	56	594
1994	41	11	41	88	103	60	53	43	30	85	51	31	634
1995	18	48	65	64	41	132	2	34	113	11	54	52	659
1996	68	16	14	83	104	61	54	74	123	25	16	18	654
1997	9	11	61	45	79	52	137	37	18	31	69	45	592
1998	14	1	24	36	39	39	131	50	129	74	40	22	597
1999	12	40	20	51	48	72	90	54	28	25	58	38	535
Ø													538

Abbildung 11: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Halbturn, Messstelle Andau



4.1.2 Versuchsanlage

Die Feldversuche wurden als Dauerversuche konzipiert und im Jahr 1991 als Blockanlage mit fünf (Mannsdorf und Schönfeld) bzw. mit vier (Altlichtenwarth und Halbturn) Wiederholungen angelegt. Die Parzellengröße betrug jeweils 80 m² (8 x 10 m in Mannsdorf, Schönfeld und Halbturn, 6 x 13,3 m in Altlichtenwarth). Auf jedem Standort wurde über fünf Jahre Carbokalk entsprechend den in **Tabelle 11** angeführten Mengen ausgebracht.

Tabelle 11: Im Feldversuch ausgebrachte Carbokalkmengen in t/ha

	1991 – 1995 jährlich	in Summe
	ausgebrachte Carbokalkmenge	ausgebrachte Carbokalkmenge
	t/ha	t/ha
Variante 1 (V1)	0	0
Variante 2 (V2)	15	75
Variante 3 (V3)	30	150
Variante 4 (V4)	60	300

Durch die wiederholt überhöhte Carbokalkausbringung wurden extrem hohe Kalkfrachten je Hektar erreicht. Diese hohen Mengen sollten die Auswirkungen einer langjährigen Carbokalkzufuhr auf kalkreichen Standorten aufzeigen. In Bezug auf eine praxisübliche Düngung in der Höhe von max. 10 t/ha und Jahr entspricht die in Summe ausgebrachte Carbokalkmenge in der Höchstvariante einer jährlichen Anwendung dieser Menge über 30 Jahre. Während der ersten fünf Versuchsjahre wurde nur Carbokalk gedüngt. Es erfolgte keine zusätzliche Düngung mit Stickstoff, Phosphor oder Kalium.

Nach der Periode der Carbokalkzufuhr (1991 bis 1995) wurde auf den Versuchsstandorten eine ertragsbezogene Stickstoffdüngung durchgeführt, jedoch ohne Phosphor und Kalium zu düngen.

Die Kulturartenverteilung war je nach Standort betriebsbedingt unterschiedlich. Ab Sommer 1998 wurde die Versuchsfläche nach einheitlichen Vorgaben mit Weizen bestellt. Die Bodenbearbeitung sowie die Kultur- und Pflegemaßnahmen erfolgten standortüblich. Auf den Standorten Mannsdorf, Schönfeld und Halbturn bestand die Möglichkeit zur Beregnung, die betriebsüblich eingesetzt wurde. Tabelle 12 zeigt die Fruchtartenverteilung der einzelnen Standorte auf.

Tabelle 12: Kulturartenverteilung der Versuchsstandorte von 1992 bis 1999

	Mannsdorf	Altlichtenwarth	Schönfeld	Halbturn
1992	Zuckerrübe	Winterweizen	Kartoffel	Winterweizen
1993	Buschbohne	Körnererbse	Winterweizen	Zuckerrübe
1994	Winterweizen	Winterweizen	Zuckerrüben	Saatmais
1995	Grünerbse	Zuckerrüben	Winterweizen	Saatmais
1996	Zuckerrübe	Sommergerste	Sonnenblume	Brache
1997	Saatmais	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen
1998	Buschbohne	Sommergerste	Kartoffel	Saatmais
1999	Winterweizen	Winterweizen	Sommerweizen	Winterweizen

In der "Aufdüngungsphase" und in der zweiten Phase nach der Anwendung von Carbokalk wurden für die jeweiligen Kulturen Ertrags- sowie Qualitätsparameter ermittelt. Begleitend wurden Bodenproben gezogen.

Die abschließenden Untersuchungen im Jahr 1999 umfassten die Ermittlung der Erträge und ausgewählter Qualitätsparameter sowie eine Beurteilung des Bodennährstoffhaushaltes. Zusätzlich wurden eine Zwischenernte und Nährstoffanalyse des Pflanzenaufwuchses durchgeführt. Die Messungen bezüglich des Eindringwiderstandes, der hydraulischen Leitfähigkeit und der Durchwurzelung erfolgten in den Monaten Mai bis August des Jahres 1999. Die Bewirtschaftungsdaten für das Jahr 1999 sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Versuchsrelevante Managementmaßnahmen bei Weizen 1999

	Mannsdorf	Altlichtenwarth	Schönfeld	Halbturn
Vorfrucht 1998	Buschbohne	Sommergerste	Kartoffel	Saatmais
Stoppelsturz	Grubber (2x)	Grubber (2x)		Grubber (1x)
Bodenbearbeitung	Pflug, 25cm	Pflug, 25 cm	Pflug, 27 cm	Pflug, 25 cm
Kultur 1999	Winterweizen	Winterweizen	Sommerweizen	Winterweizen
Bodenvorbereitung	Saatbett- Kombination	Kreiselegge	Saatbett- Kombination	Saatbett- Kombination
Saat	12. 10. 1998	08. 11. 1998	14. 03. 1999	22. 10. 1998
Sorte	Capo	Capo	Helidur	Victo
Düngung	110 kg N/ha	130 kg N/ha	110 kg N/ha	130 kg N/ha
Ernte	17. 07. 1999	28. 07. 1999	17. 07. 1999	17. 07. 1999

4.1.3 Ertragsermittlung und Probenziehung

4.1.3.1 Allgemeine Untersuchungen 1992 bis 1999

In Abhängigkeit von Parzelle und Kultur wurden 8 bis 10 m², in Einzelfällen bis zu 20 m² beerntet. Bei Getreide wurden Frisch- und Trockenmasseerträge zwischen Milch- und Vollreife ermittelt. Zum Teil wurde neben dem Ertrag des Erntegutes auch der Gesamtpflanzenertrag erhoben. Der Ertrag des Bracheaufwuchses wurde durch mehrmaligen Grünschnitt festgestellt. Von Erntegut und Gesamtpflanzen wurde der Gehalt an Gesamtstickstoff erfasst. Bei Zuckerrüben wurden die Rüben- und Zuckererträge, großteils auch die Blatterträge, bei Kartoffel die Knollenerträge und bei Sonnenblume sowie Saatmais die Ganzpflanzenerträge erfasst. Die Ertragsfeststellung bei diesen Kulturen erfolgte zum üblichen Erntetermin. Ausgewählte Qualitätsparameter bei Zuckerrübe waren Zuckergehalt und Gehalte an α-Aminosäure-Stickstoff, bei Kartoffel der Stärkegehalt.

4.1.3.2 Ergänzende Untersuchungen im Jahr 1999

Im Stadium EC 50 bis 60 erfolgte auf Teilflächen jeder Parzelle (0,75 m²) eine Zwischenernte. Die Frisch- und Trockenmasse wurde aus einem Mischmuster bestimmt. Repräsentative Proben wurden auf den Gehalt an Makro- und Mikronährstoffen (P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn und B) untersucht.

Die Ertragsstruktur wurde unmittelbar vor der Ernte in Kleinparzellen (1 m²) variantenbezogen - jedoch nur in einer Wiederholung - ermittelt. Die gewonnenen Gesamtpflanzen wurden verwogen und anschließend die Zahl der *ährentragenden Halme* bestimmt. Die *Wuchshöhe* bis zum Ährenansatz wurde von jeweils 100 Pflanzen gemessen. Die Ähren wurden von den Halmen getrennt, in einem Einzelährendrescher gedroschen und das Korngewicht sowie das Tausend-Korn-Gewicht (TKG) bestimmt. Am Standort Altlichtenwarth konnte keine Kleinparzellenernte durchgeführt werden, da die gesamte Nettofläche für die Messungen der bodenphysikalischen Parameter sowie zum Mähdrusch benötigt wurde.

4.1.4 Bodenprobenahme

Die Ziehung von Bodenproben aus dem Oberboden (0 bis 30 cm Tiefe) und aus dem Unterboden (30 bis 60 cm Tiefe) erfolgte nach Ende der Aufdüngungsphase in der 13. Kalenderwoche und zum Abschluss der Untersuchungen im Jahr 1999 in der neunten Woche. Es wurde jeweils etwa 1 kg Probenmaterial je Tiefe als Mischmuster über alle Wiederholungen mit einem Pürkhauer-Bohrstock gewonnen.

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit und des Eindringwiderstandes erfolgte unter relativ trockenen Bedingungen in den Monaten Mai und Juni 1999. Die Durchwurzelung der Krume wurde großteils unter feuchteren Bodenverhältnissen Ende Juni/Anfang Juli bestimmt. Bei feuchtem Boden war die Probenahme erheblich erleichtert. Eine Beprobung bei sehr trockenen Bedingungen war nicht möglich, da die Bohrkerne sofort nach der Entnahme zerfielen.

4.2 Methoden

4.2.1 Anpassung der Standortkartierung

Die Beschreibung der Böden der Versuchsflächen wurde anhand von Bohrstichen nach den Vorgaben der Österreichischen Bodenkartierung angepasst. Auf Basis einer Profilgrube wurde die Horizontabfolge neuerlich erstellt.

4.2.2 Pflanzenanalysen

Der Proteingehalt wurde mit einem Infrarot-Transmissionsspektroskop (INFRATEC) der Fa. TECATOR ermittelt, der Gesamtstickstoff mit einem Elementaranalysator der Firma LECO vom Typ CNS 2000. Die Gehalte an P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn und B wurden nach Nassaufschluss mit Salpeter- und Perchlorsäure auf einem ICP-AES bestimmt. Die Rübenproben wurden auf Zuckergehalt und α-Aminosäure-N analysiert (AGRANA 2005).

4.2.3 Bodenchemische Untersuchungen

4.2.3.1 Analysenmethoden

Tabelle 14: Normen zur Bestimmung ausgewählter bodenchemischer Parameter

Parameter	Untersuchung nach
pH – Wert	ÖNORM L 1083
Kalkgehalt	ÖNORM L 1084
Phosphor (CAL)	ÖNORM L 1087
Kalium (CAL)	ÖNORM L 1087
Austauschbare Kationen	ÖNORM L 1086
Mn, Cu, Zn, Fe	ÖNORM L 1089
Bor	ÖNORM L 1090
Humusgehalt	ÖNORM L 1081
Phosphor (H ₂ O)	ÖNORM L 1092

Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgte entsprechend der vom BUNDESMINISTERIUM für LAND- und FORTSWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSER (2006) herausgegebenen "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung"

Tabelle 15: Einstufung der Bodenreaktion und des Kalkgehalts entsprechend den "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006)

Parameter	Messbereich	Einstufung	
pH-Wert	< 4,6	stark sauer	
	4,6 – 5,5	sauer	
	5,6 - 6,5	schwach sauer	
	6,6 – 7,2	neutral	
	7,3 – 8,0	alkalisch	
	> 8,0	stark alkalisch	
Karbonat	< 1 %	gering	
	1 - 5 %	mittel	
	> 5,0 %	hoch	

Tabelle 16: Einstufung der Nährstoffgehalte entsprechend den "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006)

	Dodon	Versorgungsstufe					
Parameter	Boden- schwere	Α	В	С	D	E	
	Scriwere		den				
Phosphor		< 26	26 - 46	47 – 111	112 - 174	> 174	
Kalium	leicht	< 50	50 - 87	88 - 178	179 - 291	> 291	
	mittel	< 66	66 - 112	113 - 212	213 - 332	> 332	
Eisen		< 20		100		> 300	
Mangan		< 20		70		> 200	
Kupfer, Zink		< 2,0		8,0		> 20	
Bor	leicht	< 0,2		0,6		> 2,0	
	mittel	< 0,3		0,8		> 2,5	

4.2.4 Bodenphysikalische Messungen

Die Messungen zur Bestimmung des Eindringwiderstandes, der hydraulischen Leitfähigkeit und der Durchwurzelung erfolgten in repräsentativen Bereichen jeder Parzelle. Auf größtmögliche Homogenität des Pflanzenbestandes wurde geachtet. Aufgrund der gegebenen Streuung bodenphysikalischer Messungen wurde, wie aus Tabelle 17 ersichtlich, eine nach Möglichkeit hohe Anzahl an Einzelmessungen angestrebt. Je Standort und Variante wurden zum Eindringwiderstand 80 Einzelmessungen, zur Hydraulischen Leitfähigkeit 12 und zur Beurteilung der Durchwurzelung 32 Einzelaufnahmen durchgeführt.

Aufgrund zeitlicher Vorgaben wurden bei den Messungen des *Eindringwiderstandes* und der *hydraulischen Leitfähigkeit* die Varianten 1, 2 und 4 untersucht. Tabelle 17 zeigt die bearbeiteten Varianten sowie die Anzahl der Einzelmessungen je Parzelle bzw. Variante pro Standort.

Tabelle 17: Bearbeitete Varianten sowie Einzelmessungen je Parzelle bzw. Variante pro Standort

	Eindring-	Hydr.	Wurzel-	
	widerstand	Leitfähigkeit	Untersuchungen	
Variante	1	1	1	
	2	2	2	
	-	-	3	
	4	4	4	
Einzelmessungen je	20	3	8	
Parzelle	20	3	0	
Einzelmessungen je	80	12	32	
Variante	60	12	32	

4.2.4.1 Eindringwiderstand

Der Eindringwiderstand wurde mit einem Penetrometer der Firma IRVINE Ltd. - entsprechend dem Standard der American Society of Agricultural (ASAE-Standard (1985)) - von 3,5 bis 52,5 cm Tiefe gemessen. Auf den Standorten Schönfeld und Halbturn war die Messtiefe aufgrund des Steinbesatzes mit 30 cm begrenzt. Je Parzelle wurden mit Hilfe einer Schablone 2 x 10 Einzelmessungen durchgeführt. Der Abstand innerhalb einer Messreihe betrug 10 cm, zwischen den Messreihen 20 cm.

Abbildung 12: Schablone zur Messung des Eindringwiderstandes

	Messpunkt								
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	o	0	0	0	0	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Messpunkt								

Der Eindringwiderstand hängt wesentlich vom Wassergehalt des Bodens ab (GARDNER 1972, LIEBHARD et al. 1995). Daher wurde gleichzeitig eine gravimetrische Wassergehaltsbestimmung je Parzelle durchgeführt. Die Proben an jeder Messstelle wurden aus den Tiefen 0 bis 10, 10 bis 20, 20 bis 30, 30 bis 40 und 40 bis 50 cm entnommen.

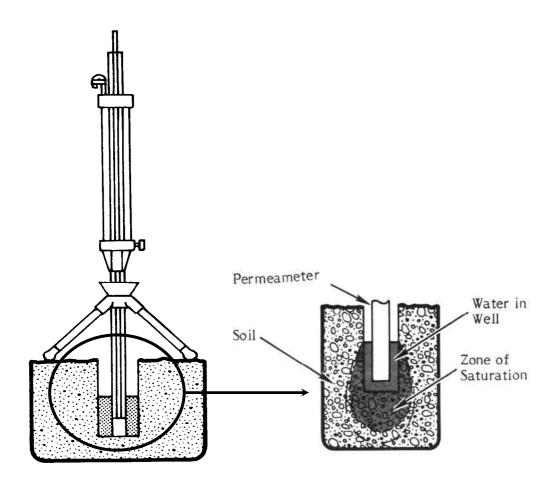
4.2.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde bei Feldsättigung mit einem GUELPH – Permeameter der Firma SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. bestimmt. Die Methode ist bei REYNOLDS et al. (1985) beschrieben. Da es sich um punktförmige Aufnahmen handelt, wurden innerhalb einer Parzelle drei Bestimmungen vorgenommen.

Das Gerät ist ein so genanntes "in-hole constant-head" – Permeameter, das nach dem Mariotte – Siphon – Prinzip arbeitet. Nach diesem Prinzip ist in einem Bohrloch immer ein gleich bleibender Wasserpegel gewährleistet. Sickert Wasser aus dem Bohrloch in den umliegenden Boden, fließt Wasser aus dem Vorratsbehälter nach bis der ursprüngliche Wasserpegel wieder erreicht ist. Die Höhe des Wasserstandes im Bohrloch wird durch das Niveau des Luftrohrs eingestellt.

Bei den vorliegenden Untersuchungen ist das Bohrloch etwa 15 bis 16 cm tief und weist einen Durchmesser von 6 cm auf. Der Wasserausfluss aus dem Permeameter in den Boden wird durch das Absinken des Wasserspiegels im Vorratsbehälter des Gerätes angezeigt. Mit zunehmender Wassermenge, die in den umgebenden Boden versickert, wird dieser allmählich gesättigt (**Abbildung 13**). Die Form und Größe der Sättigungszone ist abhängig vom Bodentyp, Bohrlochradius und dem Wasserniveau im Bohrloch.

Abbildung 13: GUELPH-Permeameter



Nach der vom Hersteller empfohlenen Standardprozedur wird jeweils nach zwei Minuten jene Wassermenge, die in den Boden sickert, festgehalten (abgelesen in cm Wassersäule/120 sec). Der Zustand der Feldsättigung des Bodens ist dann erreicht, wenn in drei direkt aufeinander folgenden Zeitintervallen dieselbe Wassermenge versickert.

Für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit wird dieser Vorgang bei zwei verschieden hohen Wasserniveaus in einem Bohrloch durchgeführt (standardmäßig bei fünf und bei zehn Zentimeter Wasserpegelhöhe im Bohrloch).

Bei <u>Sättigung unter Feldbedingungen</u> ist das Porensystem des Bodens nicht nur mit Wasser, sondern auch mit Luft gefüllt. Daher spricht man bei der vorliegenden Messmethode von der "hydraulischen Leitfähigkeit bei Feldsättigung (K_{fs})"

Abbildung 14: GUELPH-Permeameter (links), Werkzeug zur Herstellung des Bohrlochs (rechts)





4.2.4.3 Wurzeluntersuchungen

Zur Bestimmung eines relativen Maßes wurden mit einem Bohrer der Firma EIJKELKAMP Bohrkerne mit einer Höhe von 15 cm und einem Durchmesser von 10 cm entnommen. Die Bohrkerne wurden in der Mitte gebrochen und die an den beiden entstandenen Bruchflächen herausragenden Wurzeln gezählt. Da längere Wurzeln bei festem Boden abreißen bzw. bei lockerem Boden aus einer der beiden Bruchflächen herausgezogen werden, wurden Wurzeln, die weiter als 1 cm aus der Bruchfläche herausragten, doppelt gezählt. Die Anzahl der Wurzeln wurde in den Tiefen 7 und 22 cm erfasst. Die Untersuchungen wurden je Parzelle achtfach wiederholt.

Abbildung 15: EIJKELKAMP – Bohrer zur Entnahme der Bohrkerne



4.2.5 Datenerfassung

4.2.5.1 Statistische Auswertungen

Die varianzanalytische Verrechnung der Ergebnisse wurde mit dem Programm SPSS 8.0 vorgenommen. Die Beurteilung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten erfolgte mittels Student-Newman-Keuls-Test auf einem Signifikanzniveau von α = 0,05.

5 Ergebnisse

5.1 Standortkartierung

Die Aufnahmen am Standort **Mannsdorf** bestätigen die Angaben der österreichischen Bodenkartierung für die Wiederholungen C und D. Die Mächtigkeit des A-Horizontes betrug 55 cm, der C-Horizont begann in 70 cm Tiefe. Abweichend hiervon zeigte sich in den Wiederholungen A und B der A-Horizont mit 85 cm etwas mächtiger, der C-Horizont begann bei 95 cm Tiefe. Tab. 18 charakterisiert die beiden geöffneten Profile; Übergänge bleiben hierbei unberücksichtigt.

Tabelle 18: Profilaufbau am Versuchsfeld Mannsdorf (nach Bohrstich, Mai 1999)

Wiederholung	Wiederholung		
A und B	C und D		
Tiefe cm	Tiefe cm	Horizont	Bodenart
0 – 25	0 – 25	A1 _p	IU
25 – 85	25 – 55	A2	IU
85 – 95	55 – 70	AC	IU
> 95	> 70	С	sU

Abbildung 16: Profilaufbau am Versuchsfeld Mannsdorf, Mai 1999



Die Bodenart ist "lehmiger Schluff" (IU). Alle Aufnahmen zeigten das für Tschernoseme typische Merkmal, die Pseudomycelbildung durch ausgefälltes CaCO₃. Im Oberboden (bis zu 30 cm Bodentiefe) lag der Boden in krümeliger Struktur vor. Darunter zeigte sich eine Pflugsohle. Hier lag eine scharfkantige, blockige Struktur vor.

Das am Standort **Altlichtenwarth** vorliegende Kolluvium deckte sich betreffend Horizontierung (Tabelle 19) und Homogenität zur Gänze mit den Befunden der Österreichischen Bodenkartierung. Abweichend hiervon wurde der Boden Auf der Versuchsfläche als "schluffiger Lehm" (uL) und hiermit als etwas schwerer eingestuft. Der A2-Horizont zeigte in einer Tiefe von 50 bis 70 cm Pseudomycelbildung auf. Auch auf diesem Standort war in einer Tiefe von etwa 35 cm eine dichtere Lagerung des Bodens erkennbar.

Tabelle 19: Profilaufbau am Versuchsfeld Altlichtenwarth (nach Bohrstich, Mai 1999)

Tiefe cm	Horizont	Bodenart
0 – 25	A1 _p	uL
> 25	A2	uL

Abbildung 17: Profilaufbau am Versuchsfeld Altlichtenwarth, Mai 1999



Am Versuchsfeld am Standort **Schönfeld** war im Gegensatz zu den Erhebungen der Österreichischen Bodenkartierung kein AC-Horizont ausgebildet (Tabelle 20). Im A2-Horizont war Pseudomycelbildung feststellbar. Der D-Horizont wies einen hohen Grobanteil aus Schotter und Kies auf. Die Oberkante dieses Horizonts schwankt innerhalb des Versuchsfeldes zwischen 55 und 70 cm Tiefe. Der der Bodenbildung zugrunde liegende Flugsand definiert die Bodenart als "lehmiger Sand" (IS). Der Boden wies auf diesem Standort kaum Struktur auf.

Tabelle 20: Profilaufbau am Versuchsfeld Schönfeld (nach Bohrstich, Mai 1999)

Tiefe cm	Horizont	Bodenart
0 – 25	A1 _p	IS
25 – 55(70)	A2	IS
> 55-70	D	

Abbildung 18: Profilaufbau am Versuchsfeld Schönfeld, Mai 1999



Hinsichtlich der Horizontierung ergaben sich für den Standort **Halbturn** wiederum keine Abweichungen zu den Angaben der Österreichischen Bodenkartierung. Aufnahmen am geöffneten Profil zeigten jedoch, dass bereits ab 40 cm Tiefe ein mäßiger Grobanteil sowie im AC- und C-Horizont ein mittlerer Grobanteil vorlag. Dieser war am Bohrstich nicht nachweisbar. Als Bodenart wurde "sandiger Lehm" (sL) bestätigt.

Tabelle 21: Profilaufbau am Versuchsfeld Halbturn (nach Bohrstich, Mai 1999)

Tiefe cm	Horizont	Bodenart
0 – 30	A1 _p	sL
30 – 55	A2	sL
55 - 65	AC	IS
> 65	С	sU

Abbildung 19: Profilaufbau am Versuchsfeld Halbturn, Mai 1999



Die geöffnete Profilgrube und die Untersuchungen mittels Schlagbohrer zeigten zwischen 0 bis 30 cm Tiefe ein kompaktes Gefüge. Konkrete Verdichtungen oder blockige Strukturen konnten in dieser Bodenschicht jedoch nicht gefunden werden. Erst in einer Tiefe von 30 bis 35 cm Tiefe war eine Dichtlagerung zu erkennen, die auf eine Pflugsohle hinweisen. Scharfkantige Aggregate waren jedoch nicht erkennbar.

5.2 Pflanzenwachstum und Ertrag

5.2.1 Ertragsverhalten in Abhängigkeit steigender Carbokalkdüngermengen (Tabelle 22)

Im ersten Jahr der Ausbringung von Carbokalk (1992) wurde am Standort Mannsdorf Zuckerrübe angebaut. Die zur Beurteilung der Gesamtfrischmasse notwendigen Blatterträge liegen für den Standort Mannsdorf jedoch nicht vor. Der *Rübenertrag* nahm mit zunehmenden Düngermengen an Carbokalk ab, die Unterschiede zwischen den Varianten waren jedoch nicht signifikant. Hingegen zeigte der Zuckerertrag statistisch absicherbare Reaktionen auf Carbokalk. Zwischen Variante 1 und 2 war zwar ein signifikanter Ertragsrückgang zu erkennen. Keine dieser Varianten unterschied sich jedoch von der Variante 3, da der Ertrag in dieser Variante wieder anstieg. In der Maximalvariante der Carbokalkdüngung war der Zuckerertrag wiederum signifikant niedriger als in den anderen Varianten.

Der Winterweizen am Standort Altlichtenwarth zeigte im ersten Jahr der Carbokalkdüngung keine signifikanten Ertragsreaktionen. Bis zu einer Carbokalkmenge von 30 t/ha blieben die Erträge auf konstantem Niveau. In der Maximalvariante lagen die Frisch- und Trockenmasseerträge in der Tendenz höher als in den niedrigeren Varianten.

Am Standort Schönfeld stand im ersten Versuchsjahr Kartoffel. Diese Kultur reagierte im *Knollenertrag* positiv auf die Carbokalkzufuhr. Ebenso nahm der infolge von Trockenheit sehr niedrige *Stärkeertrag* in der Tendenz mit zunehmenden Mengen an Carbokalk zu. Bei beiden Parametern waren im ersten Jahr der Düngung mit Carbokalk die Differenzen zwischen den Varianten jedoch zu gering, um signifikante Unterschiede feststellen zu können.

Im **zweiten Versuchsjahr (1993)** wurde nur der Standort Halbturn parzellenmäßig beerntet. Der Rüben- und Zuckerertrag verhalten sich in Abhängigkeit der Carbokalkzufuhr am Standort Halbturn gegensinnig zum Standort Mannsdorf (1992). Mit steigenden Carbokalkdüngermengen stieg erwartungsgemäß der *Gesamtpflanzenertrag*. Sowohl der *Rübenertrag* als auch der *Zuckerertrag* stiegen in der Tendenz von Variante 1 auf 2 an, blieben bei einer weiteren Erhöhung der Carbokalkmenge konstant (Variante 3) und erreichten in Variante 4 ein statistisch abgesichertes Maximum.

Im **dritten Jahr (1994)** der weiteren Zufuhr von Carbokalk konnten nur bei Zuckerrübe im Gesamtertrag (Blatt und Rübe) am Standort Schönfeld signifikante Ertragsreaktionen ermittelt werden. Der Rübenertrag reagierte zwar nicht signifikant auf die unterschiedlichen Mengen an Carbokalk, in der Tendenz waren jedoch zunehmende Rübenerträge bis zu Variante 3 erkennbar. Durch eine weitere Steigerung der Carbokalkmenge (Variante 4) wurde dieser nicht weiter erhöht. Der *Zuckerertrag* zeigte ähnliche Reaktion, wobei der Höchstertrag in der Variante 3 erreicht wurde.

Bei Winterweizen am Standort Mannsdorf und bei Saatmais am Standort Halbturn waren zwar leichte Zunahmen in den Erträgen der Gesamtpflanze erkennbar, jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

Die Grünerbse am Standort Mannsdorf im **vierten Versuchsjahr (1995)** reagierte in der Tendenz mit einer Ertragszunahme auf die steigenden Mengen an Carbokalk.

Am Standort Altlichtenwarth waren sowohl die *Rüben*- als auch die *Zuckererträge* in der Maximalvariante deutlich höher als in den Varianten 1, 2 und 3, die Ertragsunterschiede aufgrund der gegebenen Streuungen für eine statistische Absicherung waren aber zu gering.

Signifikante Reaktionen waren bei Winterweizen am Standort Schönfeld feststellbar. *Frischmasse*- als auch *Trockenmasseertrag* waren durch relativ große Schwankungen gekennzeichnet, dennoch konnte auch hier ein signifikanter Mehrertrag im Vergleich der Maximal- und der Nullvariante festgestellt werden. Im *Kornertrag* konnten zwischen den

Varianten 1, 2 und 3 keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Die Variante 4 zeichnete sich gegenüber den übrigen Varianten durch einen signifikant höheren Ertrag aus.

Der Saatmais reagierte am Standort Halbturn deutlich auf die Zufuhr von Carbokalk. Die Frischmasseerträge der Gesamtpflanze stiegen kontinuierlich an, unterschieden sich bis zur Variante 3 jedoch nicht signifikant. Erst in der Höchstvariante wurde ein signifikant abgesichertes Maximum erreicht.

Im fünften und letzten Jahr (1996) der Aufdüngung mit Carbokalk zeigte die Zuckerrübe am Standort Mannsdorf ein gegenüber dem Jahr 1992 gegensätzliches Reaktionsmuster. Sowohl in den Rüben- als auch in den Zuckererträgen waren die Unterschiede zwar nicht signifikant. Es zeigte sich jedoch, dass in den Varianten 2 und 3 die Erträge in der Tendenz höher waren als in der Null- und in der Carbokalk-Maximalvariante.

Bei Sommergerste am Standort Altlichtenwarth war eine signifikante Zunahme der Gesamttrockenmasse in jenen Varianten feststellbar, die mit Carbokalk gedüngt wurden. Die unterschiedliche Höhe der Gesamtdüngungsmenge an Carbokalk hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag. Der Frischmasseertrag zeigte die gleiche Reaktion, die jedoch aufgrund der geringeren Differenzen zwischen den Varianten nicht statistisch absicherbar war.

Am Standort Schönfeld konnte bei Sonnenblume aufgrund der großen Schwankungen zwischen den Varianten keine eindeutige Reaktion auf die Ausbringung von Carbokalk festgestellt werden.

Der Bracheaufwuchs am Standort Halbturn zeigte erwartungsgemäß nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten.

Tabelle 22: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn von 1992 bis 1996 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten)

ſ	Ma	nnsdorf			Α	Itlichte	enwart	:h		Schör	nfeld				Halbt	urn	
CK-	Frischmasse	Trock	enmas	se	Frischma	asse	Trocke	enmasse	Frischi	nasse	Trocke	masse	Fris	schm	asse	Trocken	masse
Gabe		kt Gesamt	Prod	lukt	Gesamt I	Produkt	Gesam	Produkt		Produkt	Gesamt	Produkt	Gesar	nt	Produkt	Gesamt	Produkt
t/ha	t/ha	t/ha	a		t/ha				t/ha		t/h	а		t/ha		t/ha	
								199	2								
		Zuckerrübe					nterweize				Kartoffel				Wi	nterweizen	
0	91,70		14,98	а		24,74 a		5,92 a		23,87 a		3,40 a					
15	87,63		13,98	b		24,17 a		6,07 a		29,55 a		3,80 a					
30	87,10		14,41	b a		24,78 a		5,99 a		30,17 a		4,18 a					
60	84,00	а	13,08	С		26,36 a		6,42 a		33,60 a		4,72 a					
								199	3								
		Buschbohne	:			Kö	rnererbs	е		Wii	nterweizen					uckerrübe	
0													86,37		61,62 a		10,65 a
30													94,88 a		66,00 a		11,44 a
60													96,08 a		66,70 a		11,35 a
120								100					108,58	b	74,45 b		12,94 b
	1111					10.0		199	14		1 "1		ı			<u> </u>	
		Winterweizer	า			VVir	nterweize	en	70.40		ıckerrübe	0.70	40.45		٤	Saatmais	
0	30,90 a	15,47 a							72,13 a	53,65 a		8,72 a	· '	а		19,00 *	
45	30,81 a	16,14 a							78,20 a b			8,67 a		а		22,02	
90	31,92 a	15,65 a							81,40 a b			9,43 a		а		20,57	
180	32,83 a	16,67 a						400		60,93 a		9,18 a	44,33	a		21,15	
		Grünerbse				7.	ıckerrübe	199	5	\\/:	nterweizen					Saatmais	
0	12,05		6,65	*	88,38 a		ckerrube	10,50 a	11 27 0	3,19 a	5,60 a		37,38	а		17,27 *	
60	12,73		7,02		86,91 a				13,19 a b	•	6,70 b	0	40,25	a a		20,42	
120	13,88		7,65		89,22 a				12,50 a b		6,18 a b		41,63	a a		18,10	
240	13,68		7,56		99,28 a			12,95 a				С	43,63	a b		23,90	
240	13,00	a	7,50		99,20 a	70,56 a		12,95 a		4,10 D	1,31	<u> </u>	43,03	D		23,90	
		Zuckerrübe				Son	nmergers			Sor	nnenblume				Grünbrac	che (ohne Ab	fuhr)
ا ا	125,18 a 77,23		12,62	а	18,11 a	2011	9,26 a		18,83 a	301			38,19	а	Sidiloldo	10,28 a	,
	141,95 b 87,88		13,58	a	20,61 a		11,28	b	23,40 a				37,72			9,86 a	
	150,33 b 83,33		13,38	a	21,14 a		11,72	b	19,51 a				39,10	а		10,07 a	
	149,33 b 79,78		12,33	a	20,75 a		11,84	b	21,64 a				39,81	a		10,07 a	
300	1-0,00 5 79,70	u	12,00	u	20,10 a		11,07	V	21,07 U				00,01	u		10,11 a	

^{*} keine statistische Beurteilung möglich

5.2.2 Ausgewählte Qualitätsparameter in Abhängigkeit steigender Carbokalkdüngermengen (Tabelle 23)

Im **ersten Versuchsjahr (1992)** zeigte am Standort Mannsdorf bei Zuckerrübe der *Zuckergehalt* eine dem Zuckerertrag analoge Reaktionen. Die Varianten 1, 2 und 3 unterschieden sich von einander nicht, die Variante 4 war signifikant niedriger als die Varianten 1 und 3. Im Gehalt an α -Aminosäure-N waren keine Unterschiede in Abhängigkeit der Carbokalk-Applikationsmenge feststellbar.

Am Standort Altlichtenwarth stieg bei Winterweizen der Stickstoff-Entzug durch das Korn geringfügig an. Signifikante Unterschiede zwischen verschieden hohen Carbokalkdüngermengen konnten jedoch nicht festgestellt werden.

Auch der Stärkegehalt bei Kartoffel reagierte am Standort Schönfeld nicht signifikant auf die Zufuhr von Carbokalk.

Am Standort Halbturn gab es im **zweiten Versuchsjahr (1993)** nur geringfügig unterschiedliche Gehaltswerte. Der Zuckergehalt wies in den Varianten 1, 2 und 4 einheitliche Werte auf, die Variante 3 lag signifikant niedriger.

Im **dritten Versuchsjahr (1994)** waren im Stickstoff-Entzug von Winterweizen am Standort Mannsdorf deutliche Zunahmen mit steigenden Carbokalk-Gesamtmengen feststellbar. Basis "Gesamtpflanze" wurde in der höchsten Carbokalkdüngungsvariante signifikant mehr Stickstoff entzogen. Die geringfügig abnehmende Polarisation als auch der ansteigende α -Aminosäure-N bei der Zuckerrübe konnten am Standort Schönfeld hingegen nicht signifikant abgesichert werden. Bei Saatmais am Standort Halbturn waren in den mit Carbokalk gedüngten Varianten höhere Stickstoff-Entzüge erkennbar, die jedoch nicht statistisch beurteilt werden konnten.

Der Zuckergehalt und der Gehaltswert an α -Aminosäure-N bei Zuckerrübe am Standort Altlichtenwarth zeigten im **vierten Versuchsjahr (1995)** signifikante Reaktionen: Während der Zuckergehalt mit zunehmenden Mengen an Carbokalk anstieg und in Variante 4 ein signifikantes Maximum erreichte, ging der Gehalt an α -Aminosäure-N mit steigender Carbokalkgesamtdüngermenge signifikant zurück. Bei Winterweizen am Standort Schönfeld unterschieden sich die Stickstoff-Entzüge nur in den Varianten 2 und 4 signifikant voneinander. Bei Saatmais am Standort Halbturn zeigte sich eine deutlichere Zunahme der Stickstoff-Entzüge als im Vorjahr. Eine statistische Beurteilung war auch in diesem Jahr nicht möglich.

Im **fünften und letzten Jahr (1996) der Zufuhr von Carbokalk** war bei Zuckerrübe die Polarisation am Standort Mannsdorf bis zu Variante 3 konstant und ging in der Maximaldüngungsvariante signifikant zurück, während der Gehalt an α -Aminosäure-N in der Zuckerrübe mit steigenden Mengen an Carbokalk zunahm. Der Stickstoffentzug durch Gerste-Gesamtpflanze am Standort Altlichtenwarth war besonders in der Maximalvariante deutlich höher, aber nicht signifikant. Der Grünbracheaufwuchs am Standort Halbturn entzog in allen Varianten ähnliche Stickstoffmengen.

Tabelle 23: Errechneter N-Entzug (kg/ha) bzw. Polarisation (%) und α-Aminosäure-N (mval/100°S) bei Zuckerrübe sowie Stärkegehalt (%) bei Kartoffel auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn von 1992 bis 1996 (unterschiedl. Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten)

		Manns	dorf		Altlichte	nwarth		S	chönfel	d		ŀ	lalbturn	
CK-	POL	α-N	N-Entzug	POL	α-N	N-Entzug	POL/	α-N	N-	Entzug	POL	α-N	N-En	
Gabe			Gesamt Produkt			Gesamt Produkt			Gesamt	Produkt			Gesamt	Produkt
t/ha	%	mval/100°S	kg/ha	%	mval/100°S			val/100°S			%	mval/100°S	kg/ha	
							1992							
			uckerrübe			Winterweizen			Kartoffel			W	/interweizen	
0	,	,				· ·	14,10 a							
	15,97						15,85 a							
		a 7,82 a				•	13,74 a							
60	15,58	b 8,39 a				96,68 a	14,15 a							
	I	-				IZ" I	1993	10				-	7 . 1	
		В	uschbohne			Körnererbse		VV	interweize	n	47.05		Zuckerrübe	
0											17,25			
30											17,33	•		
60											17,01 b	•		
120							1001				17,39	a 6,65 a		
		14/	interweizen			Winterweizen	1994	7	uckerrüber		1		Saatmais	
		VV				vvinterweizen	10.07.0		uckerruber	1			203,3	.
0			162,90 a				16,27 a							
45			172,50 a				15,44 a						218,0	
90			177,20 a				15,47 a						257,1	
180			200,90 b				15,07 a	20,22 a					228,4	
			Grünerbse			Zuckerrübe	1995	١٨	interweize	n			Saatmais	
0			171 a	15 53	2 a 19,58	a		VV	29,71	a b			188,24 *	
60			184 a						27,67	a b			195,42	
120			206 a		•				30,45	a b			202,72	
240					3 b 11,16 b				36,38	a b			270,07	
240			203 a	10,90	5 6 11,10 6		1996		30,30	D D	<u> </u>		270,07	
		7	uckerrübe		Somm	nergerste	1330	Sc	nnenblum	e	T T	Grünbra	che (ohne Ab	fuhr)
0	16,33				231111	98,16 a		0.		•		C. a. ibi c	309,8 *	,
	16,01	•				122,18 a							294,5	
	16,07					120,55 a							295,3	
		b 10,14 a				168,67 a							299,8	
			ماداله څمه محمدالمادید			.00,01 a							200,0	

^{*} keine statistische Beurteilung möglich

5.2.3 Ausgewählte Ertrags- und Qualitätsparameter in Abhängigkeit steigender Mengen an Carbokalk in den Jahren nach Abschluss der Zufuhr (Tabellen 24 u. 25)

Am Standort Mannsdorf stand im **sechsten Versuchsjahr (1997)** Saatmais. Trotz einheitlicher mineralischer Stickstoffzufuhr in allen Varianten waren in jenen, in denen in den letzten fünf Jahren Carbokalk ausgebracht wurde, die *Frischmasseerträge* höher. Zwischen den verschiedenen Carbokalkstufen (V2, V3 und V4) waren keine Unterschiede feststellbar. Der Ertragszuwachs in der *Kolbenfrischmasse* war erst zwischen Variante 2 und 3 sowie 3 und 4 zu erkennen. Die Ertragssteigerung war sowohl bei der Gesamtpflanze als auch beim "Kolben" nicht signifikant.

Am Standort Altlichtenwarth war bei Winterweizen im Ertragsverhalten generell keine signifikante Reaktion in Abhängigkeit der Zufuhrmenge an Carbokalk zu verzeichnen. Auch am Standort Schönfeld (Winterweizen) waren die Ertragsunterschiede in der Frischmasse zwischen den Varianten nur gering und nicht statistisch absicherbar. Im Trockenmasseertrag und im Kornertrag war dennoch eine Tendenz zu höheren Erträgen bei steigenden Carbokalkdüngermengen erkennbar.

Am Standort Halbturn waren die Unterschiede in den Frischmasseerträgen der Gesamtpflanze zwischen benachbarten Varianten zwar nicht absicherbar, die Anstiege von Variante 1 nach 3, 2 nach 4 und 1 nach 4 hingegen klar. Der Trockenmasseertrag der Gesamtpflanze lag in den Varianten 3 und 4 signifikant höher als in den Varianten 1 und 2. Die Kornerträge selbst waren sowohl in der Frischmasse als auch in der Trockenmasse in jenen Varianten, in denen mit Carbokalk gedüngt wurde signifikant höher als in der Null-Variante. Die Höhe der ausgebrachten Mengen Carbokalk hatte keinen Einfluss auf den Weizenertrag.

Im **siebenten Versuchsjahr (1998)**, d.h. im zweiten Jahr mit ertragsbezogenen Stickstoffdüngung waren bei Sommergerste am Standort Altlichtenwarth die Erträge in den Varianten 3 und 4 in der Tendenz höher als in den Varianten 1 und 2. Eine statistische Absicherung dieser Reaktion war jedoch nicht gegeben.

Am Standort Schönfeld zeigte sich bei Kartoffel im Ertrag keine signifikante Reaktion auf unterschiedlich hohe Düngermengen an Carbokalk. Der Frischmasseertrag der Gesamtpflanze und der Knollenertrag wiesen jedoch in der Tendenz eine positive Reaktion gegenüber höherer Carbokalkzufuhrmengen auf. Im Stärkeertrag waren hingegen keine Unterschiede feststellbar.

Bei Saatmais am Standort Halbturn konnte nur der *Frischmasseertrag* der Gesamtpflanze parzellenmäßig ausgewertet werden. Dieser nahm in der Tendenz durch die Düngung mit Carbokalk zu, wobei der stärkste Anstieg von Variante 1 zu 2 erfolgte.

Tabelle 25 zeigt die Stickstoffentzüge durch das Korn auf den Standorten Altlichtenwarth und Schönfeld im **ersten** Jahr (1997) der ertragsbezogenen N-Düngung auf. Signifikante Zunahmen konnten nicht festgestellt werden, obwohl in der Tendenz die N-Entzüge in den Maximalvarianten der Carbokalkdüngung deutlich höher lagen als in der Nullvariante. Der Stickstoff-Entzug am Standort Halbturn lag in den mit Carbokalk gedüngten Flächen signifikant höher als in der Null-Variante. Obwohl in der Maximalvariante der N-Entzug nochmals um etwa zehn kg/ha zunahm, war dieser Anstieg nicht absicherbar.

Im **zweiten** Jahr der Ausgleichsdüngung (1998) wurde am Standort Schönfeld nur der Stärkegehalt der Kartoffel gemessen. Der Gehalt ging geringfügig, aber nicht signifikant zurück. Sommergerste in Altlichtenwarth und Saatmais in Halbturn zeigten in der Tendenz höhere Stickstoffentzüge in den mit Carbokalk gedüngten Varianten.

Tabelle 24: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn in den Jahren 1997 und 1998 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten)

	Mannsdorf				A	Altlichte	nwarth			Schö	nfeld				Ha	lbt	urn		
	Frischmasse	Trock	enmass	е	Frisch	masse	Trocken	masse	Frisch	masse	Trockei	nmasse	Fri	Frischmasse			Trockenmass		nasse
Var.	Gesamt Produkt	Gesamt	Produ	ıkt	Gesamt	Produkt	Gesamt	Produkt	Gesamt	Produkt	Gesamt	Produkt	Gesa	mt	Produl	kt	Gesam	t	Produkt
	t/ha	t/ha			t/ha	1			t/ha		t/h	а		t/ha			t/	ha	
									1997										
	S	aatmais				Wii	nterweizen			Wi	interweizen					Wir	nterweize	en	
V1	24,19 a 13,53 a		8,95	а	20,36 a		12,53 a	4,45 a	16,10 a		9,52 a	3,96 a	16,54	a	5,19	a	10,79	a	4,46 a
V2	26,03 a 13,56 a		7,84	а	20,60 a		13,09 a	4,95 a	16,56 a		9,88 a	4,32 a	17,43	a b	5,86	b	11,27	a	5,04 b
V3	25,85 a 14,09 a		9,07	а	20,78 a		12,85 a	4,58 a	15,74 a		9,88 a	4,28 a	18,39	bс	5,79	b	12,32	b	4,98 b
V4	26,45 a 14,53 a		9,07	а	19,82 a		12,72 a	4,84 a	16,32 a		10,07 a	4,56 a	19,80	С	6,05	b	12,88	b	5,20 b
									1998										
	Bu	schbohne				Son	nmergerste	Э			Kartoffel					S	aatmais		
V1					19,13 a		8,46 a	4,46 a	46,73 a	44,85 a		7,45 a	40,38	а			18,92	*	
V2					19,10 a		8,77 a	4,41 a	47,45 a	45,58 a		7,48 a	43,60	а			19,82		
V3					20,25 a		9,57 a	4,65 a	48,85 a	46,80 a		7,62 a	44,93	а			19,77		
V4					20,25 a		9,44 a	4,52 a	49,50 a	47,43 a		7,58 a	44,13	а			19,06		

^{*} keine statistische Beurteilung möglich

Tabelle 25: Errechneter N-Entzug (kg/ha) bzw. Polarisation (%) und α-Aminosäure-N (mval/100°S) bei Zuckerrübe sowie Stärkegehalt (%) bei Kartoffel auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn 1997 und 1998

(unterschiedl. Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten)

		Manns	sdorf			Altlic	htenw	/arth		Sc	hönfeld			ŀ	lalbturn			
	POL	α-N	N-Entz	ug	POL	α-N	N-E	Intzug	POL/	α-N	N-Ent	zug	POL	α-N	N-	Entzu	ıg	
Var.			Gesamt	Produkt			Gesam	t Produkt	Stärkeg	jehalt	Gesamt	Produkt			Gesamt	Pr	odukt	
	%	mval/100°S	kg/ha	1	%	mval/100°S			%	mval/100°S					kg/	'ha		
									1997									
			Saatmais			Winterw	veizen			Wi	nterweizen			W	/interweize	า		
V1				141,5 a			177,9	a 113,7 a			124,6 a	101,0 a			94,2 a	l	74,4 a	а
V2				123,9 a			151,6	a 116,9 a			153,7 a	108,3 a			105,4 a	b	86,5	b
V3				156,9 a			165,8	a 108,6 a			151,7 a	107,5 a			130,5 a	b	86,8	b
V4				137,8 a			156,0	a 127,2 a			155,9 a	112,8 a			141,8	b	97,6	b
									1998									
		В	uschbohne			Sommer	gerste				Kartoffel				Saatmais			
V1							117,0 a	a 157,3 a	16,6 a	a					187,5	*		
V2							113,3 a	a 151,7 a	16,4 a	a					226,1			
V3							135,3 a	a 160,3 a	16,3 a	a					235,3			
V4							146,4 a	a 181,7 a	16,0 a	a					243,0			

^{*} keine statistische Beurteilung möglich

5.2.4 Ertrag und Qualitätsparameter bei Weizen im Jahr 1999

5.2.4.1 Zwischenernte im Jahr 1999

Tabelle 26 zeigt die Frischmasseerträge im Entwicklungsstadium EC 50 bis 60. In der Tabelle sind die Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen in der Trockenmasse bei Weizen zum Zeitpunkt der Zwischenernte angeführt.

Tabelle 26: Frischmasseertrag bei Weizen (t/ha), Gehalt an Makro- (in % der TM) und Mikronährstoffen (in mg/kg TM) im Stadium EC 50 bis 60, Ernte 15. Mai 1999 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

		Frisc mass		Trocker-mass		Р	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn	Fe	В
		t/ha	a	t/ha			1	%				mg/k	g	
Mannsdorf	V1	29,70	а	7,53	а	0,24	2,34	0,26	0,107	42	11	16	143	1,7
	V2	29,40	а	7,23	а	0,23	2,54	0,30	0,123	37	11	16	153	3,0
	V3	30,00	а	7,64	а	0,26	2,49	0,30	0,118	40	11	16	117	3,2
	V4	30,70	а	7,59	а	0,29	2,58	0,30	0,137	45	24	21	172	2,3
Altlichten-	V1	23,90	а	5,24	а	0,28	2,80	0,49	0,167	54	14	21	166	3,0
warth	V2	27,80	b	6,11	а	0,26	2,63	0,49	0,169	43	12	22	150	2,6
	V3	24,40	а	5,25	а	0,28	3,45	0,56	0,186	51	14	18	162	2,9
	V4	25,20	а	5,28	а	0,30	3,09	0,50	0,183	59	14	55	199	3,0
Schönfeld	V1	21,80	а	5,29	а	0,46	2,78	0,54	0,155	49	24	30	213	3,0
	V2	24,10	а	5,61	а	0,42	2,53	0,56	0,162	44	19	27	121	2,0
	V3	24,10	а	5,61	а	0,52	3,38	0,52	0,148	45	22	31	186	3,5
	V4	24,60	а	5,65	а	0,49	2,57	0,60	0,182	44	17	26	160	2,9
Halbturn	V1	28,00	а	8,15	а	0,28	2,16	0,42	0,156	57	17	22	173	3,1
	V2	26,80	а	7,71	а	0,27	1,75	0,42	0,154	51	13	20	156	2,6
	V3	28,00	а	8,11	а	0,27	1,90	0,41	0,150	38	13	18	123	2,5
	V4	26,90	а	7,91	а	0,29	1,96	0,44	0,169	45	15	20	114	2,2

Die zur Zwischenernte ermittelten Frisch- und Trockenmasseerträge lassen generell nur sehr geringe Reaktionen auf unterschiedlich hohe Carbokalkdüngermengen erkennen. Nur am Standort Altlichtenwarth war in der Frischmasse eine signifikante Ertragsreaktion festzustellen. Die Gehalte an Makronährstoffen waren nach Standorten klar zu unterscheiden, streuten jedoch innerhalb eines Standorts stark und wiesen keine einheitliche Tendenz auf. Ausgenommen hiervon waren tendenzielle Anstiege in den Magnesiumgehalten auf allen Standorten.

Die **Phosphorgehaltswerte** in der Pflanze zeigten keine Unterschiede zwischen den Varianten. Im Vergleich der Standorte wies der Sommerweizen am Standort Schönfeld eine beträchtlich höhere Phosphorkonzentration auf als Winterweizen auf den übrigen Standorten.

Die Konzentrationen an **Kalium** und **Calcium** in der Pflanze blieben von den unterschiedlichen Düngermengen an Carbokalk auf allen Standorten unbeeinflusst. Es zeigten sich jedoch auch hier Unterschiede zwischen den Standorten: In Altlichtenwarth und Schönfeld lagen die Gehaltswerte an Kalium und Calcium höher als auf den Standorten Mannsdorf und Halbturn.

Bei den **Magnesium**gehaltswerten in der Pflanze waren auf allen Standorten, folgend den zunehmenden Carbokalkdüngermengen, in der Tendenz Anstiege feststellbar. Besonders die Variante 4 zeigte höhere Werte als die Varianten mit niedrigeren Carbokalkdüngermengen.

Unter den Spurenelementen wies **Mangan** am Standort Halbturn eine geringfügige Abnahme durch höhere Carbokalkmengen auf. Auf den übrigen Standorten war – wie auch bei **Kupfer**, **Zink** und **Bor** – keine Reaktion auf steigende Mengen an Carbokalk erkennbar. Auffällig ist der hohe Zinkgehalt am Standort Altlichtenwarth in Variante 4. Die Gehaltswerte an **Eisen** in der Pflanze unterlagen großen Schwankungen zwischen den Varianten. Auf den Standort Mannsdorf und Altlichtenwarth nahmen die Konzentrationen zu, auf den Standorten Schönfeld und Halbturn hingegen ab.

5.2.4.2 Ertrags- und Qualitätsparameter bei Weizen im Jahr 1999

Tabelle 27: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) bei Weizen sowie N-Entzüge (kg/ha) von Gesamtpflanze und Korn, Ernte Juli 1999

		F	risc	hmasse		Tro	cker	nmasse			N-En	tzug	
		Gesa		Kor	n	Gesa		Korr	1	Gesar		Korr	1
	374	45.40		/ha		40.05	t/h			000.04	kg/		
Mannsdorf	V1	15,43	а	7,67	а	13,05	а	6,69	а	228,31	а	170,83	а
	V2	16,06	а	7,54	а	13,38	а	6,57	а	234,18	а	169,94	а
	٧3	15,48	а	7,55	а	13,36	а	6,60	а	237,29	а	169,74	а
	V4	16,52	а	7,52	а	13,99	а	6,61	а	243,28	а	169,15	а
Altlichten-	V 1	13,62	а	6,51	ab	12,39	а	5,72	а	196,92	а	146,10	ab
warth	V2	13,64	а	6,71	b	12,40	а	5,90	а	201,31	а	151,32	b
	V3	13,67	а	6,67	b	12,42	а	5,85	а	200,17	а	148,32	ab
	V4	13,02	а	6,37	а	11,85	а	5,60	а	194,10	а	142,50	а
Schönfeld	V 1	9,79	а	5,79	а	8,81	а	5,07	а	151,22	а	120,67	а
	V2	9,94	а	6,03	а	8,75	а	5,28	а	146,85	а	120,02	а
	٧3	9,77	а	5,86	а	8,73	а	5,40	а	152,35	а	123,86	а
	V4	10,40	а	6,13	а	9,21	а	5,39	а	154,39	а	124,15	а
Halbturn	V1	11,31	а	7,68	а	10,23	а	6,86	а	200,37	а	177,11	а
	V2	11,39	а	7,52	а	10,32	а	6,72	а	192,07	ab	164,02	а
	V3	11,17	а	7,54	а	10,11	а	6,73	а	194,61	ab	169,38	а
	V4	11,04	а	7,44	а	10,02	а	6,66	а	185,01	b	160,71	а

Das Ertragsniveau auf den Versuchsflächen lag zumeist über jenem des jeweiligen Produktionsgebietes. Die niedrigeren Gesamtpflanzen- und Kornerträge am Standort Schönfeld sind auf die Fruchtart Sommerdurumweizen zurückzuführen. Die Ertragsunterschiede innerhalb eines Standorts waren sowohl bei der Gesamtpflanze als auch beim Korn gering und ließen keine einheitliche Tendenz erkennen. Gleiches gilt für den Stickstoffentzug. Ausgenommen waren der Kornertrag sowie der Stickstoffentzug am Standort Altlichtenwarth und der Stickstoffentzug am Standort Halbturn.

Die Gehalte an Protein im Weizenkorn lagen am Standort Halbturn sortenbedingt mit 12 bis 13 Prozent unter jenen der übrigen Standorte (14 bis 15 Prozent). Differenzierungen in Abhängigkeit der ausgebrachten Düngemengen Carbokalk waren nicht gegeben. Ebenso unterschieden sich die Tausendkorngewichte nur standort- bzw. sortenbedingt. Für Gesamtstickstoff wurden Gehalte im Korn von 2,14 bis 2,34 %, im Stroh von 0,59 bis 0,93% ermittelt. Da auch hier zwischen den Varianten keine eindeutigen Unterschiede gegeben waren, werden die Ergebnisse nicht im Detail angeführt.

5.2.4.3 Ertragsstruktur bei Weizen im Jahr 1999

Die Ertragsparameter zeigten keine Unterschiede zwischen den Varianten der Carbokalkdüngung. Der Einfluss des Faktors "Standort", der sich im Wesentlichen auf die Sorten zurückführen lässt, war hingegen deutlicher. Die Winterweizensorte "Capo" am Standort Mannsdorf erreichte bei durchschnittlicher Anzahl von etwa 400 Ähren/m² ein beachtlich hohes Tausendkorngewicht (TKG).

Im Gegensatz lag die Bestandesdichte der Sorte "Victo" in Halbturn deutlich höher, wodurch ein geringeres TKG die Folge war. Auch die Wuchshöhe und die Kornzahl/Ähre lagen auf diesem Standort niedriger.

Der Sommerweizen am Standort Schönfeld etablierte etwa 420 Ähren/m². Sortenbedingt lag das TKG niedriger als am Standort Mannsdorf. In der Wuchshöhe wies der Sommerweizen die niedrigsten Werte auf.

Tabelle 28: Ertragsstruktur sowie Wuchshöhe in cm auf den Standorten Mannsdorf, Schönfeld und Halbturn, Juli 1999

		Wuchshöhe (cm)	Ähren/m²	Körner/Ähre	TKG (g)
Mannsdorf	V1	83,6	368	28	52,84
	V2	81,5	397	27	52,48
	V3	83,2	445	26	52,29
	V4	81,5	389	27	51,29
Schönfeld	V1	50,3	441	29	43,68
	V2	50,0	446	27	44,32
	V3	47,7	375	25	44,62
	V4	46,4	420	26	45,00
Halbturn	V1	56,8	748	22	35,88
	V2	54,0	734	24	34,54
	V3	56,3	730	23	34,89
	V4	59,2	737	22	33,45

5.3 Bodenchemische Eigenschaften

5.3.1 Nährstoff- und Spurenelementgehalt im Boden

5.3.1.1 Bodendauereigenschaften

5.3.1.1.1 pH-Wert

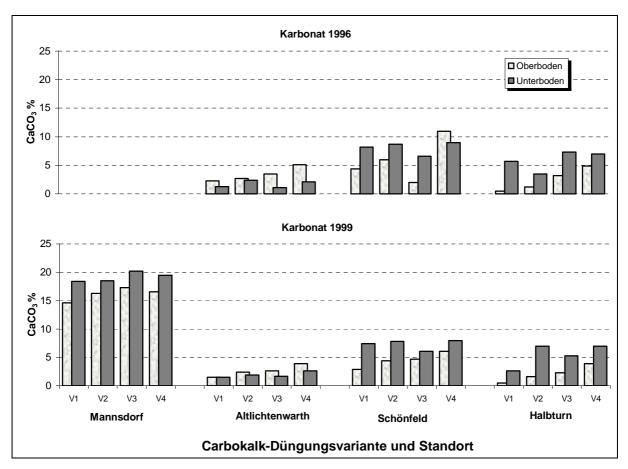
Die Untersuchungen des **Oberbodens** aller Standorte im **Jahr 1996** wiesen bereits in den Nullparzellen einen hohen pH-Wert zwischen 7,4 und 7,6 auf. Entsprechend der Österreichischen Bodenkartierung ist die Bodenreaktion folgend als alkalisch einzustufen.

Auf dem Standort Altlichtenwarth, mit einem Ausgangswert von 7,6, stieg der pH-Wert durch die unterschiedlich hohe Carbokalkzufuhr nicht weiter an. Er blieb trotz hoher Carbokalkdüngermenge zwischen 7,6 und 7,7. Der pH-Wert der Standorte Schönfeld und Halbturn wurde durch die Zufuhr von 75 t/ha Carbokalk um 0,2 Einheiten von 7,5 auf 7,7 bzw. 7,4 auf 7,6 angehoben. Die weitere Erhöhung der Carbokalkzufuhr ergab nur mehr einen geringen Anstieg um jeweils 0,1 Einheiten.

Die Bodenuntersuchungen im **Frühjahr 1999** zeigten wiederholt, dass die Böden in der Null-Variante aller Standorte bereits ohne Carbokalkdüngung einen pH-Wert zwischen 7,4 und 7,7 aufweisen. Auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth und Schönfeld stiegen die pH-Werte in den Carbokalk-Düngervarianten nur unwesentlich an. Einzig am Standort Halbturn war durch die steigende Carbokalkzufuhr während der fünf Jahre bis 1996 auch im Jahr 1999 noch eine Erhöhung des pH-Wertes von 7,4 auf 7,7 in der Maximal-Variante feststellbar.

5.3.1.1.2 Karbonat (CaCO₃)

Abbildung 20: Karbonat-Gehaltswerte in % im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



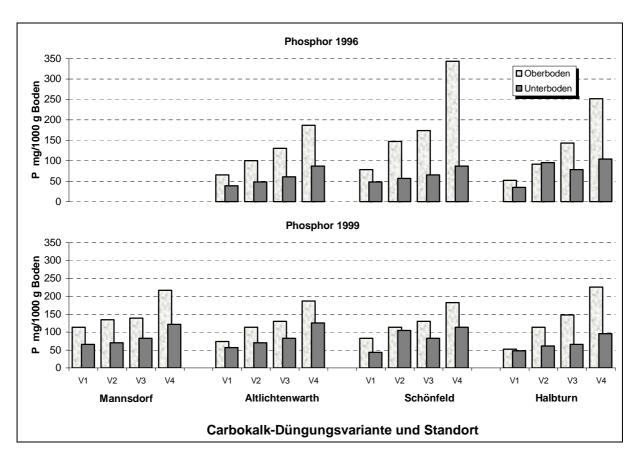
Die Nullvariante (V1) wies den jeweils aktuellen Kalkgehalt des Standortes aus. Basis des Oberbodens war der Kalkgehalt am Standort Mannsdorf als "hoch", auf den Standorten Altlichtenwarth und Schönfeld als "mittel" und am Standort Halbturn als "gering" einzustufen. Der Karbonatgehalt im Unterboden war auf allen Standorten höher als im Oberboden, ausgenommen des Standortes Altlichtenwarth. Im Gegensatz zum Oberboden war der Karbonatgehalt im Unterboden in der Nullvariante am Standort Schönfeld jedoch als "hoch" anzusprechen. Am Standort Halbturn wich die Einstufung des Kalkgehaltes im Unterboden nur im ersten Vergleichsjahr (1996) von der des Oberbodens ab.

Die vergleichenden Analysenergebnisse wiesen im Karbonatgehalt im Oberboden am Standort Mannsdorf keine oder nur geringfügige Veränderungen auf, während auf den Standorten Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn in der Tendenz ein Anstieg des Karbonatgehaltes mit steigenden Carbokalkdüngermengen erkennbar war.

5.3.1.2 Makronährstoffe

5.3.1.2.1 Phosphor (CAL)

Abbildung 21: Phosphor-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999

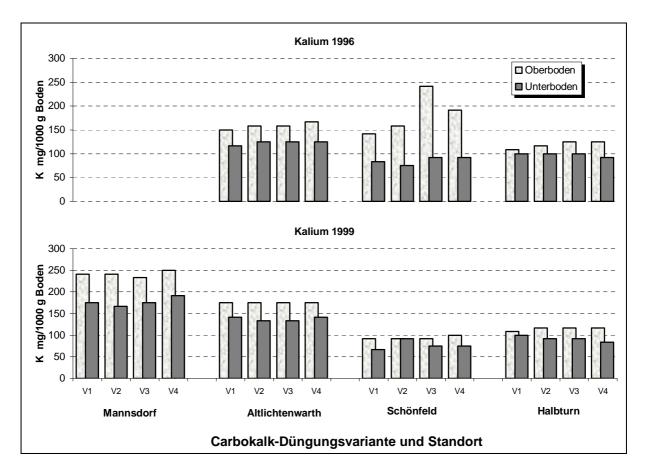


Die Gehaltswerte an Phosphor zeigten in den beiden Vergleichsjahren ähnliche Reaktionen auf die unterschiedlich hohen Carbokalkdüngermengen. In beiden Jahren kam es zu deutlichen Reaktionen auf die Zufuhr von Carbokalk. In der Null-Variante lag bei Phosphor eine "C"-Versorgung vor, die durch die Anwendung von Carbokalk auf allen Standorten bis auf "D" und in der Maximalvariante auf "E" erhöht wurde. Auf den Standorten Schönfeld und Halbturn hoben sich die sehr hohen Werte im Jahr 1996 von beinahe 350 bzw. 250 mg/1000 g Boden in Variante 4 hervor.

Die Phosphor-Gehaltswerte verweisen sowohl im Unter- als auch im Oberboden auf eine einheitliche Tendenz. Die Phosphorversorgung stieg im Unterboden im Jahr 1996 auf allen Standorten von Versorgungsstufe "B" auf "C" an. Im Jahr 1999 blieb auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth die Versorgungsstufe "C" erhalten. Nur in der Maximalvariante wurde eine "D"–Versorgung erreicht. Auf den Standorten Schönfeld und Halbturn erhöhte sich der Versorgungsgrad von "B" auf "C".

5.3.1.2.2 Kalium (CAL)

Abbildung 22: Kalium-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



Auf dem Standort Schönfeld waren die Niveaus der Kalium-Gehaltswerte in den Jahren 1996 und 1999 unterschiedlich. Die Kalium-Gehaltswerte im Jahr 1996 lagen im Vergleich zu den weiteren Versuchsstandorten deutlich höher.

Die Standorte Altlichtenwarth und Halbturn wiesen in den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen in beiden Vergleichsjahren einheitliche Verläufe und Werte (Versorgungsstufe "C") auf.

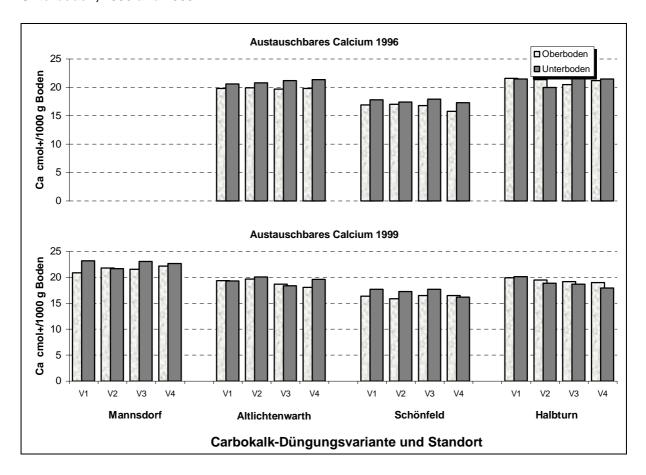
Der Unterboden wies auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth Versorgungsstufe "C", auf den Standorten Schönfeld und Halbturn Stufe "B" auf.

Die Zufuhr von Carbokalk ergab keine Änderungen in der Kaliumversorgung. Einzig am Standort Schönfeld kam es im Oberboden in den Düngervarianten 3 und 4 im Jahr 1996 zu einer Erhöhung der Versorgungsstufe von "C" auf "D". Die Ergebnisse aus dem Jahr 1999 zeigen hingegen keine Wiederholung des Anstieges in der Versorgungsstufe.

5.3.1.3 Austauschbare Kationen:

5.3.1.3.1 Austauschbares Calcium (Ca)

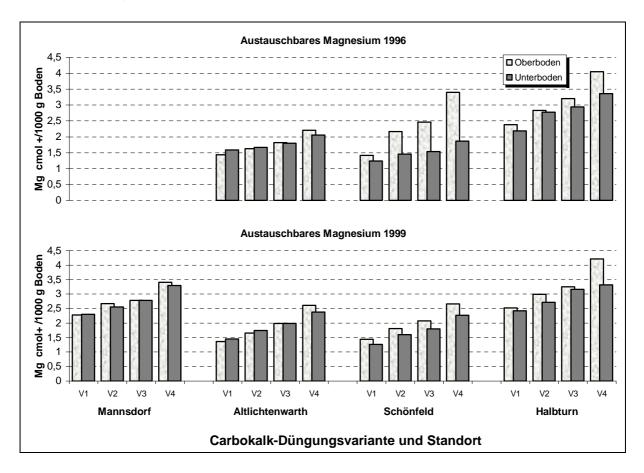
Abbildung 23: Gehaltswerte an austauschbarem Calcium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



Die Mengen an austauschbarem Calcium lagen auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth und Halbturn auf ähnlicher Höhe, der Standort Schönfeld wies einen etwas niedrigeren Gehalt auf. Auf keinem der Standorte kam es durch die Kalkung mit Carbokalk zu einer Änderung der Gehaltswerte an austauschbarem Calcium.

5.3.1.3.2 Austauschbares Magnesium (Mg)

Abbildung 24: Gehaltswerte an austauschbarem Magnesium in cmol+/1000 g Boden im Oberund Unterboden, 1996 und 1999

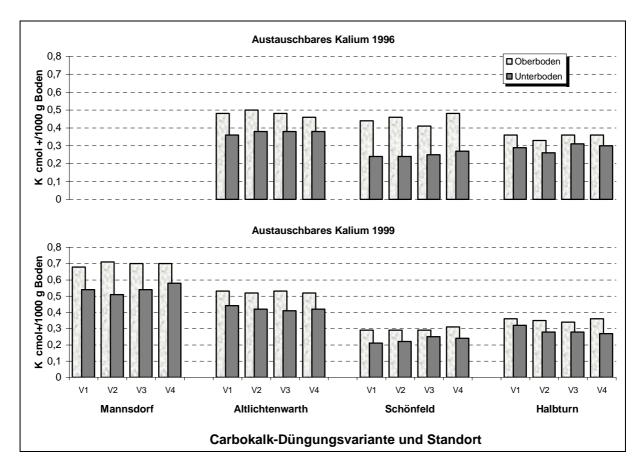


Die Gehaltswerte an austauschbarem Magnesium reagierten am deutlichsten auf die Ausbringung von Carbokalk. Zu beiden Messterminen kam es auf allen Standorten sowohl im Ober- als auch im Unterboden zu einem Anstieg im austauschbaren Magnesium.

Die höchsten Werte und stärksten Anstiege wiesen im Jahr 1996 die Standorte Schönfeld und Halbturn auf. Nach der fünfjährigen Carbokalkausbringungsperiode waren im Jahr 1999 die absoluten Zunahmen an allen Standorten annähernd gleich hoch.

5.3.1.3.3 Austauschbares Kalium (K)

Abbildung 25: Gehaltswerte an austauschbarem Kalium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



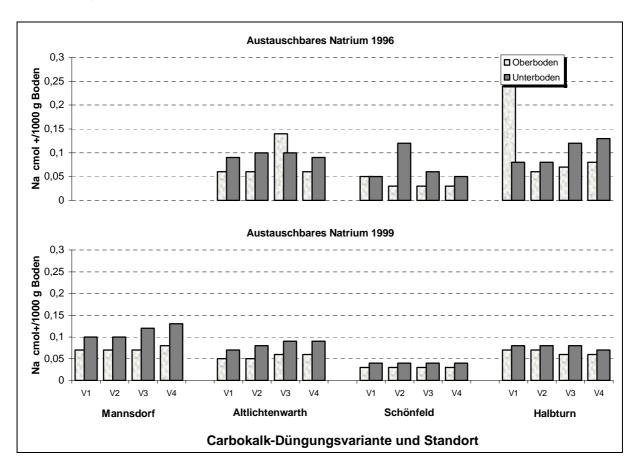
Die Gehaltswerte an austauschbarem Kalium waren am Standort Mannsdorf am höchsten. Bei einer Gegenüberstellung der Vergleichsjahre 1996 und 1999 fällt auf, dass die Gehaltswerte im Oberboden am Standort Schönfeld im Jahr 1999 niedriger lagen als im Jahr 1996, während auf den Standorten Altlichtenwarth und Halbturn die Ergebnisse der Bodenuntersuchung im Jahr 1999 ein ähnliches Niveau aufwiesen wie im Jahr 1996.

Die Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden waren, besonders am Standort Schönfeld, im Jahr 1999 geringer als 1996.

Durch die Zufuhr von Carbokalk waren im Gehalt an austauschbarem Kalium in beiden Untersuchungsjahren nur geringfügige Veränderungen feststellbar. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Messungen der K(CAL) - Gehaltswerte (siehe Seite 66).

5.3.1.3.4 Austauschbares Natrium (Na)

Abbildung 26: Gehaltswerte an austauschbarem Natrium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999

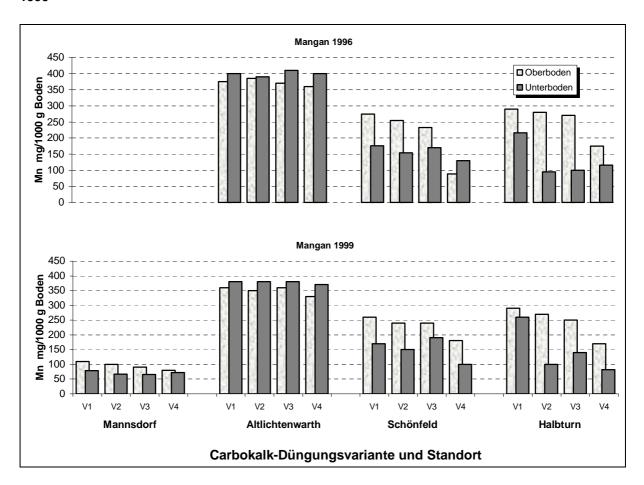


Die Gehaltswerte an austauschbarem Natrium zeigten mit Ausnahme von Einzelwerten im Jahr 1996 ein homogenes Bild. Im Jahr 1999 überschritten im Unterboden die Gehaltswerte auf allen Standorten und in jeder Variante die Werte des jeweiligen Oberbodens. Die Zufuhr von Carbokalk führte auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth zu leichten Zunahmen im Gehalt an austauschbarem Natrium, während am Standort Schönfeld die Gehaltswerte auf niedrigem Niveau unverändert blieben. Am Standort Halbturn zeigten die Bodenuntersuchungsergebnisse einen leichten Rückgang bei austauschbarem Natrium in den Varianten 3 und 4.

5.3.1.4 Mikronährstoffe

5.3.1.4.1 Mangan (Mn)

Abbildung 27: Mangan-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



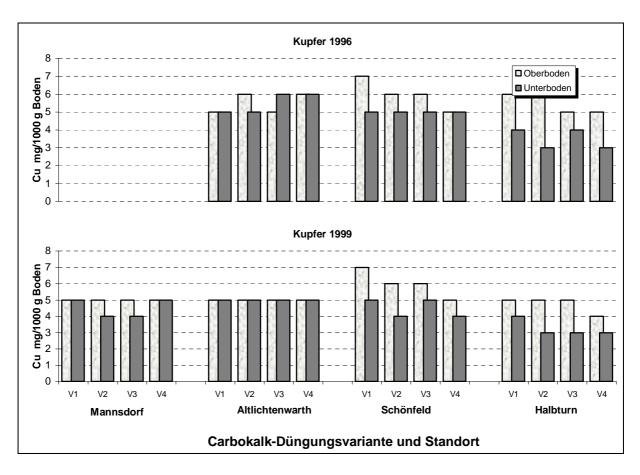
Bei Mangan zeigten die Bodenuntersuchungsergebnisse in den Vergleichsjahren 1996 und 1999 ähnliche Reaktionen auf die Zufuhr von Carbokalk auf. Die geringsten Mn-Gehaltswerte (Versorgungsstufe "C") wies der Standort Mannsdorf mit einer abnehmenden Tendenz im Jahr 1999 im Oberboden auf. Die höchsten Mangan-Gehaltswerte (Versorgungsstufe "E") wurden am Standort Altlichtenwarth gemessen.

Die Versorgung auf den Standorten Schönfeld und Halbturn lag in Stufe "E", blieb bis zu einer Carbokalkmenge von 150 t/ha auf einem hohen Niveau und sank im Oberboden in der Variante mit der höchsten Carbokalkgabe von 300 t/ha auf Stufe "C" ab.

Die Gehaltswerte im Unterboden waren mit Ausnahme am Standort Altlichtenwarth niedriger als im Oberboden. Die Reaktionen auf die Zufuhr von Carbokalk folgten im Wesentlichen denen des Oberbodens.

5.3.1.4.2 Kupfer (Cu)

Abbildung 28: Kupfer-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



Die Kupfergehaltswerte lagen auf allen Standorten zu beiden Messterminen in Versorgungsstufe "C". Auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth war im Oberboden keine, auf den Standorten Schönfeld und Halbturn eine leicht abnehmende Tendenz durch die Zufuhr von Carbokalk erkennbar.

Auf allen Standorten und in allen Carbokalk-Düngungsvarianten blieben im Unterboden die Werte konstant in Versorgungsstufe "C".

5.3.1.4.3 Zink (Zn)

Zink 1996 □ Oberboder 12 mg/1000 g Boden Unterboden 10 6 Zn Zink 1999 12 mg/1000 g Boden 10 6 4 Zn 2 V/3 V2 V3 Altlichtenwarth Schönfeld Halbturn Mannsdorf Carbokalk-Düngungsvariante und Standort

Abbildung 29: Zink-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999

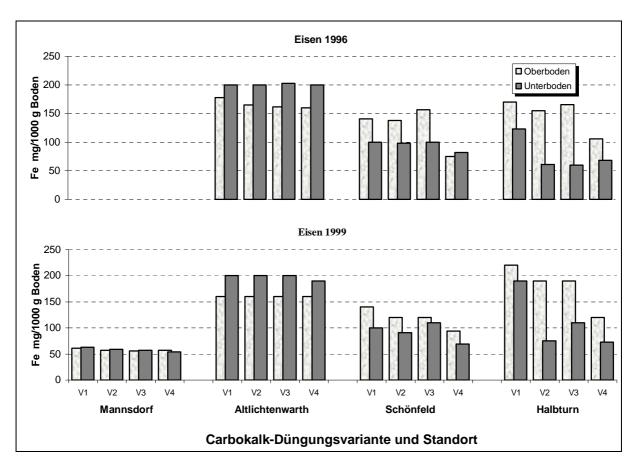
Die Zink-Versorgung lag auf allen Standorten in den Vergleichsjahren 1996 und 1999 zwar in Stufe "C". Die Gehaltswerte waren im Untersuchungsjahr 1999 im Oberboden dennoch deutlich niedriger als im Jahr 1996. Auffallend ist, dass die Unterschiede zwischen den Jahren auch in den Parzellen der Nullvariante auftraten, in denen während der gesamten Versuchsdauer kein Carbokalk ausgebracht wurde. Im Jahr 1996 gab es bei den Einzelwerten größere Schwankungen als im Jahr 1999. Einzig am Standort Halbturn blieben die Gehaltswerte auf gleicher Höhe wie im Jahr 1996.

Auf den Standorten Altlichtenwarth und Schönfeld unterschieden sich die Gehaltswerte zwischen den Vergleichsjahren 1996 und 1999 beträchtlich. Während 1996 in Altlichtenwarth die Gehaltswerte deutlich anstiegen, war die Reaktion 1999 nur mehr marginal. In Schönfeld nahmen die Gehaltswerte 1996 ab, im Jahr 1999 waren die Änderungen nur gering.

Im Unterboden blieben die Gehaltswerte im Jahr 1999 etwa auf gleichem Niveau wie im Versuchsjahr 1996. Am Standort Altlichtenwarth lagen die Gehaltswerte in den mit Carbokalk gedüngten Varianten einheitlich um 1 mg/1000 g Boden höher als in der Nullvariante, während am Standort Schönfeld erst bei einer Carbokalkdüngermenge von 150 t/ha an Anstieg feststellbar war. Am Standort Halbturn verringerte sich der Zinkgehalt im Unterboden ab 150 t/ha Carbokalk um 1 mg/1000 g Boden

5.3.1.4.4 Eisen (Fe)

Abbildung 30: Eisen-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



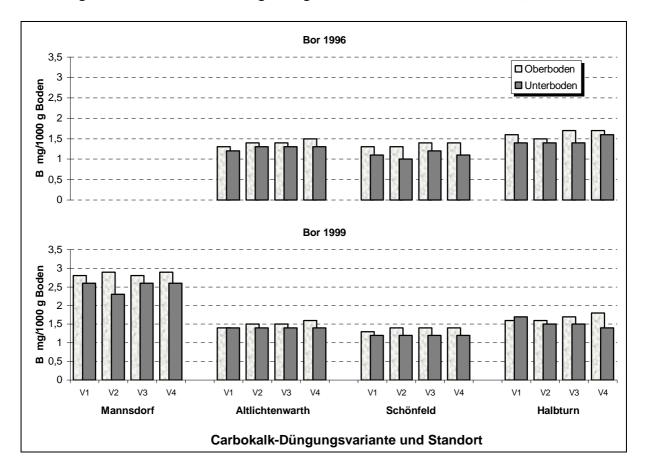
Auf allen Standorten lag trotz beträchtlicher Unterschiede in den Gehaltswerten bereits in der Nullvariante eine "C"-Versorgung vor. In beiden Untersuchungsjahren wurde ein ähnlich hohes Niveau der Gehaltswerte gemessen.

Die Reaktion der Eisengehalte auf steigende Carbokalkdüngermengen erfolgte ähnlich wie bei Mangan. Auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth veränderten sich die Eisengehaltswerte sowohl im Ober als auch im Unterboden durch die Carbokalkdüngung nicht oder nur in geringem Umfang.

Auf den Standorten Schönfeld und Halbturn waren die Reaktionen deutlicher. Am Standort Schönfeld blieben im Untersuchungsjahr 1996 die Eisengehaltswerte bis zu einer Carbokalkdüngermenge von 150 t/ha auf gleicher Höhe, erst bei einer Steigerung der Düngermenge auf 300 t/ha ging der Eisengehaltswert im Ober- und Unterboden zurück. Im Untersuchungsjahr 1999 war der Rückgang der Eisengehaltswerte schon bei geringeren Carbokalkdüngermengen zu beobachten. Am Standort Halbturn nahmen in beiden Untersuchungsjahren die Eisengehaltswerte im Oberboden erst bei einer Carbokalkdüngermenge von 300 t/ha deutlich ab. Im Unterboden zeigten die Ergebnisse der Bodenuntersuchung schon bei geringeren Düngermengen niedrigere Eisengehaltswerte.

5.3.1.4.5 Bor (B)

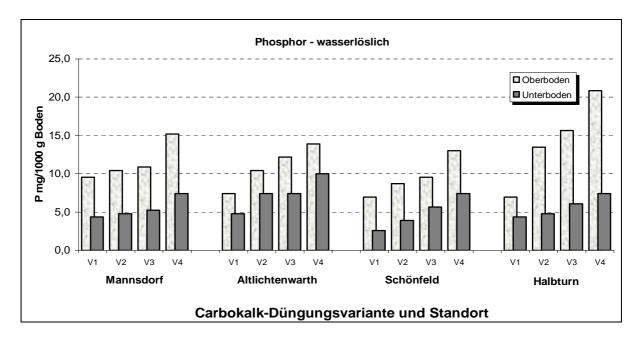
Abbildung 31: Bor-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 1999



Auf den Standorten Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn blieben die Borgehaltswerte in beiden Vergleichsjahren 1996 und 1999 und in allen Carbokalkdüngungsvarianten auf Versorgungsstufe "C". Die Gehaltswerte zeigten in beiden Jahren durch steigende Carbokalkzufuhr keine oder nur geringe Veränderungen. Der Standort Mannsdorf stellte eine Ausnahme in der Borversorgung dar, da im Jahr 1999 in allen Varianten die Versorgungsstufe "E" vorlag.

5.3.2 P_{wasser}-Werte im Jahr 1999

Abbildung 32: Gehaltswerte an wasserlöslichem Phosphor in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1999



Die Gehaltswerte an wasserlöslichem Phosphor zeigten auf allen Standorten einen einheitlichen Anstieg. Am Standort Mannsdorf lag in der Nullvariante der Wert bei 9,6 mg/1000 g im Oberboden. Auf den übrigen Standorten wurden in der Variante ohne Carbokalk ein Gehaltswert zwischen 7,0 und 7,4 mg/1000 g Boden gemessen.

Von diesen Werten ausgehend nahmen auf allen Standorten die Gehaltswerte mit steigenden Carbokalkmengen zu. In den Varianten mit 300 t/ha Carbokalk wurden Werte zwischen 13,0 und 15,2 mg/1000 g Boden ermittelt. Am Standort Halbturn wurden im Oberboden bis zu 20,9 mg/1000 g Boden gemessen.

Auch im Unterboden ergab sich eine ähnliche Reaktion, jedoch auf niedrigerem Niveau. Es kam zu einem deutlichen Anstieg der wasserlöslichen P-Gehaltswerte.

5.4 Bodenphysikalische Eigenschaften

5.4.1 Eindringwiderstand

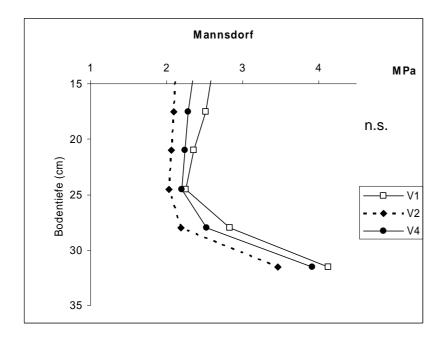
Die graphische Darstellung des Eindringwiderstandes gibt die gemessenen Werte von 15 bis 31,5 cm Bodentiefe wieder. Die obersten 15 cm wurden nicht berücksichtigt, da die Werte in dieser Bodenschicht in allen Varianten in beinahe gleicher Höhe lagen. Zwischen den Standorten gab es im Eindringwiderstand (MPa) deutliche Unterschiede.

5.4.1.1 Standort Mannsdorf

Tabelle 29: Wassergehalt (gravimetrisch) in %, von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Standort Mannsdorf, Mai 1999 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

Tiefe	Variante 1	Variante 2	Variante 4	
	Wassergehalt %			
0 – 10 cm	15,26 a	14,82 a	15,11 a	
10 – 20 cm	15,91 a	16,48 a	16,55 a	
20 – 30 cm	17,07 a	17,37 a	17,42 a	
30 – 40 cm	17,75 a	18,03 a	17,98 a	
40 – 50 cm	18,51 a	20,57 a	19,78 a	

Abbildung 33: Eindringwiderstand in MPa, von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Mannsdorf, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



Die gravimetrische Messung des Wassergehaltes ergab am Standort Mannsdorf keine Unterschiede zwischen den Varianten 1, 2 und 4. Die Differenzen betrugen maximal 2 % absolut.

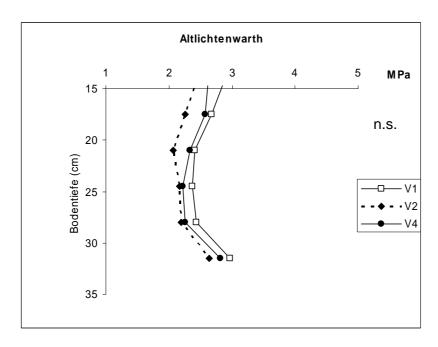
Am Standort Mannsdorf (Abbildung 33) war der Eindringwiderstand in einer Tiefe von 15 cm in den Varianten mit Carbokalk niedriger als in der Variante ohne Carbokalkdüngung, die Variante 2 wies den niedrigsten Wert auf. Bis zu einer Tiefe von 25 cm blieb der Eindringwiderstand in den Varianten 2 und 4 konstant, während in der Nullvariante (V1) der Wert etwa auf das Niveau der Varianten mit Carbokalk zurückging. Über 25 cm Tiefe nahm der Eindringwiderstand in allen Varianten in einem ähnlichen Ausmaß zu. Insgesamt lag der Eindringwiderstand in den mit Carbokalk gedüngten Varianten auf einem niedrigeren Niveau, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant.

5.4.1.2 Standort Altlichtenwarth

Tabelle 30: Wassergehalt (gravimetrisch) in %, von 0–50 cm Bodentiefe, Standort Altlichtenwarth, Mai 1999 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

Tiefe	Variante 1	Variante 2	Variante 4
		Wassergehalt	%
0 – 10 cm	9,35 a	9,01 a	9,46 a
10 – 20 cm	10,34 a	10,62 a	10,97 a
20 – 30 cm	11,44 a	11,77 a	11,73 a
30 – 40 cm	12,27 a	12,19 a	11,79 b
40 – 50 cm	11,87 a	11,82 a	11,46 a

Abbildung 34: Eindringwiderstand in MPa, von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Altlichtenwarth, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



Der Wassergehalt am Standort Altlichtenwarth zeigte in einer Tiefe von 30 bis 40 cm signifikante Unterschiede, obwohl die Differenzen sehr gering waren (Tabelle 30). In Variante 4 lag der gravimetrische Wassergehalt signifikant niedriger als in den Varianten 1 und 2. In den übrigen Tiefen traten keine statistisch absicherbaren Unterschiede auf.

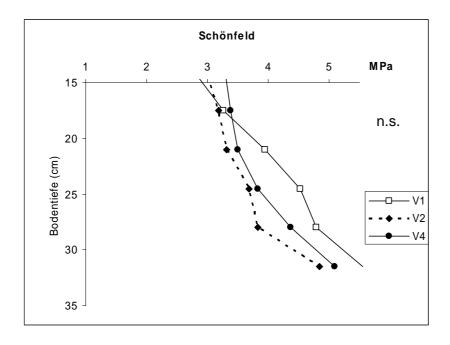
In Altlichtenwarth wiesen alle Carbokalk-Düngungsvarianten etwa den gleichen Kurvenverlauf im Eindringwiderstand auf. Bis zu einer Tiefe von 22 cm nahm der Eindringwiderstand in allen Varianten ab und blieb bis 28 cm Tiefe auf konstanter Höhe. Bis zu einer Tiefe von 31,5 cm stiegen die Werte in allen Varianten gleich an. Der Eindringwiderstand lag in den mit Carbokalk gedüngten Varianten auf einem niedrigeren Niveau als in der Null-Variante. Auffällig ist auch hier, dass die Eindringwiderstände in der Tendenz in Variante 2 geringer waren als in Carbokalk-Düngervariante 4.

5.4.1.3 Standort Schönfeld

Tabelle 31: Wassergehalt (gravimetrisch) in %, von 0–50 cm Bodentiefe, Standort Schönfeld, Mai 1999 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

Tiefe	Variante 1	Variante 2	Variante 4	
	Wassergehalt %			
0 – 10 cm	7,62 a	7,81 a	9,02 a	
10 – 20 cm	9,59 a	9,81 a	9,93 a	
20 – 30 cm	10,53 a	10,28 a	10,53 a	
30 – 40 cm	9,82 a	9,87 a	10,06 a	
40 – 50 cm	9,59 a	9,49 a	8,77 a	

Abbildung 35: Eindringwiderstand in MPa, von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Schönfeld, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



Der Boden am Standort Schönfeld wies mit einem Wassergehalt von unter zehn Gewichtsprozenten den niedrigsten aller Standorte auf, nur in der Bodentiefe von 20 bis 30 cm lag dieser höher. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten in den fünf Tiefenstufen waren sehr gering und nicht signifikant.

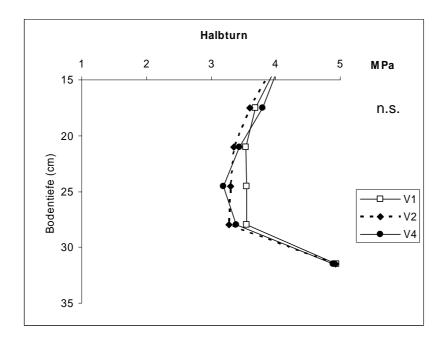
Der Kurvenverlauf der Eindringwiderstände auf diesem Standort zeigte in allen Varianten einen Anstieg mit zunehmender Tiefe von etwa 3 auf 4,5 bis 5,5 MPa. Die Differenzen zwischen unterschiedlichen Carbokalkmengen waren nur minimal, dennoch ergaben sich auch am Standort Schönfeld die niedrigsten Eindringwiderstandswerte in Variante 2.

5.4.1.4 Standort Halbturn

Tabelle 32: Wassergehalt (gravimetrisch) in %, von 0–50 cm Bodentiefe, Standort Halbturn, Mai 1999 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

Tiefe	Variante 1	Variante 2	Variante 4	
	Wassergehalt %			
0 – 10 cm	9,24 a	9,94 a	10,38 a	
10 – 20 cm	11,16 a	11,83 a	11,63 a	
20 – 30 cm	12,44 a	12,47 a	13,06 a	
30 – 40 cm	11,44 a	12,70 a	13,03 a	
40 – 50 cm	12,69 a	10,94 a	12,51 a	

Abbildung 36: Eindringwiderstand in MPa, von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Halbturn, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



Der gravimetrische Wassergehalt lag am Standort Halbturn zwischen 9 bis 13 %. Die Unterschiede zwischen den Varianten betrugen maximal 1,5 %.

Am Standort Halbturn war der Eindringwiderstand in allen Varianten bereits in 15 cm Tiefe auf einem sehr hohen Wert von etwa 4 MPa. Bis 20 cm Tiefe nahm der Eindringwiderstand geringfügig ab und blieb bis 28 cm Tiefe auf einem konstant hohem Niveau. Bei der Null-Variante war im Vergleich zu den Carbokalk-Düngungsvarianten im Bereich von 21 bis 28 cm Tiefe in der Tendenz der Eindringwiderstand um durchschnittlich 0,3 MPa höher. In 31,5 cm Bodentiefe erreichte der Eindringwiderstand den Höchstwert von etwa 5 MPa.

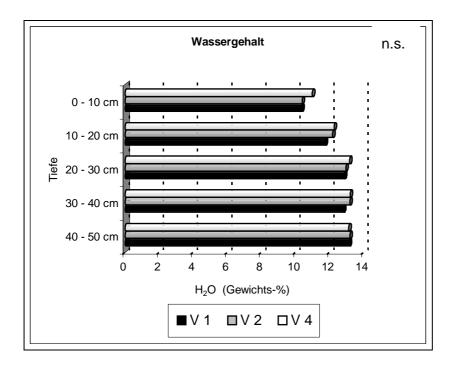
5.4.1.5 Bodenwassergehalt und Eindringwiderstand im Durchschnitt aller Standorte

5.4.1.5.1 Wassergehalt

Der gravimetrische Wassergehalt zeigte in der Zusammenfassung aller vier Standorte zum einen, dass die Gehaltswerte zum Zeitpunkt der Messung (Mai) mit 10 bis 13 % sehr niedrig waren. Zum anderen konnten nur sehr geringe, nicht signifikante Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

Die größten Unterschiede wurden in einer Tiefe von 0 bis 10 cm gefunden. In dieser Bodenschicht lag der Wassergehalt in Variante 4 um etwa ein Gewichtsprozent höher als in Variante 1 und 2. In den tieferen Bodenschichten waren aufgrund unterschiedlich hoher Carbokalk-Düngermengen die Differenzen nur mehr marginal.

Abbildung 37: Wassergehalt (gravimetrisch) in %, von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Mittelwert über vier Standorte, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



5.4.1.5.2 Eindringwiderstand

Die Böden der Standorte Mannsdorf und Altlichtenwarth wiesen Eindringwiderstände von 2 bis 3 MPa, Schönfeld und Halbturn von 3 bis 4 MPa auf. Die Messwerte ließen in Mannsdorf

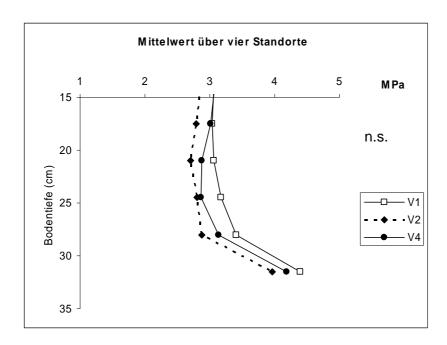
und Halbturn eine Pflugsohle deutlich erkennen und deuteten dies am Standort Altlichtenwarth an. Darüber hinaus waren auf diesen drei Standorten im untersuchten Horizont sehr gleichmäßige Bodenverhältnisse gegeben. Im Vergleich dazu stiegen die Eindringwiderstände am Standort Schönfeld kontinuierlich von 3 bis 5,5 MPa an.

Auffällig war das ähnliche Verhalten des Eindringwiderstandes auf allen vier Versuchsstandorten in Abhängigkeit einer steigenden Kalkdüngung. Die höchsten Werte lagen jeweils in der Variante ohne Kalk vor, die niedrigsten zumeist in Variante 2. Die Eindringwiderstände in Variante 4 lagen in der Regel wiederum höher als in Variante 2. Innerhalb eines Standorts war der Verlauf der Eindringwiderstandskurven meist parallel. Die Werte der Varianten mit Düngung von Carbokalk lagen im Mittel um bis zu etwa 15% unter jenen der Variante ohne Carbokalkapplikation.

Der Durchschnitt der Eindringwiderstandswerte (Abbildung 38) über alle vier Standorte zeigte, dass der Eindringwiderstand in einer Tiefe von 15 bis 32 cm in den Varianten mit Carbokalk in der Tendenz niedriger war als in der Variante ohne Carbokalk. Weiters zeigt die Gegenüberstellung, dass in Variante 2 niedrigere Werte vorlagen als in der Variante 4.

Auch der Kurvenverlauf des Eindringwiderstandes wies Unterschiede zwischen den Varianten auf. In Variante 1 nahm der Eindringwiderstand ausgehend von 3,1 MPa mit zunehmender Tiefe kontinuierlich zu, während in Variante 4 der Eindringwiderstand ausgehend vom gleichen Wert bis zu einer Tiefe von 25 cm auf 2,8 MPa zurückging und erst in tieferen Bodenschichten wieder anstieg. In Variante 2 lag bereits in 15 cm Tiefe ein geringerer Widerstandswert von etwa 2,8 MPa vor, der bis 22 cm Tiefe leicht abnahm und bis 28 cm Tiefe leicht anstieg. Ab einer Bodentiefe von 28 cm nahm in allen Varianten der Eindringwiderstand zu, jedoch auf unterschiedlichem Niveau. In einer Bodentiefe von 32 cm wies die Variante 1 einen Höchstwert von 4,3 MPa, Variante 4 von 4,1 MPa und die Variante 2 von 3,9 MPa auf (Abbildung 38).

Abbildung 38: Eindringwiderstand in MPa, von 15 bis 35 cm Bodentiefe, Mittelwert über vier Standorte, Deckfrucht Weizen, Mai 1999 (n.s.: nicht signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



5.4.2 Hydraulische Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde – je nach Standort – von der Höhe der ausgebrachten Carbokalkmenge beeinflusst (Tabelle 11, Seite 38). Auf dem Standort **Mannsdorf** ergab sich erst in Variante 4 eine Reaktionen auf steigende Carbokalkdüngermengen. In **Altlichtenwarth** und **Halbturn** bewirkte bereits eine Carbokalkmenge von 75 t/ha einen Anstieg in der hydraulischen Leitfähigkeit. Durch eine weitere Erhöhung der Carbokalkzufuhr auf 300 t/ha stieg auf diesen Standorten die hydraulische Leitfähigkeit nicht mehr weiter an. Am Standort **Schönfeld** hingegen nahm die hydraulische Leitfähigkeit kontinuierlich zu.

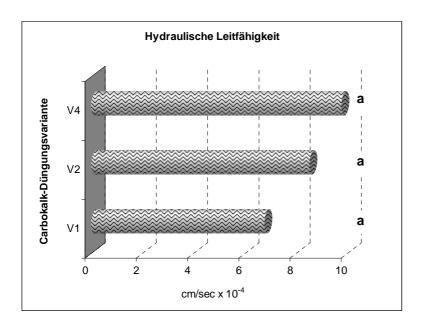
Ein Anstieg der hydraulischen Leitfähigkeit mit steigenden Mengen an zugeführtem Carbokalk ist jedoch nur am Standort Halbturn statistisch gesichert.

Tabelle 33: Hydraulische Leitfähigkeit in cm/sec x 10⁻⁴, auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn in den Carbokalk-Düngungsvarianten 1, 2 und 4 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)

Standort	Düngungs -variante		
Mannsdorf	V1	8,69	а
	V2	7,80	а
	V4	10,57	а
Altlichtenwarth	V1	7,07	а
	V2	8,42	а
	V4	8,28	а
Schönfeld	V1	4,79	а
	V2	6,34	а
	V4	8,55	а
Halbturn	V1	6,45	а
	V2	11,49	b
	V4	11,63	b

Bei Zusammenführung der Ergebnisse aller vier Standorte ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten (**Abbildung 39**). In der Tendenz ergaben sich mit steigenden Carbokalkmengen kontinuierliche Zunahmen der hydraulischen Leitfähigkeit, die jedoch nicht statistisch gesichert sind.

Abbildung 39: Hydraulische Leitfähigkeit in cm/sec x 10⁻⁴, bei unterschiedlichen Carbokalk-Düngungsmengen im Mittel über alle vier Standorte (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



5.4.3 Wurzeluntersuchungen

Tabelle 34: Anzahl der Wurzeln je 100 cm² bei unterschiedlicher Carbokalk-Düngungsmenge auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth und Schönfeld, Mittelwert aus 7 und 22 cm Bodentiefe, Halbturn nur 7 cm Bodentiefe (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwicshen den Varianten)

Standort	Düngungs- variante	Wurzelanzahl (je 100 cm²)
Mannsdorf	V1	35 a
	V2	37 a b
	V3	40 b
	V4	41 b
Altlichtenwarth	V1	32 a
	V2	32 a
	V3	34 a
	V4	36 a
Schönfeld	V1	30 a
	V2	31 a
	V3	35 b
	V4	36 b
Halbturn	V1	38 a
(nur 7 cm Tiefe)	V2	40 a
	V3	41 a
	V4	42 a

Die Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen (**Tabelle 34**) zeigten, dass auf den angeführten Standorten durch Ausbringung von Carbokalk die Anzahl der Wurzeln (je 100 cm²) zunahm.

Am Standort **Mannsdorf** war bei einer Carbokalkdüngungsmenge von 75 t/ha noch keine signifikante Erhöhung der Wurzelanzahl zu beobachten. Erst bei einer Steigerung der Carbokalkmenge auf 150 t/ha nahm die Wurzelanzahl gegenüber der Nullvariante statistisch gesichert zu. Noch höhere Mengen an Carbokalk (300 t/ha) ergaben keinen signifikanten Einfluss auf die Wurzelanzahl.

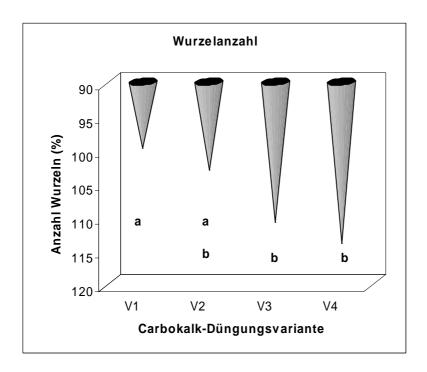
Die Wurzelanzahl im Oberboden am Standort **Altlichtenwarth** stieg zwar mit zunehmenden Carbokalkmengen an, die Erhöhung der Wurzelanzahl (je 100 cm²) war jedoch in keiner Variante signifikant.

Am Standort **Schönfeld** waren die Unterschiede zwischen der Nullvariante und der Variante mit 75 t/ha nur gering. Ein Anstieg in der Wurzelanzahl (je 100 cm²) war erst bei einer Carbokalkdüngungsmenge von 150 t/ha signifikant. Die weitere Steigerung auf 300 t/ha ausgebrachter Carbokalkmenge erhöhte die Wurzelanzahl nicht mehr.

Am Standort **Halbturn** war es aufgrund des hohen Steinbesatzes nicht möglich, aus 22 cm Tiefe Bohrkerne zu entnehmen. Die Wurzelanzahl in 7 cm Tiefe zeigte auf diesem Standort in der Tendenz eine geringfügige Zunahme infolge der Ausbringung von Carbokalk.

Ein Vergleich der Mittelwerte über alle Standorte zeigte eine kontinuierliche Erhöhung der Wurzelanzahl. Die Durchwurzelung bei einer insgesamt ausgebrachten Menge von 75 t/ha unterschied sich nicht von der Null-Variante. Erst die Menge von 150 t/ha ergab eine signifikante Erhöhung der Wurzelanzahl. Bei 300 t/ha Carbokalk waren geringe, nicht signifikante Anstiege in der Wurzelanzahl feststellbar (**Abbildung 40**).

Abbildung 40: Anzahl der Wurzeln je 100 cm² bei unterschiedlicher Carbokalk-Düngermenge in Summe aus 7 und 22 cm Bodentiefe als Mittel über alle vier Standorte, relativ, Variante 1 = 100 (unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Differenzen zwischen den Varianten)



5.4.4 Spatendiagnose

Die Untersuchung der Bodenstruktur mittels Spatenprobe nach GÖRBING ergab, dass die Düngung mit Carbokalk Veränderungen im Boden bewirkte, die bereits mit freiem Auge erkennbar waren. Weiters war es anhand des ausgegrabenen Bodenblockes möglich, standorttypische Bodenmerkmale zu charakterisieren.

Am Standort **Mannsdorf** (Winterweizen) waren in allen Varianten verdichtete Bearbeitungshorizonte in 10 bis 15 cm und 25 bis 30 cm Tiefe ersichtlich. Die Kluten aus den Verdichtungszonen in den mit Carbokalk gedüngten Varianten bestanden aus kleinen, strukturierten Krümel, die leicht zerlegbar waren (*Krümelgefüge*). In den ungedüngten Parzellen waren die bis zu 5 cm großen Kluten ohne Struktur, mit glatten Bruchflächen und nicht zerlegbar (*Plattengefüge und Polyedergefüge*).

Die Aggregate aus den nicht verdichteten Bereichen zeigten in der Abwurfprobe ein gegensätzliches Bild. Die Aggregate aus den mit Carbokalk gedüngten Parzellen waren deutlich größer als jene aus den ungedüngten Parzellen. Dies deutet auf eine höhere Krümelstabilität durch Zufuhr von Carbokalk hin.

Am Standort Mannsdorf war eine hohe Anzahl an Regenwurmröhren und große Mengen an Wurmlosungen erkennbar.

Am Standort **Halbturn** (Winterweizen) waren aufgrund des feuchteren Bodens die Unterschiede zwischen den Varianten nicht so stark ausgeprägt. Es zeigte sich jedoch auch auf diesem Standort, dass in den Verdichtungshorizonten der ungedüngten Variante die Krümel scharfkantig waren. In der Verdichtungszone zwischen 15 und 20 cm Bodentiefe lag in den Varianten 1 und 2 eine plattige Schichtung vor. Allein in Variante 1 waren die Aggregate im verdichteten Bereich bis zu 5 cm groß. In den Variante 2, 3 und 4 zerfielen diese Aggregate sehr leicht zu kleineren Krümeln.

Weiters wiesen Ernterückstände, die in den verdichteten Zonen eingeschlossen waren, einen fauligen Geruch auf. Über die gesamte Beurteilungstiefe bis 35 cm waren Regenwurmgänge und -losungen sichtbar.

Die Spatenprobe am Standort **Schönfeld** (Sommerweizen) zeigte einen Verdichtungshorizont in einer Bodentiefe von 20 bis 30 cm. Der Unterschied zwischen den Varianten bestand darin, dass in den ungedüngten Parzellen im Verdichtungsbereich keine Struktur der Aggregate erkennbar war. In den mit Carbokalk gedüngten Parzellen zeichneten sich hingegen Krümel ab.

Trotz der Verdichtungshorizonte waren zahlreiche Regenwurmgänge in der gesamten Bodentiefe von 0 bis 35 cm feststellbar.

Der Boden am Standort **Altlichtenwarth** (Winterweizen) war in allen Parzellen dichter gelagert als auf den übrigen Versuchsstandorten. Verdichtete Bereiche waren hier ab 15 cm Bodentiefe deutlich ersichtlich. Eine krümelige Struktur des Bodens mit Regenwurmröhren und einer gleichmäßige Durchwurzelung des Bodenausschnittes von 0 bis 35 cm Tiefe war in allen Varianten erkennbar.

Die Abwurfprobe zeigte, dass in den mit Carbokalk gedüngten Parzellen der Bodenziegel in kleine Krümel (kleiner als 1 cm) zerbrach. In der ungedüngten Parzelle verblieben die Bodenaggregate in einer Größe von bis zu 5 cm.

6 Diskussion

Die Nachhaltigkeit landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzter Flächen setzt eine stabile Bodenstruktur, welche eine ökologisch und ökonomisch effiziente Nutzung der im Boden befindlichen Wasser- und Nährstoffmengen ermöglicht, voraus. Auf Böden mit einem hohen pH-Wert werden durch die mehrjährige Applikation von Carbokalk Auswirkungen sowohl im Pflanzenwachstum als auch im bodenchemischen Bereich erwartet.

6.1 Einfluss unterschiedlicher Carbokalkmengen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag bei Weizen und Zuckerrübe

Getreide, und im Besonderen Weizen, weist gegenüber Standortfaktoren, Witterung und produktionstechnischen Maßnahmen ein hohes Kompensationsvermögen auf. Die Ergebnisse der angeführten Versuche bestätigen die Ertragsstabilität sowie den komplexen Charakter der möglichen Reaktionen der Weizenpflanze auf Veränderungen im Boden durch die unterschiedlichen Carbokalkdüngermengen. Weder bei der Zwischen- noch bei der Haupternte wurde der Ertrag messbar beeinflusst (Tabellen 22 bis 26). Darüber hinaus waren sowohl der Witterungsverlauf als auch die Managementmaßnahmen auf allen Versuchsstandorten für den Weizen günstig. Daher wurde, wie die Gleichmäßigkeit der Bestände über allen Varianten jedes Standortes zeigte, das natürliche Kompensationsvermögen kaum beansprucht. Die in den Ergebnissen angeführten – z. T. nach Variante unterschiedlich ausgeprägten - bodenphysikalischen Parameter kamen im Vegetationsjahr 1999 für den Ertrag bei Winterweizen nicht zum Tragen (Abbildungen 33 bis 36, Tabellen 33 und 34). Zur langzeitigen Ertragssicherung müssen aber auch bei Getreide die Strukturbedingungen des Bodens einen hohen Feldaufgang und eine gute Wurzelwegsamkeit bis in den Unterboden gewährleisten um die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen auch unter Stressbedingungen sowohl im semiariden Klimagebiet (WASNER et al. 2001) als auch unter semihumiden Klimabedingungen (LIEBHARD 1995) sicherstellen zu können.

HÖSCH und DERSCH (1997) zeigen, dass bei Getreide die Stickstoff-Aufnahmephase deutlich früher und intensiver einsetzt und zugleich kürzer ist, wodurch im Vergleich zu **Zuckerrübe** ein deutlich geringerer Teil der Nettomineralisierungsrate pro Jahr genutzt werden kann. Während bei Zuckerrübe das kulturartenspezifische standörtliche Ertragspotential relativ hoch liegt, werden bei Winterweizen nur knapp 50 % des Maximalertrages ohne Düngung erzielt (KESSEL 1991, HÖSCH und DERSCH 1997).

Nach WENDENBURG und KOCH (1996) ist das Ziel der Zuckerrübenproduktion ein hoher Rübenertrag bei hoher technischer Qualität um einen möglichst hohen Zuckerertrag zu erreichen. Die Ertragsgrößen werden zu einem wesentlichen Teil durch Jahres- und Standortfaktoren bestimmt, die der Landwirt nicht direkt beeinflussen kann. Nach DRAYCOTT (1993) sind die Düngung allgemein und nach WINNER (1982) sowie GLATTKOWSKI und MÄRLÄNDER (1995) die Stickstoffdüngung im Besonderen bedeutende Faktoren, die der Landwirt kontrollieren kann. Das standörtliche Ertragspotential ohne jede Düngung liegt bei Zuckerrübe vergleichsweise hoch. Nach HÖSCH und DERSCH (1997) werden ohne Düngung bereits 82,5 % des maximalen Rübenertrages und fast 90 % des maximalen bereinigten Zuckerertrages erreicht.

Nach DRAYCOTT (1993) ist das Calcium von zweifacher Bedeutung. Zum einen ist Calcium ein wichtiger Makronährstoff, zum anderen ist Calcium der bedeutendste Regulator des pH-Wertes. Bei niedrigerem pH-Wert sinkt die Verfügbarkeit von wichtigen Elementen z.B. Phosphor, die Verfügbarkeit von anderen Elementen (z. B. Aluminium und Mangan) kann jedoch auch bis zu einer toxischen Konzentration führen. Höherer pH-Werte verursachen nach DRAYCOTT (1993) geringere Probleme, können aber auch zu einer sinkenden Verfügbarkeit von bestimmten Nährstoffen führen (z. B. Magnesium, Mangan und Bor)

In der Phase der Aufdüngung mit von Carbokalk reagierte Zuckerrübe mit Ausnahme des Standortes Mannsdorf (1992) im pflanzenbaulich entscheidenden Parameter Zuckerertrag (WINNER 1982) positiv auf steigende Düngermengen. Die Zunahme des Zuckerertrages erfolgt nach Angaben zahlreicher Autoren (DRAYCOTT et al. 1971, BRONNER 1976, GEISLER 1983, 1988, MÄRLÄNDER 1991, u. a.) dadurch, dass der Rübenertrag stärker zunimmt als die Polarisation absinkt. Ergebnisse dieser Art waren im Zeitraum der Carbokalkzufuhr in mehreren Jahren nachweisbar. In den angeführten Jahren waren auch steigende Gehalte an α -Aminosäure-N feststellbar (1992, 1994 und 1996, siehe Tabelle 23, Seite 52), die aber nach BÜRCKY (1979), DRAYCOTT et al.(1971), BRONNER (1977), MÜLLER (1983), VAN BURG et al.(1983), MÄRLÄNDER (1983) auf zunehmenden Einsatz von Düngerstickstoff zurückzuführen sind. Im Versuchsjahr 1995 ergaben sich am Standort Altlichtenwarth jedoch gegensätzliche Reaktionen in den Qualitätsparametern. Der mineralisierte Stickstoff konnte infolge einer ausreichenden Wasserversorgung in Ertrag umgesetzt werden. Die Polarisation erhöhte sich mit zunehmender Carbokalkmenge und der Gehalt an α -Aminosäure-N nahm ab.

Im ersten Versuchsjahr (1992) sanken am Standort Mannsdorf sowohl die Erträge als auch die Qualitätsparameter mit steigender Carbokalkmenge. Eine Reaktion dieser Art ist bei Zuckerrüben nur dann gegeben, wenn das Düngeoptimum von Stickstoff weit überschritten ist (DRAYCOTT et al. 1971, MÄRLANDER 1991). Im fünften Versuchsjahr (1996) kam es auch hingegen auf diesem Standort zu entgegen gesetzten Ergebnissen. Unter der Voraussetzung der deutlich höheren N-Mengen unter sonst ausgesetzter Düngung reagierte die Zuckerrübe tendenziell mit steigenden Erträgen in Variante 2 und 3. Erst in der Maximalvariante (Variante 4) kam es zu einem Ertragsrückgang.

Auch am Standort Halbturn (1993) kam es zu keiner negativen Reaktion bei steigenden Carbokalkdüngergaben. Sowohl Rüben- als auch Zuckerertrag nahmen mit zunehmender Carbokalkmenge zu.

Der in der Literatur als potentiell pflanzenverfügbar beschriebene Stickstoff im Carbokalk (AMBERGER 1983, GUTSER 1983 und 1984) zeigt vor allem nach einigen Jahren der Carbokalkdüngung Wirkung. Diese liegt vermutlich in dem unterschiedlich hohen Stickstoffpool, das im Laufe der Versuchsdauer im Boden aufgebaut wurde, begründet. Da der im Carbokalk enthaltene Stickstoff organisch gebunden ist, steht er der Pflanze als langsam fließende Stickstoffquelle zur Verfügung. Die Standorte mit flachgründigen Böden (Schönfeld und Halbturn) reagieren stärker auf eine Zufuhr von Carbokalk als die tiefgründigeren Standorte Mannsdorf und Altlichtenwarth.

In den Versuchsjahren 1997 bis 1999 traten bei den geprüften Kulturen keine Ertragsunterschiede zwischen den Varianten auf. Durch die bedarfsbezogene Stickstoffdüngung über alle Parzellen kam es zu einer Angleichung der Erträge.

6.2 Einfluss auf Pflanzeninhaltsstoffe

Für Weizen ermittelte VIELEMEYER et al. (1991, zit. bei BERGMANN 1993) Schwankungsbereiche für ausreichende bzw. optimale Mineralstoffgehaltswerte in der Trockenmasse in den Entwicklungsstadien EC 10 bis EC 45. Mit späterem Entwicklungsstadium nehmen diese Gehaltswerte ab.

Bei den Proben zur Zwischenernte im Mai 1999 befand sich von den vier Versuchsstandorten lediglich in Altlichtenwarth der Winterweizen noch im Stadium EC 45, bei den übrigen Standorten waren die Weizenbestände bereits knapp vor bzw. in (Halbturn) Blüte. Der Zeitreihe von BERGMANN (1993) entsprechend ist bei Überschreitung von EC 45 von einer Abnahme der Werte auszugehen.

Tabelle 35: Mineralstoffgehalte in % bzw. ppm i. d. TM bei der Zwischenernte (als Mittelwert über alle Carbokalkdüngungs-Varianten) im Vergleich zu den Ergebnissen von VIELEMEYER et al. (1991, zit. bei BERGMANN 1993) bei Sommer- und Winterweizen in EC 45, Bestand Frühjahr 1999

		Ausreichende Mineralstoffgehalte für Sommer- und Winterweizen im Stadium EC 45 (Autorenkollektive des IPE Jena 1989)	Optimalwerte für Winterweizen im Stadium EC 45 (VIELEMEYER et al. 1991)	Manns- dorf	Altlichten -warth	Schön- feld	Halb- turn
Р	(%)	0,20 - 0,43	0,31	0,26	0,29	0,47	0,28
K	(%)	2,50 - 3,90	3,20	2,49	2,99	2,82	1,94
Ca	(%)	0,28 - 0,85	0,44	0,29	0,51	0,56	0,42
Mg	(%)	0,06 - 0,18	0,12	0,12	0,18	0,16	0,16
Cu	(ppm)	3,80 - 13,00	4,80	14	14	21	15
Mn	(ppm)	20,00 - 140,00	41,00	41	52	46	48
Zn	(ppm)	16,00 - 65,00	18,00	17	29	29	20

Die Gegenüberstellung der Gehaltswerte der einzelnen Standorte zeigt, dass die Weizenbestände auf allen Versuchsflächen ausreichend mit Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium versorgt waren. Der Weizen am Standort Mannsdorf wies den niedrigsten Calciumgehaltswert auf, obwohl auf diesem Standort die höchsten Calciumgehaltswerte im Boden zu finden waren. Die Gehaltswerte bei Phosphor und Magnesium in der Pflanze lassen auf ein hohes Angebot schließen. Die Kaliumwerte lagen knapp unter dem Optimalwert, wobei hier das etwas spätere Entwicklungsstadium zusätzlich zu berücksichtigen ist. Der niedrigste Kalium-Gehaltswert lag am Standort Halbturn vor, hier wies der Winterweizen aber bereits das Entwicklungsstadium EC 60 auf. Da keine negativen Ertragsreaktionen eintraten, ist von keiner Mangelsituation an Nährstoffen auszugehen, es lagen auch nach einer hohen Zufuhr von Carbokalk ausreichende pflanzenverfügbare Nährstoffmengen vor.

Auch die Gehaltswerte bei den Spurenelementen lassen auf keine Mangelsituation schließen. Die **Kupfergehalte** in den Pflanzen lagen auf allen Standorten relativ hoch, deutlich über den Optimalwerten. Die höheren Werte am Standort Schönfeld sind durch die hohen Kupfer-Gehaltswerte im Boden erklärbar. Die Gehaltswerte von **Mangan** und **Zink** liegen entsprechend der Tabelle innerhalb des sehr weiten Bereichs der "ausreichenden Gehalte", und in der Nähe der "Optimalwerte". Am Standort Mannsdorf war trotz eines hohen Kalkgehaltes und der niedrigsten Mangan-Gehaltswerte im Boden der Mn-Mineralstoffgehalt in der Pflanzentrockenmasse nicht wesentlich geringer als auf den übrigen Standorten. Nach BERGMANN (1993) kann die Ursache dafür auch im niedrigen Eisen-Gehaltswert im Boden liegen: Mangan und Eisen konkurrieren bei der Aufnahme durch die Pflanze (AMBERGER 1996).

Die **Eisengehalte** in der Weizenpflanze sind von Standort zu Standort unterschiedlich hoch. Auf den Standorten Mannsdorf und Halbturn lagen die Gehalte im Mittel über alle Varianten bei 146 bzw. 142 mg/kg TM. Auf den Standorten Altlichtenwarth und Schönfeld wurden Gehaltswerte von 170 mg/kg TM ermittelt. Nach AMBERGER (1996) kann es auf kalkreichen Standorten zu einer Konkurrenz zwischen Fe²⁺ und Ca²⁺ in der Aufnahme über die Wurzel kommen. Der sehr hohe Kalkgehalt von über 15 % am Standort Mannsdorf könnte für die niedrigeren Werte in der Pflanze entscheidend sein. Zudem waren die Eisen-Gehaltswerte im Boden auf diesem Standort am niedrigsten (57 bis 61 mg/kg Boden, Abbildung 30).

Nach AMBERGER (1996) kommt es zu Eisenmangel vor allem in tonarmen, stark durchlüfteten, aufgekalkten Sandböden zur Zeit des Hauptwachstumes bei geringem Angebot an Fe²⁺. Trotz hoher Fe-Gehaltswerte im Boden (120 bis 220 mg/kg Boden) kam es auf dem sehr leichten Standort Halbturn zu den niedrigsten Eisengehaltswerten in der Pflanze. Das Bodenuntersuchungsergebnis zeigt, dass eine ausreichende Versorgung (= 100 mg/kg Fe im Boden) auf keinem dieser Standorte unterschritten wurde.

Bei steigenden Carbokalkdüngermengen kam es zu Unterschieden in den Eisengehalten der Pflanze. Die Standorte mit mittlerer Bodenschwere (Mannsdorf und Altlichtenwarth) verzeichneten einen Anstieg, auf den leichteren Standorten Schönfeld und Halbturn verminderten sich die Eisengehalte in der Pflanzentrockenmasse, wobei auch bei höchsten Mengen an Carbokalk zumindest die Versorgungsstufe "C" gegeben war.

6.3 Einfluss unterschiedlicher Carbokalkmengen auf bodenchemische Parameter

Durch eine Kalkdüngung wird, wie in der Literatur angeführt, durch die Zufuhr von alkalisch wirkenden Verbindungen der pH-Wert des Bodens angehoben (SCHWERTMANN et al. 1976, MENGEL 1991 u. a.). Die erwartete weitere Erhöhung des pH-Wertes der Böden ist nur auf einem der vorliegenden Standorte, in Halbturn, in geringem Umfang eingetreten. Die Böden aller Versuchsstandorte lagen mit einem pH-Wert von über 7 im alkalischen Bereich und wiesen z. T. beträchtliche Mengen an freiem CaCO₃ in der mineralischen Festbodensubstanz auf. Die geringfügige Erhöhung des pH-Wertes in Halbturn ist auf den vergleichsweise geringeren Kalkgehalt in der Krume (unter 0,5 %) zurückzuführen (WASNER et al. 2001).

Auf allen Standorten lagen laut den "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006) Böden mit mittlerem (1,0 bis 5 %) bzw. hohem (über 5 %) Kalkgehalt vor; mit Ausnahme des Oberbodens am Standort HALBTURN. Der Kalkgehalt dieses Bodens war als gering (unter 1 %) bis mittel (1,0 bis 5 %) einzustufen. Jedoch lag im Unterboden z. T. ein hoher Kalkgehalt vor.

Bezieht man diese Kalkgehalte auf die Masse des Bodens in 0 bis 30 cm Tiefe (4.500 t/ha), so enthalten die Böden zwischen 22,5 und 657 t CaCO₃ je ha. Durch eine praxisübliche Carbokalkmenge von 10 t/ha werden ca. 5,3 t CaCO₃ je ha ausgebracht. Am Standort MANNSDORF mit dem höchsten Kalkgehalt wird dadurch die Kalkmenge des Bodens um 0,8 %, am kalkärmsten Standort (HALBTURN) um 23,6 % erhöht. Die erfolgte Kalkzufuhr ist auch aus den Ergebnissen der Bodenuntersuchung ersichtlich (Abbildung 20): Am Standort MANNSDORF änderte sich der messbare CaCO₃-Gehalt nicht, in HALBTURN stieg er an.

In der Literatur wird eine pH-Wert-Erhöhung häufig als entscheidende Ursache für eine Veränderung in der Verfügbarkeit von essentiellen Nährstoffen unter anderem auch von **Phosphor** angeführt (DELLER 1979, FEGER 1996, KAPE und HOFHANSEL 1996, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002, SHARPLEY 2000, HAN et al. 2005). KESSEL (1991) weist konkret darauf hin, dass ab einem pH-Wert von 7,2 die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats abnimmt.

Die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors erfolgte nach der **CAL**-Methode (SCHÜLLER 1969). Diese Methode differenziert zwischen noch relativ gut löslichen, instabilen Ca-Phosphaten und dem nativen bzw. durch Alterung der Umwandlungsprodukte von Düngemittelphosphaten entstandenen kristallinen Apatit (SCHÜLLER 1969, BUCHER 1970, WERNER und WEICHMANN 1971,1972).

Untersuchungen zeigen jedoch, dass die CAL-Methode die P-Verfügbarkeit in Böden mit einem CaCO₃ – Gehalt > 10 % zu niedrig bewertet (ZORN und KRAUSE 1999, ZORN 1998). SCHÜLLER (1973) und WERNER (1974) weisen darauf hin, daß die CAL-Methode die Untersuchung von Böden bis 15 % CaCO₃ gestattet. MUNK und REX (1986) stellten bei

diesem Kalkgehalt bereits eine Unterbewertung der P-Verfügbarkeit fest, während BUCHER (1970) als Grenze 30 % CaCO₃ vorschlug. Nach DELLER (1981) scheint bei 15 % CaCO₃ die Pufferkapazität der CAL-Methode bereits etwas überschritten zu sein. Nach WERNER (1974) und ZORN (1998) ist die verminderte Extraktion pflanzenverfügbaren Phosphors auf das Ansteigen des pH-Wertes der Extraktionslösung zurückzuführen. DELLER (1981) und ZORN (1998) empfehlen daher, mit Hilfe des pH-Wertes der CAL-Lösung den Einfluss hoher CaCO₃-Gehalte im Boden auf den CAL-P-Gehalt rechnerisch zu korrigieren.

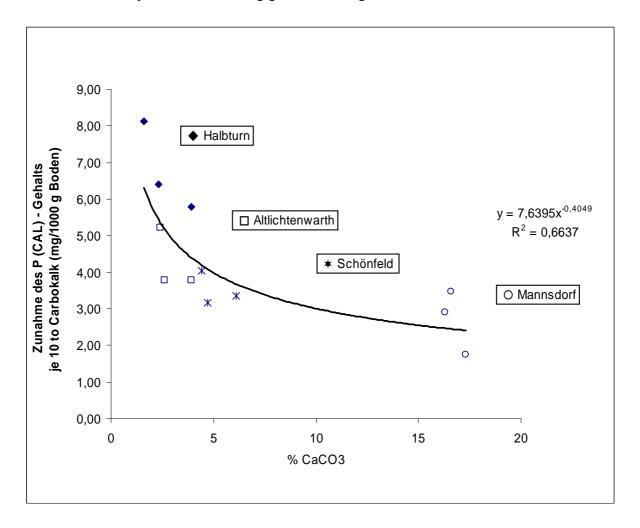
TAGMANN et al. (2001) geben zu bedenken, dass sich mit chemischen Extraktionsverfahren die pflanzenverfügbare P-Menge im Boden nur ungenau abschätzen lässt. Die extrahierbaren Mengen schwanken in Abhängigkeit der Aggressivität der Extraktionsmittel sowie der bodenchemischen Eigenschaften.

In den vorliegenden Analysenergebnissen (Abbildung 21) stieg durch die Carbokalkdüngung der Phosphorgehalt auf allen Versuchsstandorten von der Versorgungsstufe "C" auf "E" an. Diese Reaktion ist darauf zurück zu führen, dass alle Standorte einen nativen pH-Wert aufweisen, der im alkalischen Bereich liegt. Zahlreiche Literaturergebnisse beziehen sich zumeist auf ansteigende pH-Werte, wodurch eine abnehmende Phosphorverfügbarkeit induziert wird. Im vorliegenden Fall trat diese pH-Wert-Änderung grundsätzlich jedoch nicht ein. Sogar bei der geringfügigen Erhöhung des pH-Wertes am Standort Halbturn war noch eine Zunahme der Phosphor-Gehaltswerte feststellbar.

Eine weitere Erklärung für die steigenden Phosphor-Gehaltswerte liegt im hohen Phosphorgehalt von Carbokalk selbst. Bei einem durchschnittlichen Phosphorgehalt von ca. 1 % in der Frischsubstanz wurden in der Maximalvariante nach der fünfjährigen Zufuhr von Carbokalk etwa 3.000 kg P_2O_5 / ha ausgebracht. KESSEL (1991) fand bei geringeren Carbokalkgaben, dass sich das mit dem Carbokalk ausgebrachte Phosphat in der Bodenuntersuchung wieder findet. Die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (Abbildung 21) zeigen, dass die Phosphorgehalte durch den Einsatz von Carbokalk nachhaltig beeinflusst wurden. Daher sollte der Phosphorgehalt im Carbokalk zur Bemessung von praxisüblichen Mengen herangezogen werden.

Bei einer praxisüblichen Menge von 10 t Carbokalk je ha war die Erhöhung des P-CAL-Wertes in Abhängigkeit des Standortes unterschiedlich hoch (siehe Abbildung 41). In der Reihenfolge der Standorte Halbturn, Altlichtenwarth, Schönfeld und Mannsdorf nahm der Anstieg der P-CAL-Werte im Boden von durchschnittlich 6,8 auf 2,7 mg P-CAL je 10 t Carbokalk ab. Innerhalb jedes Einzelstandortes fällt die Zunahme der Phosphorgehaltswerte (je 10 t Carbokalk) mit steigenden Carbokalkmengen geringer aus.

Abbildung 41: Zunahme der Phosphorwerte (in mg/1000 g Boden) je 10 Tonnen ausgebrachtem Carbokalk im Frühjahr 1999 in Abhängigkeit des Kalkgehaltes



Die Ursache für diese Reihenfolge könnte einerseits im unterschiedlich hohen Niveau der Phosphorversorgung - erkennbar an den Phosphorgehaltswerten in der Nullvariante siehe Tabelle 36 - liegen.

Tabelle 36: Phosphorgehaltswerte (mg/1000 g Boden) in der Nullvariante (= kein Carbokalk) im Frühjahr 1999

	mg P (CAL)	
Standort	je 1000 g Boden in der Nullvariante	
Halbturn	52	
Altlichtenwarth	74	
Schönfeld	83	
Mannsdorf	113	

Je höher die Ausgangswerte der Bodenphosphorversorgung lagen, desto geringer war die Erhöhung der Gehaltswerte durch den Einsatz von Carbokalk. Diese Feststellung widerspricht jedoch den Erkenntnissen von LOCH und JÁSZBERÉNYI (1995), wonach auf

karbonathältigen und mit Phosphat gut versorgten Böden die Phosphorbindung am schwächsten ist und hier infolge der zugefügten Phosphor-Mengen die Gleichgewichtskonzentration im größten Maße steigt. Auf karbonathältigen Böden erfolgt die Bildung von Calciumphosphat verhältnismäßig langsam im Vergleich zur Bindung von Phosphat in Form von Eisen- und Aluminiumphosphaten auf sauren Böden (BAREKZAI und MENGEL 1985, LOCH und JÁSZBERÉNYI 1995). Auch SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) bestätigen, dass stark Phosphor bindende Böden eine geringere Phosphorkonzentration aufweisen als schwach bindende.

Eine Ursache für die vorgefundene Rangfolge der Standorte könnte auch in der unterschiedlichen Höhe des nativen Kalkgehaltes der Versuchsstandorte liegen (siehe Tabelle 37).

Tabelle 37: Kalkgehalt (in %) in der Nullvariante (= kein Carbokalk) im Frühjahr 1999

	Kalkgehalt (%)	
Standort	in der Nullvariante	
Halbturn	< 0,5	
Altlichtenwarth	1,5	
Schönfeld	2,9	
Mannsdorf	14,6	

Nach WANDRUSZKA (2006) sind die Oberflächenadsorption und die Fällung die beiden wichtigsten Mechanismen der Phosphor-Festlegung in kalkhaltigen Böden, die eine verringerte Verfügbarkeit nach einer Düngerausbringung bewirken. AFIF et al. (1993) fanden, dass bei hohen Ausbringmengen die Phosphorverfügbarkeit negativ mit dem Kalkgehalt im Boden korreliert. Nach den Ergebnissen von PARFITT (1978) sowie KEERTHISINGHE und MENGEL (1979) kann angenommen werden, dass karbonathaltiges Bodenmaterial Phosphat adsorbiert, welches infolge der Ca-Konzentration in der Bodenlösung zu Apatit altert. Dieser Phosphoralterungsprozess verläuft in kalkhaltigen Böden besonders schnell. Nach MENGEL und KIRKBY (1982, 2001) wird die Fällung von Ca-Phosphaten durch eine hohe Ca²⁺ - Konzentration in der Bodenlösung und bei hohem pH-Wert unterstützt. DELGADO et al. (2002) sowie DELGADO und TORRENT (2000) bestätigen, dass auf kalkhaltigen Böden durch die Bildung von Ca-Phosphaten die Verfügbarkeit von gedüngtem Phosphor negativ beeinflusst wird. Der mit Abstand höchste Kalkgehalt am Standort Mannsdorf würde damit die geringste Zunahme der Phosphatkonzentration in der Bodenlösung durch die Zufuhr von Carbokalk erklären.

Die "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006) gehen davon aus, dass die Phosphatreserven des Bodens eine bestimmte Wasserlöslichkeit in Abhängigkeit des CAL-Wertes aufweisen müssen, um die Pflanzen entzugsgerecht ernähren zu können. Bei hoher Versorgung (Stufe "D") liegt der erforderliche Gehalt an P (H_2O) zwischen 8,7 und 4,4 mg/1000 g Boden (Tabelle 38).

Tabelle 38: Mindestgehalte an wasserlöslichem Phosphor (mg/1000 g Boden) in der Gehaltsstufe "D" (BMLFUW 2006)

mg P (CAL)	mg P (H₂O)
je 1000 g Boden	je 1000 g Boden
112 – 129	8,7
130 – 159	6,5
160 – 174	4,4

In den Varianten 2 und 3 (75 bzw. 150 t Carbokalk/ha) lag auf allen Standorten die Versorgungsstufe "D" vor. Die Gehaltswerte an **wasserlöslichem Phosphor** befanden sich in diesen Varianten zwischen 8,7 und 15,7 mg P (H₂O)/1000 g Boden und damit deutlich über den geforderten Mindestwerten.

Mit steigenden Mengen an ausgebrachtem Carbokalk (300 t/ha) wurde auf allen Versuchsstandorten Versorgungsstufe "E" erreicht. Der wasserlösliche Phosphor nahm auf allen Standorten auf Gehaltswerte von 13,0 bis 20,9 mg/1000 g Boden zu. Auch dieser Parameter zeigt, dass unter den vorliegenden Standortbedingungen, selbst bei stark überhöhten Carbokalkdüngermengen die Phosphorversorgung sichergestellt ist.

MUNK und REX (1986) geben bei der Methode der Wasserextraktion zu bedenken, dass ein $CaCO_3$ -Gehalt von über 1 % zu einer Unterbewertung des pflanzenverfügbaren Phosphors führt. Bei carbonathaltigen Böden ist der Regressionskoeffizient zwischen P (CAL) und P (H_2O) anders als bei carbonatfreien Böden. REX und MUNK (1988) errechneten eine hochsignifikante Beziehung zwischen P (CAL) und P (H_2O), allerdings bei erheblichen Streuungen. Sie kamen zum Schluss, dass im Einzelfall die Umrechnung jedoch zu erheblichen Fehleinschätzungen führen kann und daher nicht zulässig ist. Die Witterungsbedingungen und Kulturen in einzelnen Jahren beeinflussen beide Methoden in unterschiedlicher Weise und Höhe. Nach SCHEFFER und SCHEFFER (1984) spielt die organische Substanz des Bodens bei der Phosphatbindung eine wesentliche Rolle, sie verhindert beispielsweise, dass amorphe Phosphate in kristalline Phosphate umgewandelt werden.

Nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) steigt die **Austauschkapazität** mit zunehmendem pH-Wert an. In alkalischen Böden wird diese zum Großteil von Calcium und Magnesium bestimmt. Die Belegung der Bodenaustauscher mit Ca²⁺ und Mg²⁺ ist nach SCHNUG und HANEKLAUS (2002) ein wichtiger Einflussfaktor auf die Stabilität von Bodenaggregaten im Sinne einer Förderung der Flockung. LEHNARDT (1998) erhielt durch eine Kalkung eine vermehrte Belegung der Austauscher mit Calcium und Magnesium.

Mit steigenden Mengen an Carbokalk änderte sich von den austauschbaren Basen (Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium) das auf hohem Niveau liegende Calcium nicht, während durch den deutlichen Anstieg der Magnesium-Gehaltswerte dessen Anteil an der Austauschkapazität zu Lasten von Calcium zunahm. In den vorliegenden Versuchen liegt der Anteil von Calcium zwischen 80 und 90 %, der Anteil von Magnesium zwischen 6 und 17 % am Sorptionskomplex und damit in den von SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) beschriebenen Bereichen für Ackerböden Mitteleuropas. In den "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006) wird der Anteil von Calcium mit 60 bis 90 % und jener von Magnesium mit 5 bis 15 % am Sorptionskomplex empfohlen.

Für die Magnesiumaufnahme durch die Pflanze hat die Ionenkonkurrenz zwischen den verschiedenen Nährkationen eine große Bedeutung, Kalium hemmt nach REHM und SORENNSEN (1985) die Magnesiumaufnahme. Nach BERGMANN (1993) liegt das ideale K/Mg-Verhältnis am Sorptionskomplex bei 0,5. Bei höheren Werten (über 2) kommt es zu einer Hemmung der Magnesiumaufnahme (GERZABEK 1987, GERZABEK und SCHAFFER

1989). GERZABEK (1988) stellte fest, dass bei einem K/Mg-Verhältnis von kleiner oder gleich 0,23 kein Effekt einer Magnesiumdüngung bei Raps gegeben war. Die mit Magnesium gut versorgten Böden in den vorliegenden Versuchen wiesen K/Mg-Verhältnisse am Sorptionskomplex zwischen 0,14 und 0,39 auf. Damit lässt sich erklären, dass trotz deutlicher Erhöhung der Gehaltswerte an austauschbarem Magnesium im Boden (siehe Abbildung 24, Seite 68) durch steigende Carbokalkmengen die Magnesiumgehaltswerte in der Pflanze nicht oder nur geringfügig anstiegen (siehe Tabelle 26, Seite 59).

Eine höhere Kaliumsättigung ist nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998, 2002) nur auf tonreichen Standorten zu beobachten. Diese Erwartung trifft auf den Standort Mannsdorf zu; der Boden weist einen Tongehalt von über 20 % auf. Am leichteren Standort Schönfeld fällt auf, dass die Unterschiede in der Kaliumsättigung zwischen den beiden Vergleichsjahren höher sind als auf den übrigen Standorten. Dieser Unterschied ist auch in den K-CAL-Gehaltswerten zu finden. Die Ursache könnte darin liegen, dass auf diesem Standort in einer intensiven Fruchtfolge ein hoher Anteil an Kartoffel angebaut wurde. Da der Kaliumentzug durch die Kartoffel sehr hoch ist und seit Versuchsbeginn im Jahr 1991 kein zusätzliches Kalium gedüngt wurde, sind die Kaliumgehaltswerte auf diesem Standort stärker abgesunken, als auf den anderen Standorten.

Die Sättigung mit Natrium liegt für solche Böden im üblichen Bereich von unter einem Prozent.

Durch eine Kalkung von sauren Böden ist ein Anstieg in den Gehaltswerten bei den **Schwermetallen**, im Besonderen bei Mangan, zu erwarten (SIERL et al. 1986; LEHNARDT 1998 u. a.). Bei hohem Boden-pH-Wert wird in der Literatur bei Mikronährstoffen u. a. Eisen, Mangan, Kupfer und Bor oftmals eine sinkende Verfügbarkeit angeführt (z. B. KESSEL 1991; FINCK 1992; BERGMANN 1993; DRAYCOTT 1993; FEGER 1996, KAPE und HOFHANSEL 1996; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

Die angeführten Ergebnisse zeigen (Abb. 27 bis 31), dass es in den vorliegenden Versuchen zu keinem generellen Abfall der Gehaltswerte kam. Möglicherweise gibt es einen Einfluss der Gründigkeit und der Bodenart bei den einzelnen Standorten. GUTSER (1984) wies auf tonärmeren Standorten bei starker Aufkalkung eine Festlegung von Spurenelementen nach. Nur auf den mittelgründigen, leichten Böden in Schönfeld und Halbturn war eine verminderte Verfügbarkeit bei den Mikronährstoffen Eisen, Mangan und Kupfer - bei den sehr hohen Carbokalkdüngermengen von 60 t/ha und Jahr - feststellbar. Bis zu einer jährlichen Düngermenge von 30 t/ha Carbokalk war der Rückgang nur sehr gering. Bei Mangan blieb die Versorgung in Stufe "E". Bei den Elementen Kupfer und Eisen war bereist in der Nullvariante eine "C"- Versorgung gegeben, die auch bei den Höchstmengen nicht unterschritten wurde. Bei den Spurenelementen Zink und Bor kam es auch auf den leichteren Böden zu keiner verminderten Verfügbarkeit. Bei höheren Ausbringmengen von Carbokalk erfolgte sogar ein geringfügiger Anstieg. Diese Schwankungen sind möglicherweise auch auf die in der Praxis unrealistisch hohen Mengen an Carbokalk in der Maximalvariante zurückzuführen.

Die tiefgründigen Böden auf den Standorten Mannsdorf und Altlichtenwarth ergaben bezüglich der Verfügbarkeit von Eisen, Mangan, Kupfer Zink und Bor beinahe keine Veränderung. Nur am Standort Mannsdorf war bei Mangan ein leichter Rückgang gegeben, wobei die Versorgungsstufe "C" (70 mg/kg) in keiner Variante unterschritten wurde. Der deutliche Unterschied in den Gehaltswerten bei Zink zwischen den beiden Untersuchungsjahren ist auffällig. Ein Einfluss der Carbokalkdüngung kann ausgeschlossen werden, da diese Unterscheide auch in den Nullvarianten auftraten. Ob hier die Untersuchungsmethode oder eventuell klimatische Umstände ausschlaggebend waren, kann aufgrund unzureichender Referenzen in der Literatur nicht begründet werden und soll durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

6.4 Einfluss unterschiedlicher Carbokalkdüngermengen auf bodenphysikalische Parameter

Die Ertragsfähigkeit eines Standortes wird im semiariden und ariden Ackerbaugebiet wesentlich von der pflanzenverfügbaren Wassermenge im durchwurzelbaren Bereich beeinflusst (BODNER 2007). Die Aufteilung des natürlichen Niederschlages bzw. des Beregnungswassers in Abfluss, Evaporation, Infiltration und Transpiration ist sowohl für den Wachstumsverlauf der Pflanzen als auch für die Wasserbilanz des Bodens maßgebend.

Zahlreiche Ergebnisse aus der Literatur weisen darauf hin, dass messbare bodenphysikalische Parameter bei verschiedenen Böden, aber auch auf einem Standort – bei unterschiedlicher Krumentiefe – nicht gleich sind (HARTGE 1992, WASNER et al. 2001). Entscheidende Kennzahlen darüber hinaus werden zusätzlich sowohl von der Bodenbearbeitung als auch von der aufwachsenden Fruchtart beeinflusst (LIEBHARD et al. 1995). Die angeführten Ergebnisse zeigen, dass - je nach Bodentyp sowie Bodenart und der ausgebrachten Carbokalkmenge – primär die Makrostruktur beeinflusst wird. Deutlich sichtbar war dieser Einfluss bei den Ergebnissen der Spatenprobe.

Der Einfluss einer intakten Bodenstruktur für die Ausbildung eines optimalen Wurzelsystems und in der weiteren Folge auch für die Ertragsfähigkeit eines Bodens ist vielfach nachgewiesen. GRUBER (1988) zeigt auf, dass das Ertragsvermögen eines Standortes nicht nur durch das pflanzenverfügbare Wasser und den Nährstoffgehalt des Bodens bestimmt wird, sondern auch durch die Durchwurzelbarkeit des Bodens. Die Durchwurzelung des Bodens ist wiederum von der Bodenstruktur abhängig.

Der **Eindringwiderstand** eines Bodens wird dadurch bestimmt, dass der Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe und dem dazu benötigten Kraftaufwand festgestellt wird. Damit kann gezeigt werden, welchen Widerstand der Boden einer wachsenden Pflanzenwurzel entgegensetzt. Häufig wird als Maß für die Durchwurzelbarkeit der Parameter Eindringwiderstand herangezogen (HORN 1984, MURER et al. 1991, CLARK et al. 2003). Bei einem Eindringwiderstand von über 2 MPa (= 20 bar) kommt es nach DEXTER (1986) zu einer 50 %igen Abnahme des Wurzelwachstums. EHLERS (1983) schließt bei einem Wert von über 4 MPa – in geringer Abhängigkeit des Porensystems – ein Wurzelwachstum beinahe völlig aus.

Der unterschiedlich hohe Eindringwiderstand kann wertmäßig, wie es die Abbildungen zeigen (Abb. 33 bis 36), nur räumlich erfasst werden. Die extrem hohe notwendige Zahlendichte lässt nur eine graphische Darstellung zu. Zur Beurteilung der Langzeitwirkung der Carbokalkdüngung wäre je nach Standort eine Unterteilung in pflanzenphysiologisch wirksame Wertbereiche des Eindringwiderstandes vorteilhaft, denn nur dadurch ist eine umfassende Beurteilung der möglicherweise veränderten Mikro- und Makrostruktur des Bodens möglich (LIEBHARD 1995).

Die Eindringwiderstände auf den vorliegenden Versuchen erreichten in der Tiefe von 7 cm auf keinem der Standorte den Wert von 2 MPa. Im Bereich bis 22 cm Tiefe lag auf allen Standorten der Eindringwiderstand zwischen 2 und 4 MPa. In dieser Bodentiefe könnte es daher bereits zu einer Behinderung der Durchwurzelung gekommen sein. Nach BRUSSAARD und van FAASSEN (1994) sollte im Unterboden der Eindringwiderstand bei Dikotyledonen 0,4 MPa und bei Monokotyledonen 3,0 MPa nicht überschreiten.

Die Abbildungen (33 bis 36) zeigen im Eindringwiderstand insgesamt ein relativ hohes Niveau. Ein wesentlicher Grund hierfür war die geringe Wassersättigung des Bodens zum Messzeitpunkt. Die geringeren Eindringwiderstände wurden dementsprechend auf den Standorten mit höheren Wassergehalten gemessen (Mannsdorf 15 bis 20 %, Altlichtenwarth 9 bis 12 %). Am Standort Halbturn (9 bis 13 %) wurden an einzelnen Messstellen zwar ähnlich hohe Werte gemessen, für notwendige geschlossene Messserien war das Eindringen der Sondenspitze des Penetrometers aber durch den hohen Steinbesatz erschwert. Die Widerstände lagen im eingesetzten Gerät oberhalb des möglichen Messbereiches.

Signifikante Unterschiede zwischen den Carbokalkvarianten lassen sich aufgrund der standortbedingten Streuungen nicht nachweisen. Die Werte für die Variationskoeffizienten liegen je nach Tiefe, Variante und Standort zwischen 1 und 77 %. In der Tendenz ist ersichtlich, daß auf den mit Carbokalk gedüngten Varianten die Eindringwiderstände auf einem niedrigeren Niveau liegen als in den Parzellen ohne Carbokalkzufuhr. Dies zeigt sich in der Krume zwischen 20 und 30 cm Bodentiefe am deutlichsten. Ähnliche Ergebnisse ergaben auch die Untersuchungen von STENBERG et al. (2000). Auffällig ist, dass in Variante 2 auf allen Standorten geringere Eindringwiderstände gemessen wurden als in Variante 4. Die Ursache dieser regelmäßigen Kurvenabfolge soll durch nachfolgende Arbeiten geklärt werden.

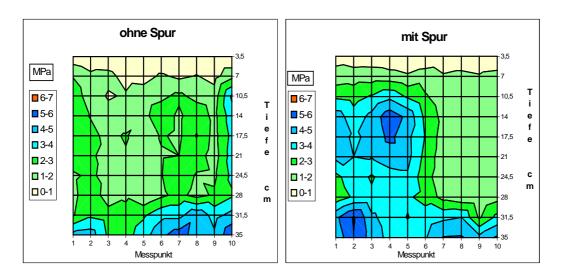
Tabelle 39: Eindringwiderstand (MPa) im Mittel aller vier Standorte relativ, Variante 1 = 100 % in der Bodentiefe von 10,5 bis 31,5 cm

Bodentiefe	Variante 1	Variante 2	Variante 4	
cm	Variante i	Variante 2	Variante 4	
10,5	100	96,4	103,5	
14,0	100	93,6	100,4	
17,5	100	91,8	99,3	
21,0	100	88,3	93,9	
24,5	100	88,2	90,0	
28,0	100	84,4	92,1	
31,5	100	90,2	95,0	

Tabelle 39 zeigt die Mittelwerte der Eindringwiderstände über vier Standorte in der Bodentiefe von 10,5 bis 31,5 cm. In Variante 2 lagen die Werte zwischen 3,5 und 16 % niedriger als in der Null-Variante. Auffällig ist, dass die Eindringwiderstände in Variante 4 höher waren als in Variante 2. In den Tiefen 10,5 bis 14 cm überschritten diese sogar die Werte der Null-Variante. Bis in eine Tiefe von 31,5 cm nahmen die Werte für die Eindringwiderstände um bis zu 10 % ab (im Vergleich zur Nullvariante).

Als Ursache für diese Streuungen kommen z.B. Fahrspuren aus zurückliegenden Jahren, die an der Oberfläche bei der Auswahl der Messbereiche nicht erkennbar waren, in Frage. Das Ausmaß der Fahrspuren kann sehr hoch sein.

Abbildung 42: Eindringwiderstand in MPa von 3,5 bis 35 cm Bodentiefe zweier nebeneinander liegender Parzellen, Standort Manndorf, Mai 1999



Die Abbildung 42 zeigt unmittelbar nebeneinander liegende Parzellen, die auf der Oberfläche keinen Hinweis auf Fahrspuren ergaben. In der rechten Abbildung ist eine deutliche Erhöhung des Eindringwiderstandes im Bereich der Messpunkte 3, 4 und 5 in der Tiefe 14 bis 28 cm zu erkennen. Die Werte deuten auf eine bodenbelastende Fahrspur aus vorangegangenen Jahren hin.

Die **Entwicklung der Wurzeln** ist in hohem Maße davon abhängig, wieweit die Wurzeln beim Vordringen in den Boden Atemluft vorfinden (BOHNE 1991, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998, 2002). DÜRR (1992) weist darauf hin, dass das Wurzelwachstum im dichten Boden durch Luftmangel beeinträchtigt wird. In verdichtetem Boden wird die Pflanzenwurzel daran gehindert, den Boden für eine ausreichende Versorgung mit Wasser, und Nährstoffen zu erschließen (BOONE 1986, ARVIDSSON and HOKANSSON 1991, WAY et al. 2000).

Bei Weizen wird die höchste Wurzeldichte in der Oberkrume – bis 10 cm Bodentiefe – erreicht, wie es zahlreiche Literaturstellen (z.B. REX 1984, WESTING und SÖCHTING 1985) und auch die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen. Der Standorteinfluss ist hoch einzustufen. In tieferen Bodenschichten, bei ca. 22 cm Bodentiefe, ist die Durchwurzelungsdichte bei Carbokalkdüngung in der Tendenz höher. Bodenverdichtungen unter der Bearbeitungsgrenze führen bei Fruchtarten mit Pfahlwurzeln meist zu einem Ertragsrückgang. Die Ursache ist häufig das verminderte Wurzelwachstum. Bei Getreide als Flachwurzler sind Ertragsverminderungen seltener zu erwarten. Die Kornerträge wurden, wie die Ergebnisse zeigen, kaum beeinflusst. Dies lag auch daran, dass im Jahr 1999 die Niederschlagsmenge und -verteilung im angeführten Anbaugebiet sehr günstig waren und kein vorzeitiger Trockenstress auftrat. In Jahren mit geringeren Niederschlagsmengen während der Hauptvegetationszeit könnte sich die intensivere Durchwurzelung auf den mit Carbokalk gedüngten Parzellen auch auf den Ertrag auswirken.

Die mit einer starren Sonde erzielten Messwerte entsprechen nach HORN et al. (1987) und CLARK (2003) nur selten den tatsächlich von Wurzeln aufgebrachten Druck. RUSSEL (1977), WHITELEY et al. (1981), MISRA et al. (1986), RICHARD und GREACEN (1986), BENGOUGH and MULLINS (1990, 1991) und HELAL (1991) sind der Meinung, dass es häufig zu einer Überschätzung des gemessenen Eindringwiderstandes kommt, da spezifische Eigenschaften der Wurzel, wie z. B. die Flexibilität der Wurzelspitze nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Bei Triticale kommt es nach DANNOWSKI (1992) bereist ab einer Lagerungsdichte von 1,5 g/dm³, bei Roggen ab 1,6 g/dm³ zu einer

Verminderung der Wurzelzahl. Die auf den Versuchsflächen in Mannsdorf und Halbturn gemessenen Werte der Lagerungsdichte (1,39 bzw. 1,46 g/dm³, LIEBHARD et al. 2001) waren daher nicht beeinflussend.

Die **hydraulische Leitfähigkeit** wird als Infiltrationsrate definiert, die bei einem hydraulischen Gradienten von 1 auftritt. Die Größe der hydraulischen Leitfähigkeit hängt vom Zustand des Porensystems (u. a. Größenverteilung und Volumenanteil der wassergefüllten Poren) und vom strömenden Fluid ab (BATHKE et al. 1991, BOHNE 1998, FARKAS et al. 2000). Bei gesättigtem Porensystem geht der größte Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit von der Porengrößenverteilung aus.

Eine hohe hydraulische Leitfähigkeit ist für landwirtschaftlich genutzte Böden vorteilhaft. Bei hohen Niederschlagsmengen kann mehr Wasser aufgenommen und in tiefere Bodenschichten abgeleitet werden. In gefährdeten Lagen wird die Erosion vermindert, auf weniger geneigten Flächen versickert das Wasser schneller und überstaut den Boden kaum (LIEBHARD 1995, BODNER 2007). Eine hohe hydraulische Leitfähigkeit verbessert die Wasser- und Nährstoffversorgung der wachsenden Pflanze. Das vorhandene Bodenwasser und die darin gelösten Nährstoffe werden schneller zur Pflanzenwurzel transportiert. Für die Pflanze bedeutet eine niedrigere hydraulische Leitfähigkeit eine geringere Ausnutzung des potentiell verfügbaren Bodenwassers (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

Die angeführten Ergebnisse (Tabelle 33) für die hydraulische Leitfähigkeit sind in ihrem Bereich denen von REX (1984) im gesättigten Zustand ermittelten Werte ähnlich. Die Messdaten im Bereich von 6,3 x 10⁻⁴ bis 14,5 x 10⁻⁴ cm/s werden als hoch bis sehr hoch eingestuft.

Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ergaben sich nur am Standort Halbturn. Auf den Standorten Mannsdorf, Schönfeld und Altlichtenwarth waren die Unterschiede aufgrund der relativ hohen Streuungen nicht absicherbar. HARTGE und HORN (1999) beziehen die Streuungen der Ergebnisse auf strukturbedingte Sekundärporen verschiedener Kontinuität und unregelmäßiger Verteilung. Die texturbedingten Primärporen fallen für die hydraulische Leitfähigkeit in den obersten Bodenschichten kaum ins Gewicht. Die Sekundärporen können jedoch sehr leicht zerstört werden und üben aufgrund ihrer Größe einen starken Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens aus (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998, 2002).

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In einem Langzeitversuch von 1992 bis 1999 wurde auf vier Standorten repräsentativ für das pannonische Produktionsgebiet Österreichs, charakterisiert durch leichte bis mittelschwere Böden mit hohem pH-Wert und unterschiedlichem Kalkgehalt, der Einfluss einer mehrjährigen, zum Teil wesentlich überhöhten Carbokalkdüngung auf das Ertragsverhalten von Getreide, Zuckerrüben, Kartoffel und Saatmais sowie auf die Auswirkungen auf ausgewählte bodenchemische und bodenphysikalische Parameter untersucht.

Die nativen Kalkgehalte der Böden an den Versuchsstandorte lagen zwischen < 0,5 und 14,6 %. Die pH-Werte sind überdurchschnittlich hoch von 7,4 bis 7,7. Die jährlichen Carbokalkdüngermengen betrugen über einen Zeitraum von fünf Jahren 0, 15, 30 und 60 t/ha. Nach Beendigung dieser von 1991 bis 1995 dauernden Aufdüngungsphase wurden insgesamt 0, 75, 150 und 300 t/ha Carbokalk ausgebracht. Je 10 t des im Versuchszeitraum verwendeten Carbokalkes wurden auch 27 kg N, 115 kg P_2O_5 , 11 kg K_2O und 127 kg Mg zugeführt. Danach lag in den Jahren 1996 und 1997 auf den Versuchsflächen die jeweils praxisübliche Fruchtfolge vor. Ab Sommer 1998 und im Jahr 1999 wurden die Versuchsflächen nach einheitlichen Vorgaben bestellt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist bei einer praxisüblichen Carbokalkdüngung von etwa 10 t/ha je Fruchtfolge auch auf Böden mit hohem Kalkgehalt kein vermindertes Pflanzenwachstum bzw. keine Qualitätsveränderung des Erntegutes zu erwarten.

Bei **Getreide** (Winterweizen, Sommergerste und Sommerdurum) bewirkte die Düngung mit Carbokalk bei elf von zwölf Versuchsergebnissen gleich bleibende und in den meisten Jahren steigende Erträge, wovon drei Ertragszuwächse signifikant waren. Nur in einem Versuchsjahr auf einem Standort zeigte sich ein tendenzieller Ertragsrückgang, der jedoch nicht signifikant war. Entsprechend den Erträgen reagierten auch die Stickstoffentzüge je Hektar.

Zuckerrübe reagierte in vier von fünf Versuchsjahren mit Zuwächsen im Rüben- und Zuckerertrag auf die Carbokalkzufuhr, in einem davon signifikant. Nur in einem Versuchsjahr verminderte sich der Zuckerertrag signifikant aufgrund des hohen Stickstoffangebotes.

Die Erträge von **Saatmais** und **Kartoffel** wurden durch die Ausbringung von Carbokalk nicht negativ beeinflusst und zeigten in den vier Versuchsjahren bei unterschiedlich hohen Carbokalkdüngermengen keine signifikanten Ertragsänderungen. Mit Erhöhung der Carbokalkdüngermenge nahm auch der Stickstoffentzug zu.

Die aufgrund der Literaturergebnisse erwarteten Veränderungen bei ausgewählten bodenchemischen Parametern traten nur zum Teil ein.

Der **pH-Wert** im Oberboden wurde bei den Standorten mit hohem bis sehr hohem Kalkgehalt (> 1,5 %) durch Carbokalkzufuhr nicht erhöht, nur bei einem nativen Kalkgehalt kleiner 0,5 % stieg der pH-Wert von 7,4 auf 7,7 bei der praxisunüblichen höchsten Ausbringungsmenge an.

Auch die Gehalte an den bedeutendsten Makro- und Mikronährstoffen wurden durch die steigenden Carbokalkmengen nicht negativ verändert. Die Gehalte an **Phosphor** stiegen, von einer beinahe einheitlich mittleren Versorgungsstufe "C" ausgehend, mit steigenden Carbokalkeinsatz auf Stufe "E" (>174 mg/1000 g Boden) an. Die Versorgung mit **Kalium** wurde durch den Einsatz von Carbokalk nicht verändert.

Zu einer generellen Erhöhung kam es im Fall der **austauschbaren Kationen** nur bei Magnesium (bis zu 2 cmol+/1000 g Boden).

Bei den gewählten Düngungs-Intensitäten von über 150 t/ha Carbokalk gingen die pflanzenverfügbaren Mengen an **Eisen** und **Mangan** von Versorgungsstufe "E" auf "C" zurück. Die pflanzenverfügbaren Gehaltswerte bei **Kupfer**, **Zink** und **Bor** blieben bei unterschiedlichen Carbokalkdüngermengen unverändert. Selbst in der höchsten

Düngungsstufe konnte damit keine Gefährdung der Versorgung mit Spurenelementen festgestellt werden.

Eine Verbesserung bodenphysikalischer Kennwerte konnte im relativ kurzen Beobachtungszeitraum von acht Jahren festgestellt werden. Von den untersuchten bodenphysikalischen Werten wurden einige Parameter messbar beeinflusst. Eine Strukturstabilisierung zeigte sich durch verminderte **Eindringwiderstandswerte** in den Varianten mit Carbokalk, insbesondere in einer Bodentiefe von 15 bis 20 cm. Die Werte der Varianten mit Carbokalkdüngung lagen im Mittel um bis zu etwa 15% unter jenen der Variante ohne Kalkapplikation.

Die Regenverdaulichkeit - beurteilt an der **hydraulischen Leitfähigkeit** – zeigt bei Carbokalkdüngung günstigere Werte. Im Mittel der Standorte stieg die hydraulische Leitfähigkeit von 6,75 cm/sec x 10⁻⁴ in der Nullvariante auf 9,76 cm/sec x 10⁻⁴ bei Zufuhr von Carbokalk.

Parallel zu diesen Messungen erhöhte sich die **Durchwurzelungsintensität** – beurteilt an, mit Hilfe eines Wurzelbohrers gewonnenen, Bohrkernen - signifikant um bis zu 18 % auf zwei Standorten, wobei die Anstiege von 75 auf 150 t/ha Carbokalk am größten waren. Auf den beiden weiteren Standorten konnte diese Zunahme nur in der Tendenz nachgewiesen werden.

Obwohl es zur Entwicklung einer guten Bodenstruktur mehrere Jahre dauert, konnte in diesen Versuchen nach wenigen Jahren der Carbokalkanwendung eine Verbesserung der Bodenstruktur nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Carbokalk auch auf kalkhältigen Böden zum Ansteigen der Gehaltswerte an Phosphor, Magnesium und Stickstoff führt. Für einen praxisgerechten Einsatz dieses Düngemittels ist die Ausbringmenge auch nach diesen Nährstoffen zu bemessen.

Summary

In long-term field trials carried out between 1992 and 1999 the influence of an excessive application of Carbonation lime over several years (in total 0, 75, 150, 300 t/ha Carbonation lime) on yield as well as on selected chemical and physical soil parameters was determined. The four trial sites, representative for the Pannonian production region of Austria were characterized by light to medium soils with high pH values but different lime content. Yield performance of cereals, sugar beet, potato and maize seed was studied.

The native lime content of soils at the trial sites ranged from < 0.5 to 14.6%. The pH values ranging from 7.4 to 7.7 were higher than the average. 0, 15, 30 and 60 tons/ ha of Carbonation lime was the annual amount of application lasting for a period of five years. At the end of this period (1991 to 1995) 0, 75, 150 and 300 tons/ ha Carbonation lime were applied at total. With 10 t of the Carbonation lime used in the trials 27 kg N, 115 kg P_2O_5 , 11 kg K_2O and 127 kg Mg were added, too. From 1996 and 1997 onwards, the experimental plots followed the usual crop rotation. From summer 1998 onwards the experimental plots were managed in accordance with uniform defaults.

Following the results of these trials, at a conventional level of carbonation lime application of approximately 10 t/ha per crop rotation even on soils with high lime content no decrease in plant growth nor in quality has to be expected.

For **cereals** (winter wheat, spring barley and spring wheat) fertilization with Carbonation lime showed in eleven of twelve test consistent, respectively in most of the years increasing yields. Three of these were significant. Only one trial showed in tendency a decreasing yield. The decrease was not significant. The nitrogen removal per hectare responded to the achieved yields.

Sugar beet responded to Carbonation lime application in four of five experimental years with increases in beet and sugar yield, one of them significant. Only in one trial sugar yield decreased significantly due to the high nitrogen supply.

The yields of **seed corn** and **potatoes** were not adversely affected by the application of Carbonation lime and demonstrated in the four experimental years at different heights of Carbonation lime no significant yield variations. With the increase of the amount of Carbonation lime nitrogen removal raised accordingly.

Changes in selected chemical soil properties expected in accordance with results from literature have been observed only partially.

The **pH value** of the topsoil was not increased by Carbonation lime application at the sites with high or very high lime content (> 1.5%). Only in case of a native lime content less than 0.5% the pH increased from 7.4 to 7.7 in the highest but unusual application rate.

The content of the most important macro and micro nutrients were not negatively influenced by the rising amounts of Carbonation lime. The content of **phosphorus** rose, starting from an almost uniform middle supply (level "C") to level "E" (> 174 mg/1000 g soil). The supply of **potassium** was not changed. In case of **exchangeable cations**, a general increase occurred only in the content of magnesium with up to 2 cmol + / 1000 g soil.

For the chosen fertilization intensities of over 150 tons / ha Carbonation lime the plant-available amounts of **iron** and **manganese** were reduced from level "E" to level "C". The plant-available contents of **copper**, **zinc** and **boron** remained unchanged. Even at the highest rate of fertilization no endangerment of the trace element supply could be determined.

An improvement in physical soil properties could be detected in the relatively short observation period of eight years. Some of the examined physical soil parameters were measurably affected. Results show a stabilization of soil structure by a decreasing **penetration resistance** in plots with Carbonation lime, in particular in a soil depth from 15 to 20 cm. On average, resistance was reduced by approximately 15%.

Application of Carbonation lime induced - characterised by the **hydraulic conductivity** - an increased rate of water uptake by the soil. On average, the hydraulic conductivity rose from 6,75 cm/sec x 10⁻⁴ in plots without to 9,76 cm/sec x 10⁻⁴ in plots with Carbonation lime.

For two sites a significant increase in **rootability** of up to 18% could be observed. Increases between 75 and 150 t/ha of Carbonation lime were the largest. For the two other sites no trend can be reported at all.

Although it takes some more time to develop good soil structure, it was possible to show an improvement within in the few years of this investigation. The results show that the use of Carbonation lime results in an increase of phosphorus, magnesium and nitrogen even on calcareous soils. For a practical use the application rate for Carbonation lime should be calculated by the content of these nutrients.

8 Literaturverzeichnis

- AFIF, E., MATAR, A. and TORRENT, L. (1993): Availability of phosphate applied to calcareous soils of West Asia and North Africa. Soil science Society of America Journal 57, 756-760.
- AGRANA Tulln (2005): Verfahrensbeschreibung. Grundlegende Beschreibung Rübenlabor.
- AMBERGER, A. (1983): Kalken mit Carbokalk. Aus der Sicht der Pflanzenernährung. DLG-Mitteilungen 2/1983, 80-82.
- AMBERGER, A. (1988): Pflanzenernährung. 3. überarbeitete Auflage. Eugen Ulmer Verlag , Stuttgart.
- AMBERGER, A. (1996): Pflanzenernährung. 4. überarbeitete Auflage. Eugen Ulmer Verlag , Stuttgart.
- AMBERGER, A. und GUTSER, R. (1982): Carbonatationskalk, ein Rückstandskalk aus der Zuckerfabrikation. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 59, 1982.
- AMOOZEGAR, A. und WARRICK, A.W. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods. In: Methods of soil analysis, Part 1, KLUTE, A. (Ed.) Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI. S. 735-770.
- ARVIDSSON J. and HOKANSSON, I. (1991): A model for estimating crop yield losses caused be soil compaction. Soil Tillage Research 20, 319-332.
- ARVIDSSON, J. (2000): Chapter III: Properties. In. HORN, R., J.J.H. van Akker and J. ARVIDSSON (Eds.): Subsoil compaction. Advances in GeoEcology 32, 202-204. Catena Verlag Reiskirchen.
- ARYA, L.M., DIEROLF, T.S., SOFYAN, A., WIDJAJA-ADHI, I.P.G. and GENUCHTEN van, M.Th. (1998): Field measurements of the saturated hydraulic conductivity of a macro porous soil with unstable subsoil structure. Soil Science Vol. 163, No. 11, 841–852.
- ASAE-STANDARD (1985): ASAE S 313.2, Soil cone penetrometer. American Society if Agricultural Engineers (ASAE), 2950 Niles Road, St. Joseph, Michigan, 49085-9659.
- BACHTHALER, G., SOMMER, G. und STRITESKY, A. (1975): Die Aufkalkung saurer Urgesteinsböden aus der Sicht des Kartoffelbaues. Landwirtschaftliche Forschung 28, 2, 135-146.
- BAREKZAI, A. (1984): Alterung von wasserlöslichem Phosphat untersucht in Gefäß- und Modellversuchen. Dissertation Fachbereich Ernährungswissenschaften, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- BAREKZAI, A. und MENGEL, K. (1985): Alterung von wasserlöslichem Düngerphosphat bei verschiedenen Bodentypen. Zeitschr. f. Pflanzenernährung u. Bodenkunde 148, 365-378.
- BATHKE, G.R., AMOOZEGAR, A. and CASSEL, D.K. (1991): Description of soil pore size distribution with mean weighted pore diameter and coefficient of reniformity. Soil-science (USA),152, 82-86.
- BECHER, H.H. und SCHWERTMANN, U. (1973): Der Einfluss einer Kalkung auf die Aggregatstabilität und Eindringwiderstand zweier Lößböden. Zeitschr. f. Pflanzenernährung u. Bodenkunde 136, 120-129.
- BENGOUGH, A.G. and MULLINS, C.E. (1990): Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science, 41, 341-358.
- BENGOUGH, A.G. and MULLINS, C.E. (1991): Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. Plant and Soil, 131, 59-66.

- BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. 3.Auflage, Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart.
- BERGMANN, W. und NEUBERT, P. (1976): Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. VEB Gustav Fischer Verlag Jena.
- BFL (Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Wien) (1997): Analyseergebnisse auf Makro- und Mikronährstoffe von Carbokalk.
- BFL (Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Wien) (1999): Analyseergebnisse zur Phosphatlöslichkeit von Carbokalk.
- BLASL, S. und BACHLER, W. (1982): pH-bedingte Pflanzentoxizität und Kalkwirkung. Die Bodenkultur. 33.16-40.
- BODNER, G. (2007): Cover cropping in water limited environments. A field and modelling study of hydrological and soil structural effects of cover crops and their impact on the water balance. Phd Thesis, Universität für Bodenkultur, Wien.
- BOHNE, H. (1991): Der Einfluss künstlicher vertikaler Grobporen in einer verdichteten Bodenmatrix auf das Wachstum von Winterweizen. I. Wachstum auf einer Parabraunerde aus Löß. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, 27-32. II. Wachstum in einem primären Pseudogley. 154, 63-68.
- BOHNE, K. (1998): Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens. In: Handbuch der Bodenkunde. BLUME H.P. et al. (Hrsg.). 4. Ergänzungslieferung 5/98. Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- BOONE, F.R. (1986): Towards soil compaction limits for crop growth. Neth. Journal Agric. Sci. 34, 349-360.
- BRONNER, H. (1976): Kenndaten des pflanzenverfügbaren Bodenstickstoffs in Beziehung zum Wachstum der Zuckerrübe. Die Bodenkultur 27, I.Teil 18-59 und II. Teil 120-161.
- BRUSSAARD, L. and FAASSEN van, H.G. (1994): Effects of compaction on Soil Biota and Soil Biological Processes. Chapter 10. In: SOANE B.D. and C. van OUWERKERK (Eds.): Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Science B. V.
- BUCHER, R. (1970): Der Einfluss verschiedener Düngerphosphate und des Bodenkarbonatgehaltes auf die Ergebnisse verschiedener Extraktionsverfahren zur Ermittlung der wirksamen P-Vorräte im Boden. Landw. Forschung 23, Sonderheft 25/1, 113–127.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasser (2006): Richtlinien für die Sachgerechte Düngung. 6. Auflage.
- BURG, P.F.J. van, HOLMES, M.R.Y. and DILZ, K. (1983): Nitrogen supply from fertilizers and manure: Its effects on yield and quality of sugar beet. IIRB- Kongress 1983 Brüssel, 189-282.
- BÜRCKY. K. (1979): Physiologische Aspekte des Stickstoffumsatzes der Zuckerrübe. I. Verknüpfung zwischen Stickstoff- und Kohlenstoff-Stoffwechsel. Zuckerindustrie 104, 1039-1043.
- CANNEL, R.Q., DAVIES, D.B., MACKNEY, D. and PIDGEON, J.D. (1978): The suitability of soils for sequential direct drilling of combine harvested crops in Britain; a provisional classification. Outlook Agric., 9, 306-316.
- CEC (Commission of the European Communities) (1985): Soil Map of the European Communities 1: 1 000 000. Directorate-General for Agriculture, Coordination of Agricultural Research, Luxembourg.
- CHRISTENSON, D.R, BRIMHALL, P.B., HUBBELL, L. and BRICKER, C.E. (2000): Yield of Sugar Beet, Soybean, Corn, Field Bean and Wheat as affected by Lime Application on Alkaline Soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 31, 9 & 10, 1145-1154.

- CLARK, L.J., WHALLEY, W.R. and BARRACLOUGH, P.B. (2003): How do roots penetrate strong soils? Plant and Soil, 255, 93–104.
- CLARKSON, D. T. (1974): Ion transport and cell structure in plants. McGraw Hill, London.
- CLARKSON, D. T. and SANDERSON, J. (1978): Sites of absorption and translocation of iron in barley roots. Tracer and microautoradiographic studies. Plant Physiol. 61, 731–736.
- DANNOWSKI, M. (1992): Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen- und Triticalegenotypen in Abhängigkeit von der Bodenlagerungsdichte. J. Agronomy & Crop Science 168, 169-180.
- DANNOWSKI, M. und WERNER, A. (1997): Die Bedeutung der Pflanzenwurzeln bei der ökologischen Beurteilung des Bodengefüges im Labor und in der Landschaft. Die Bodenkultur 48(2), 73–88.
- DELGADO, A. and TORRENT, J. (2000): Phosphorus Forms and Desorption Patterns in Heavily Fertilizied Calcareous and Limed Acis Soils. Soil Science Society of America Journal 64, 2031-2037.
- DELGADO, A., MADRID, A., KASSEM, S., ANDREU, L., and M. del CARMEN del CAMPILLO (2002): Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. Plant and Soil 245, 277-286.
- DELLER. B. (1979): Einfluss von Kalkung und langjährig hoher Phosphatdüngung auf die Phosphatformen und die Phosphatmobilität in einigen Ackerböden Bayerns. Dissertation Fachbereich Landwirtschaft und Gartenbau, Technische Universität München.
- DELLER. B. (1981): Zur Bestimmung der Phosphatvorräte carbonathältiger Böden mittels CAL-Extraktion. Mitt. der VDLUFA, Heft 1-2, 20-21.
- DELLER und TEICHER (1980): Ermittlung der Auflösungsraten verschiedener Kalkarten. Unveröffentlichter Bericht, Weihenstephan.
- DERSCH, G. und HÖSCH, J. (2003): Optimaler pH-Wert der Ackerböden durch Kalkung. Der Fortschrittlicher Landwirt, Heft 15, 14-16.
- DEXTER, A.R. (1986): Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. Plant and Soil 95, 123–133.
- DRAYCOTT, A.P. (1993): Nutrition. In "The Sugar beet Crop". Edited by D.A. Cooke and R.K. Scott. Chapman&Hall.
- DRAYCOTT, A.P., DURRANT, M.J. and. LAST, P.J. (1971): Effects of cultural practices and fertilizers on sugar beet quality. Sonderdruck IIRB 5,169-185.
- DÜRR, H. J. (1992): Auswirkungen von Bodengefügeänderungen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag unter besonderer Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes. Dissertation, Agrarwissenschaftliche Fakultät der Christian Albrecht Universität, Kiel.
- DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation, Universität Gießen.
- EDELMANN, M. und SCHRÖDER, D. (1987): Kalkdüngung zur Verbesserung des Nährelementgehaltes in Waldböden und zur Verminderung der neuartigen Waldschäden. VDLUFA-Schriftenreihe, 23. Kongressband 1987, 547–558.
- EDWARDS, W.M., NORTON, L.D., REDMOND, C.E. (1988): Charcterizing macropores that affect infiltration into a notilled soil. Soil Soc. Sci. Am. J. 52, 483-487.
- EHLERS, W. (1983): Bodenphysikalische Forschung in der BRD. Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft 38, 5-28.
- EHLERS, W. (1996): Methode zum Studium der Wurzelentwicklung der Zuckerrübe. 59. IIRB-Kongress, Brüssel.

- EHLERS, W., KÖPKE, U., HESSE, F. u. BÖHM, W. (1983): Penetration resistance and rooth growth of oats in tilled and untilled loess soil. Soil & Tillage Research, 3, 261-275.
- EITZINGER, J. (1991): Einflüsse unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Diss.,Universität f. Bodenkultur Wien, 1991.
- FARKAS, Cs., GYURICZA, Cs., LÀSZLÓ, P. and BIRKÁS, M. (2000): Study of the Influence of Soil Tillage an Soil Water Regime. In. HORN, R., J.J.H. van Akker and J. ARVIDSSON (Eds.): Subsoil compaction. Advances in GeoEcology 32, 251-257. Catena Verlag Reiskirchen.
- FEGER, K.-H. (1996): Schutz vor Säuren. In: Handbuch der Bodenkunde. BLUME H.P. et al. (Hrsg.). 1. Ergänzungslieferung 12/96. Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- FINCK, A. (1992): Dünger und Düngung. 2. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- FRÜCHTENICHT, K. (1986): Ermittlung der Wurzeldichte und Durchwurzelungstiefe mit einer Bruchflächenmethode. VDLUFA- Schriftenreihe, 20, Kongressband.
- GARDNER, W. (1972): Soil physics. Joh Wiley and Sons, Canada.
- GERTH, A. (1973): Die Auswirkungen einer Kalkdüngung im Boden. Landwirtschaftliche Forschung 26,1, 1973, 26-36.
- GAESE, D., MUSHTAG, M. A. und SCHLICHTING, E. (1971): Wirkung einer Meliorationskalkung in lehmigen Böden der Braunerde-Gruppe. Landwirtschaftliche Forschung 24, 1971, 316 327.
- GEISLER, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Berlin/Hamburg: Verlag Paul Parey.
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau. 2. Neubearbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg.
- GERZABEK, M. (1987): Die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium. Dissertation Universität für Bodenkultur, Wien.
- GERZABEK, M. (1988): Die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium. Teil II: Beziehung zwischen dem Magnesiumgehalt des Bodens und dem Pflanzenentzug. Die Bodenkultur 39, 207-216.
- GERZABEK, M. und SCHAFFER, K. (1989): Der Einfluss von Kaliumdüngung und Kalkung auf die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium. Die Bodenkultur 40, 13-24
- GLATTKOWSKI, H. und MÄRLÄNDER, B. (1995): Zur Frage der Beeinflussbarkeit von Ertrag und Qualität beim Anbau von Zuckerrüben durch pflanzenbauliche Maßnahmen Teil 2: Errechnete Qualitäts- und Ertragsparameter. Zuckerindustrie 120 (8), 668–674.
- GRAHAM, R.D., ASCHER, J.S. and HYNES, S.C. (1992): Selecting zinc-efficient cereal genotypes for soils low in sinc status. Plant and Soil 146, 241–250.
- GRASS, K. und BUDIG, M. (1976): Kalkwirkung in Ackerlandversuchen. Landwirtschaftliche Forschung, Sonderheft 33/I, Kongressband 1976.
- GRASS, K. und HEYN, J. (1980): Ergebnisse von Feldversuchen mit Phosphatformen- und Kalkdüngung. Landwirtschaftliche Forschung, 33, 2-3, 1980, 152-165.
- GRIMES, D.W., MILLER, R.J. u. WILEY, P.L. (1975): Cotton and corn root development in two field soils of different strength characteristics. Agronomy Journal, 67, 519-523.
- GRUBER, P. (1988): Bodenstruktur und Ertrag. Der Förderungsdienst, Heft 6/1988.
- GUTSER, R. (1983): Zur Nährstoffwirkung von Carbokalk. Die Zuckerrübe, 32,129-131.

- GUTSER, R. (1984): Wirkung und Verwertungsmöglichkeiten von Carbokalk. Wintertagung der Österreichischen Gesellschaft für Land- und Forstwirtschaftspolitik, S. 64–70.
- HABY, V.A., RUSSELLE, M.P. and EARL O. SKOGLEY (1990): Testing Soils for Potassium, Calcium and Magnesium, Chapter 8. In: WESTERMANN, R.L. (ed.): Soil Testing and Plant Analysis, 3rd ed. Soil Science Society America (SSSA) Book series, No. 3., 181-227
- HAFNER, C. und GUTSER, R. (1998): Kalkdüngung unter besonderer Berücksichtigung von Carbokalk. Zuckerrübe 47 (4), 196-198.
- HAN, X.Z., TANG, C., SONG, C.Y., WANG, S.Y. and QIAO, Y.F. (2005): Phosphorus characteristics correlate with soil fertility of albic luvisols. Plant and Soil, 270, 47-56.
- HARRACH, T., WERNER, G. und WOURTSAKIS, A. (1972): Wirkung des Kalkes auf Gefügeeigenschaften einer Parabraunerde in einem polyfaktoriellen Tiefenbearbeitungsund Kalkungsversuch. Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft 15, 1972.
- HARTGE, K. H. (1978): Einführung in die Bodenphysik. 2., überarbeitete Auflage. F. Enke Verlag Stuttgart.
- HARTGE, K. H. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer und Schachtschabel. 14. Auflage. Kap. XIV XIX, F. Enke Verlag Stuttgart.
- HARTGE, C. und BOHNE, H. (1985): Ziele und Mittel der bodenphysikalischen Untersuchung von Kulturflächen. VDLUFA-Schriftenreihe, 16. Kongressband, 275–280.
- HARTGE, K.H. und EHLERS, W. (1985): Zur Wirkung physikalischer Bodeneigenschaften auf den Ertrag von Kulturpflanzen. KALI-Briefe (Büntehof) 17 (6), 477–488.
- HARTGE, K. H. und HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3., überarbeitete Auflage. F. Enke Verlag Stuttgart.
- HAUTER, R. (1983): Phosphatmobilisierung in Abhängigkeit vom pH des Bodens unter besonderer Berücksichtigung der Rhizosphäre. Dissertation Universität Gießen.
- HEIN, W., RÖSNER, G. und POLLACH, G. (2007): Reduzierung von Prozesshilfsstoffen Entwicklungen bei Agrana/Zuckerforschung Tulln. Sugar Industry / Zuckerindustrie 132, No. 2, 91–99.
- HELAL, M.H (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. Zeitschr. f. Pflanzenernährung u. Bodenkunde 154, 403-407.
- HIMMELBAUER, M.L., LOISKANDL, W., KASTANEK, F. (2004): Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analysis systems. Plant Soil 260. 111-120.
- HINSINGER, P., PLASSARD, C., TANG, C. and JAILLARD, B. (2003): Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. Plant and Soil 248, 43-59.
- HORN, R. (1984): Die Vorhersage des Eindringwiderstandes von Böden anhand von multiplen Regressionsanalysen. Zeitschr. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung. 25, 377-380.
- HORN, R., STORK, J. und DEXTER, A.R. (1987): Untersuchung über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. Zeitschr. f. Pflanzenernährung u. Bodenkunde 150. 342-347.
- HORN, D. und BECKER, K.-W. (2004): Ermittlung des Kalkstatus von Böden durch die direkte Calciummessung mittels Elektro-Ultrafiltration (EUF). Proceedings of the 67th IIRB Congress, February 2004 Brüssel.

- HÖSCH, J. und G. DERSCH (1997): Der internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Wien nach neun Versuchsjahren. Arch. Acker-Pfl. Boden 42, 67–77.
- IRION, H. (1979): Carbonatationskalk ein Düngemittel der Zuckerindustrie. Zuckerindustrie 104,920-922.
- IRION, H. (1988): Nährstoffzusammensetzung und Wirkung von Carbokalk auf Boden und Pflanze. IIRB, Mannheim, 1988.
- JABRO, J.D. (1988): Spatial Variability of field-saturated hydraulic conductivity and simulation of water flow from a percolation test hole in layered soils. Ph.D. Thesis. The Pennsylvenia State University, University Park, PA.
- JABRO, J.D. (1996): Variability of field-saturated hydraulic conductivity in a Hagerstown soil as affected by initial water content. Soil Science 161, No. 11, 735–739.
- JANIK, V. und SCHACHL, R. (1973): Bodenkundliche und pflanzenbauliche Ergebnisse aus Kalkdüngungsversuchen. Die Bodenkultur, 24, 31-39.
- JOHNSTON, A.E., GOULDING, K.W.T., POULTON, P.R. and CHALMERS, A.G. (2001): Reducing fertilizer inputs: Endangerig arable soil fertility? Proceeding No. 487. The International Fertiliser Society, York, UK. 34-43.
- KAPE, E. und HOFHANSEL, A (1996): Die Kalkung Grundlage für einen erfolgreichen Ackerbau. Zuckerrübe 45, 1996.
- KEERTHISINGHE, G. und MENGEL, K. (1979): Phosphatpufferung verschiedener Böden und ihre Veränderung infolge Phosphatalterung. Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft 29, 217-230.
- KESSEL, v. W.C. (1982): Der Einsatz von Carbokalk als Bodenverbesserungs- und Düngemittel. IIRB-Kongreß.
- KESSEL, v. W.C. (1991): Zuckerrüben verlangen eine angepasste Nährstoffversorgung. Zuckerrübe 40 (1), 10–16.
- KESSEL, v. W.C. (1993): Kalk im Zuckerrübenbetrieb. Zuckerrübe 42, (5), 310–313.
- KESSEL, v. W.C. (1994): Carbokalk Ein preiswertes Düngemittel mit vielen guten Eigenschaften. Zuckerrübe 43, (6), 339–340.
- KINZEL, H. (1982): Pflanzenökologie und Mineralstoffwechsel. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- KLUTE, A. and DIRKSEN, C. (1986): Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Methods of soil analysis, Part 1, KLUTE, A. (Ed.) Agronomy No. 9, ASA, Madison, WI. S. 687–734.
- KÖPKE, U. (1981): A Comparison of Methods for Measuring Root Growth of Field Crops. Z. f. Acker- und Pflanzenbau 150, 39–49.
- KUNTZE, H. ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer.
- KUNTZE, H. (1996): Bodenkultivierung, Bodenmelioration. In: Handbuch der Bodenkunde. BLUME H.P. et al. (Hrsg.). Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- KÜCKE, M. und SCHMID, H. (1989): Wurzelwachstum von Zuckerrüben auf Sand-, Lehmund Tonstandorten. VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongressband 1988, Teil II, 313-326.
- LARSON, W.E., EYNARD, A., HADAS, A., and LIPIEC, J. (1994): Control and Avoidance of Soil Compaction in Practice. Chapter 25. In: SOANE B.D and C. van OUWERKERK (Eds.): Soil Compaction in Crop Production. Elsevier Science B. V.

- LEHNARDT, F. (1998): Einfluss der Kalkung und Düngung auf den Ionenaustausch und die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung am Beispiel von vier Waldstandorten im Hessischen Bergland. Zeitschrift f. Pflanzenernährung und Bodenkunde 161, 1998.
- LIEBHARD, P. (1995): Effekte langjähriger unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte Bodenkennzahlen und das Ertragsverhalten von Winterweizen, Mais und Zuckerrübe im semihumiden Ackerbaugebiet Oberösterreichs. Habilitationsschrift., Universität f. Bodenkultur Wien.
- LIEBHARD, P., EITZINGER, J. und KLAGHOFER, E. (1995): Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). Die Bodenkultur, 46, Heft 1.
- LIEBHARD, P., FERTSAK, S. und WASNER, J. (2001): Einfluss einer unterschiedlich hohen Carbokalkdüngung auf Ackerböden mit hohem pH-Wert auf ausgewählte bodenchemische und –physikalische Parameter. Mitt. Ges. Pflanzenbauwissenschaften 13 (2001), 222–223.
- LOCH, J. und JÁSZBERÉNYI, I. (1995): Untersuchung der Phosphatadsorption und desorption in Dauerdüngungsversuchen. Agribiol. Res. 48, 53-62.
- MÄRLÄNDER, B. (1983): Ertrag und Qualität von Zuckerrüben bei Stickstoffdüngung nach Nmin. IIRB-Kongress 1983, Brüssel, 331-344.
- MÄRLÄNDER, B. (1991): Produktionssteigerung bei Zuckerrüben als Ergebnis der Optimierung von Anbauverfahren und Sortenwahl sowie durch Züchtungsfortschritt. Habilitationsschrift des Fachbereichs Landwirtschaft der Georg-August-Universität Göttingen.
- MARSCHNER, H. (1995): Mineralnutrition of Higher Plants. Second Edition. Academic Press.
- MAYER, K. und DERSCH. G. (2008): Einfluss von Kalkmenge und –art auf die pH-Wertentwicklung eines vierjährigen Kalkdüngungsversuches. Tagungsbericht 63. ALVA-Tagung, Raumberg-Gumpenstein.
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag, Jena, 7. Auflage.
- MENGEL, K. and KIRKBY, E.A. (1982): Principles of plant nutrition. 3rd Edition, International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- MENGEL, K. and KIRKBY, E.A. (2001): Principles of plant nutrition. 5th Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- MISRA, R.K., DEXTER, A.R. und ALSTON, A.M. (1986): Penetration of soil aggregates of finite size. II. Plant roots. Plant and Soil 94, 59-85.
- MÜLLER, A. (1993): Auswirkungen mechanischer Bodenbelastungen auf bodenphysikalische Kenngrößen, Wurzelentwicklung und Nährstoffaufnahme. Dissertation Fachbereich Agrarwissenschaften, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- MÜLLER, H. J. (1983): Versuchsergebnisse über Stickstoff-Bodenuntersuchung, Auswirkung der Stickstoffdüngung im Boden und von Bodenverhältnissen auf Stickstoffwirkung und Nährstoffentzug. IIRB-Kongress 1983, Brüssel, 155-168.
- MÜLLER, H. J. (1988): Bodenuntersuchung aus der Sicht der Landwirtschaft. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft. Heft 36. 39–52.
- MUNK, H. und REX, M. (1986): Zur Eichung chemischer Bodenuntersuchungsmethoden auf Phosphat an mehrjährigen Feldversuchen. VDLUFA-Schriftenreihe 20, Kongreßband, 275 297.

- MURER, E., KLAGHOFER, E. und SCHWARZ, J. (1991): Ein EDV-Programm zur Auswertung der Eindringwiderstände aus Penetrometermessungen. Wasser und Boden 8, 495-499.
- ÖNORM L 1087 (1993): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung von pflanzenverfügbarem Phosphat und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Methode, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1089 (1993): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung von EDTAextrahierbarem Fe, Mn, Cu und Zn, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1081 (1999): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung des org. Kohlenstoffs durch Nassoxiditation, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1083 (1999): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung der Acidität (pH-Wert), Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1084 (1999): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung von Carbonat, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1090 (1999): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung von pflanzenverfügbarem Bor, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1086-1 (2001): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung der austauschbaren Kationen und der effektiven Kationen-Austauschkapazität (KAK_{eff}) durch Extraktion mit Bariumchloridlösung, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1086-2 (2001): Chemische Bodenuntersuchung, Bestimmung der austauschbaren Kationen und der potentiellen Kationen-Austauschkapazität (KAK_{pot}) durch Extraktion mit gepufferter Bariumchloridlösung, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM L 1092 (2005): Chemische Bodenuntersuchung, Extraktion wasserlöslicher Elemente und Verbindungen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖSTERREICHISCHE BODENKARTIERUNG (1972): Kartierungsbereich Marchegg, Niederösterreich, KB 6, Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000, herausgegeben vom BM für Land- und Forstwirtschaft, Wien
- ÖSTERREICHISCHE BODENKARTIERUNG (1982): Kartierungsbereich Neusiedl am See Mitte, Burgenland, KB 90, Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000, herausgegeben vom BM für Land- und Forstwirtschaft, Wien
- ÖSTERREICHISCHE BODENKARTIERUNG (1993): Kartierungsbereich Groß Enzersdorf, Niederösterreich, KB 7, Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000, herausgegeben vom BM für Land- und Forstwirtschaft, Wien
- ÖSTERREICHISCHE BODENKARTIERUNG (1997): Kartierungsbereich Poysdorf, Niederösterreich, KB 146, Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000, herausgegeben vom BM für Land- und Forstwirtschaft, Wien
- ÖZVG (2002): Österreichisches Zuckerrübenanbaugebiet. http://www.ruebenbauern.at/oezvg [zitiert am 6.5.2009]
- PAIGE, G.B. and HILLEL, D. (1993): Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. . Soil Science Vol. 155, No. 3, 175–189.
- PARFITT, R.L. (1978): Anion adsorption by soil and soilmaterials. Adv. Agron. 30, 1-50.
- PHILLIPS, R.E u. KIRKHAM, D. (1962): Soil compaction in the field and corn growth. Agron. Journal., 54, 29-34.
- POEL van der, P.W., SCHIWECK, H. and SCWARTZ, T. (1998): Sugar Technology. Verlag Dr. Albert Bartens KG Berlin.

- REHM, G. W. und SORENSEN, R. C. (1985): Effects of potassium and magnesium applied for corn grown on an irrigated sandy soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 1446-1450.
- REYNOLDS, W. D. (1993): Saturated hydraulic conductivity: Field measurements. In: Soil sampling and methods of analysis. M.R.Carter (Ed.) Canad. Soc. Soil. Sci. Lewis Publishers, Ann Arbor, MI, S. 599-613
- REYNOLDS, W.D. und ELRICK, D. (1985): In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and a-Parameter using the GUELPH-Permeameter. Soil Science Vol. 140, No. 4, 292–301.
- REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. and TOPP, G.C. (1983): A Reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. Soil Science Vol. 136, No. 4, 250–268.
- REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. and CLOTHIER, B.E (1985): The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow. Soil Science Vol. 139, No. 2, 172–180.
- REX, M. J. (1984): Der Einfluss der Durchwurzelbarkeit des Bodens auf den Ertrag und den Nährstoffentzug von Getreide. Dissertation, Fachbereich Angewandte Biologie und Umweltsicherung der Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- REX, M. und MUNK, H. (1988): Vergleich von P-CAL und P-H₂O aus Routine-Bodenuntersuchungen zur Frage der Umrechnung von Daten aus unterschiedlichen Bodenuntersuchungsmethoden. VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongressband 1988, Teil II, 1291-1301.
- RICHARDS, B.G. und GREACEN, E.L. (1986): Mechanical stress on an expanding cylindrical root analogue in granular media. Aust. J. Soil Research 24, 393–404.
- RÖSSNER, H. (1986): Kationen- und Anionenmuster in Crassulaceen unter besonderer Berücksichtigung des Calciumstoffwechsels. Dissertation Universität Wien.
- RUSSEL, R.S. (1977): Plant root systems, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.
- SCHAFFER, G. und MOSEBACH, D. (1972): Einfluss des Kalkes auf das Bodengefüge. Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft Band 15, 77-83.
- SCHAUP, A. (1984): Carbokalk im Recycling. Dissertation, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität für Bodenkultur Wien.
- SCHAUP, A. (1988): Einfluss gesteigerter Carbokalkgaben auf die EUF-Ca-Fraktion. 3.Internationales EUF-Symposium, Mannheim, BRD, Band 1. 92–115.
- SCHEFFER. K. und MEYER, B, (1970): Vergleich der Erträge, Nährstoffaufnahme, Wuchsleistung und Wurzelentwicklung auf einer normalen und tiefumgebrochenen Parabraunerde. Göttinger Bodenkundliche Berichte 16.
- SCHEFFER, K. und MEYER, B. (1973): Strukturwirkung meliorativer Kalkungen in A_p-Horizonten von Löß-Parabraunerden (Poren-Verteilungsmessungen). Landwirtschaftliche Forschung Sonderheft 28/1, 1973, 324-339.
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14.Auflage, F. Enke Verlag Stuttgart.
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, 15.Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin.
- SCHEFFER, B. und SCHEFFER, K. (1984): Der Einfluss von Kalk und Kieselsäure auf die Phosphatmobilität (CAL) in Böden. Landwirtschaftliche Forschung 37, 1, 1-8.
- SCHMID. G. (1967): Einfluss der Meliorationskalkung auf die Qualität des Erntegutes. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau. 125, 7-21.

- SCHNUG, E. und HANEKLAUS, S. (2002): Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden: Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. Landbauforschung Völkenrode 52 (4), 197–203.
- SCHÖNHARD, G. (1979): Vergleich der Wirkung von Kalk und einem Kationenaustauscher bei der Festlegung von Schwermetallen im Boden. Landwirtschaftliche Forschung 32,4, 1979.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates im Boden. Zeitschr. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 123, 48–63.
- SCHÜLLER, H. (1973): Über die Untersuchung von Böden mit hohen Carbonatgehalten. Landw. Forschung 26, Sonderheft 28/1, 140–155.
- SCHWERTMANN, U., DELLER, B. und NIEDERBUDDE, E.A. (1976): Langzeitwirkung einer Kalkung auf den Nährstoffzustand und die Basensättigung einer Braunerde aus Granitschutt. Landwirtschaftliche Forschung 29, 3-4.
- SCHWERTMANN, U. und ATTENBERGER, E. (1979): Veränderung von Bodeneigenschaften durch langjährige pH-verändernde Düngung. Landwirtschaftliche Forschung 29, 3-4, 1976, 119-128.
- SHARPLEY, A. (2000): Phosphorus availability. In: Handbook of Soil Science. SUMMER, E.D. (Ed.) CRC Press, New York.
- SIDIRAS, M. (1969): Ergebnisse zweijähriger Untersuchungen über die Wirkungen einer meliorativer Tiefenbearbeitung auf drei Bodentypen. Dissertation Hohenheim.
- SIERL, R., GÖTTLEIN, A., HOHMANN, E., TRÜBENBACH, D. und KREUTZER, K. (1986): Einfluss von saurer Beregnung und Kalkung auf Humusstoffe sowie die Al- und Schwermetalldynamik in wässrigen Bodenextrakten. Forstwirtschaftliches Cbl. 105, 309-313.
- SMUCKER, A.J.M., McBURNEY, S.L., SRIVASTAVA, A.K. (1982): Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the hydropneumatic elutriation system. Agron. J. 74, 500-503.
- STENBERG, M., STENBERG, B. und RYDBERG, T. (2000): Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. Applied Soil Ecology 14 (2000), 135–145.
- STIRZAKER, R.J., PASSIOURA, J.B. and WILMS, Y. (1996): Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. Plant and Soil 185, 151-162.
- STOFFEL, S., GUTSER, R. und CLAASSEN, N. (1995): Wurzelwachstum in einer Agrarlandschaft des Tertiär-Hügellandes. Agribiol. Research 48, 3-4, 330-341.
- STÖVEN, K (2002): Kalkung und Bodenleben. In: Kalktagung 2002. http://www.pb.fal.de/kalktag/kalk-kristen.pdf [zitiert am 15.3.2004].
- STURM, H. und ISERMANN, K. (1978): Überlegungen zur langfristigen Ausnutzung von Mineraldüngerphosphat auf Ackerböden. Landw. Forschung, Sonderheft 35, 180-192.
- TAGMANN, H.-U., OBERSON, A., OEHL, F., FROSSARD, E. DUBOIS, D. und MÄDER, P. (2001): DOK-Versuch: Phosphorbilanz und –verfügbarkeit über 21 Jahre. Agrarforschung 8 (8), 318-323.
- TISDALE, S.L., NELSON, W.L. and BEATON, J.D. (1985): Soil and fertilizer potassium, S. 249-250. In: Soil fertility and fertilizers. Macmillan, New York.
- VETTER, H. und SCHARAFAT, S. (1964): Die Wurzelverbreitung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen im Unterboden. Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau 120, 275–298.

- WAGENTRISTL, H. (1998): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Wachstum und Entwicklung von Zuckerrüben und deren Wurzeln im pannonischen Klimaraum. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien.
- WASNER, J., LIEBHARD, P. und EIGNER, H. (2001): Ausbringung von Carbokalk auf Ackerböden mit hohem pH-Wert im pannonischen Anbaugebiet Österreichs. Zuckerindustrie 126, Nr. 3, 194–201.
- WAY, T.R., KISHIMOTO, T., BURT, E.C. and BAILEY, A.C. (2000): Soil-Tire Interface of a Low Aspect Ration Tractor Tire. In. HORN, R., J.J.H. van Akker and J. ARVIDSSON (Eds.): Subsoil compaction. Advances in GeoEcology 32, 82-92. Catena Verlag Reiskirchen.
- WEICHERT (1982): Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung und spezifischen Oberfläche von Carbokalk. Unveröffentlichter Bericht, Karlsruhe.
- WENDENBURG, C. und KOCH, H.-J. (1996): Optimierung der Stickstoffdüngung. Zuckerrübe, 45 (3), 132-135
- WERNER, W. (1974): Der Einfluss des Kalkgehaltes auf das Lösungsvermögen der konventionellen Lactatlösung für Düngerphosphate und deren Umwandlungsprodukte. Phosphorsäure 30, 2, 19–32.
- WERNER, W. und SOLLE, A. (1984): Zur Phosphatwirkung von Scheideschlamm (Carbonatationskalk). Kali-Briefe (Büntehof) 17,3, 195-200.
- WERNER, W. und WEICHMANN, H. (1971): Vergleichende Untersuchungen zur Brauchbarkeit der CAL-Methode zur Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Bodenphosphates. Landw. Forschung 24, 285–293.
- WERNER, W. und WEICHMANN, H. (1972): Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit des durch langjährige Phosphatdüngung angereicherten Bodenphosphates. 3. Mitteilung: Die Verfügbarkeit der Umwandlungsprodukte in neutralen und kalkhaltigen Böden. Zeitschr. Pflanzenernährung und Bodenkunde 133, 4–17.
- WESTING, A und SÖCHTING, H. (1985): Bestimmung der Wurzeldichte in Böden unterschiedlicher Profiltiefe unter Weizen, Gerste und Zuckerrüben. Mitteilungen d. Deutschen Bodenkundliche Gesellschaft 43/II, 697-701.
- WHITELEY, G.M., UTOMO, W.H and DEXTER, A.R. (1981): A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. Plant and Soil 61, 351–364.
- WINDT, A. (1995): Entwicklung des Faserwurzelsystemes der Zuckerrübe sowie dessen Beziehung zum Wachstum der Gesamtpflanze und der Nährstoffaufnahme. Cuvillier Verlag Göttingen. Diss. Univ. Göttingen 1995
- WINDT, A und MÄRLÄNDER, B. (1994): Wurzelwachstum von Zuckerrüben unter besonderer Berücksichtigung des Wasserhaushaltes. Zuckerindustrie 119 (1994) Nr. 8, 659–663.
- WINNER, C. (1982): Zuckerrübenbau. Frankfurt/Main: DLG-Verlag.
- WIMMER, B., RAMPAZZO, N., und BLUM, W.E.H. (1997): Influence of soil structural parameters on hydraulic functions for soil-water balance modelling. Int. Agrophysics, 11, 5–41.
- WOLDENDORP, J.W. (1981): Nutrients in the rhizosphere. In: Agricultural yield potentials in continental climates. Proc. 16th Coll. Int. Potash Institute Bern. 99–125.
- WANDRUSZKA v., R. (2006): Phosphorus retention in calcerous soils and the effect of organic matter on its mobility. Geochemical Transactions 2006, 7:6. http://www.geochemicaltransactions.com/content/7/1/6 [zitiert am 31.7.2007]
- ZHUANG, J., G. YU, MIYAZAKI, T. and NAKAYAMA, K. (2000): Modeling Effect of Compaction on Soil Hydraulic Properties. In. HORN, R., J.J.H. van Akker and J.

- ARVIDSSON (Eds.): Subsoil compaction. Advances in GeoEcology 32, 144-153. Catena Verlag Reiskirchen.
- ZORN, W. (1998): Untersuchungen zur Charakterisierung der Phosphorverfügbarkeit in Thüringer Carbonatböden. Dissertation, Landw.-Gärtnerische Fak., Humboldt-Universität Berlin.
- ZORN, W. und KRAUSE, O. (1999): Untersuchungen zur Charakterisierung der Phosphorverfügbarkeit in Thüringer Carbonatböden. Zeitschr. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde 162, 463-469.

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Analyseergebnis von Carbokalk (BFL, 1997)2	24
Tabelle 2: Phosphat-Löslichkeit von Carbokalk (BFL 1999)2	26
Tabelle 3: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Mannsdorf (Österreichische Bodenkartierung 1993)2	29
Tabelle 4: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Altlichtenwarth (Österreichische Bodenkartierung 1997)	30
Tabelle 5: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Schönfeld (Österreichische Bodenkartierung 1972)3	31
Tabelle 6: Ton-, Humus- u. Kalkgehalt sowie pH-Wert zum Referenzprofil für den Standort Halbturn (Österreichische Bodenkartierung 1982)3	32
Tabelle 7: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 ar Standort Mannsdorf	
Tabelle 8: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 ar Standort Altlichtenwarth3	
Tabelle 9: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 ar Standort Schönfeld3	
Tabelle 10: Monatliche Niederschlagsmengen in mm in den Versuchsjahren 1992 bis 1999 am Standort Halbturn	36
Tabelle 11: Im Feldversuch ausgebrachte Carbokalkmengen in t/ha3	37
Tabelle 12: Kulturartenverteilung der Versuchsstandorte von 1992 bis 19993	37
Tabelle 13: Versuchsrelevante Managementmaßnahmen bei Weizen 19993	38
Tabelle 14: Normen zur Bestimmung ausgewählter bodenchemischer Parameter4	10
Tabelle 15: Einstufung der Bodenreaktion und des Kalkgehalts entsprechend den "Richtlinie für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUM 2006)4	
Tabelle 16: Einstufung der Nährstoffgehalte entsprechend den "Richtlinien für die Sachgerechte Düngung" (BMLFUW 2006)4	ļ 1
Tabelle 17: Bearbeitete Varianten sowie Einzelmessungen je Parzelle bzw. Variante pro Standort4	‡ 1
Tabelle 18: Profilaufbau am Versuchsfeld Mannsdorf (nach Bohrstich, Mai 1999) 4	ļ 7
Tabelle 19: Profilaufbau am Versuchsfeld Altlichtenwarth (nach Bohrstich, Mai 1999)4	18
Tabelle 20: Profilaufbau am Versuchsfeld Schönfeld (nach Bohrstich, Mai 1999)4	19
Tabelle 21: Profilaufbau am Versuchsfeld Halbturn (nach Bohrstich, Mai 1999)5	50
Tabelle 22: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn von 1992 bis 1996	53
Tabelle 23: Errechneter N-Entzug (kg/ha) bzw. Polarisation (%) und α-Aminosäure-N (mval/100 °S) bei Zuckerrübe sowie Stärkegehalt (%) bei Kartoffel auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth Schönfeld und Halbturn von 1992 bis 19965	55
Tabelle 24: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn in den Jahren 1997 und 19985	57
Tabelle 25: Errechneter N-Entzug (kg/ha) bzw. Polarisation (%) und α-Aminosäure-N (mval/100 °S) bei Zuckerrübe sowie Stärkegehalt (%) bei Kartoffel auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn 1997 und 1998	58

Tabelle 26: Frischmasseertrag bei Weizen (t/ha), Gehalt an Makro- (in % der TM) und Mikronährstoffen (in mg/kg TM) im Stadium EC 50 bis 60, Ernte 15. Mai 199959
Tabelle 27: Frisch- und Trockenmasseerträge (t/ha) bei Weizen sowie N-Entzüge (kg/ha) von Gesamtpflanze und Korn, Ernte Juli 199961
Tabelle 28: Ertragsstruktur sowie Wuchshöhe in cm auf den Standorten Mannsdorf, Schönfeld und Halbturn, Juli 199962
Tabelle 29: Wassergehalt (gravimetrisch) in % von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Standort Mannsdorf, Mai 199977
Tabelle 30: Wassergehalt (gravimetrisch) in % von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Standort Altlichtenwarth, Mai 199978
Tabelle 31: Wassergehalt (gravimetrisch) in % von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Standort Schönfeld, Mai 199979
Tabelle 32: Wassergehalt (gravimetrisch) in % von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Standort Halbturn, Mai 199980
Tabelle 33: Hydraulische Leitfähigkeit in cm/sec x 10 ⁻⁴ auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth, Schönfeld und Halbturn in den Carbokalk-Düngungsvarianten 1, 2 und 483
Tabelle 34: Anzahl der Wurzeln je 100 cm² bei unterschiedlicher Carbokalk-Düngungsmenge auf den Standorten Mannsdorf, Altlichtenwarth und Schönfeld, Mittelwert aus 7 und 22 cm Tiefe, Halbturn nur 7 cm Tiefe85
Tabelle 35: Mineralstoffgehalte in % bzw. ppm i. d. TM bei Zwischenernte (als Mittelwert über alle Carbokalkdüngungs-Varianten) im Vergleich zu den Ergebnissen von VIELEMEYER (1991) und BERGMANN (1993) für Sommer- und Winterweizen in EC 45, Bestand Frühjahr 1999
Tabelle 36: Phosphorgehaltswerte (mg/1000 g Boden) in der Nullvariante (= kein Carbokalk) im Frühjahr 199994
Tabelle 37: Kalkgehalt (in %) in der Nullvariante (= kein Carbokalk) im Frühjahr 199995
Tabelle 38: Mindestgehalte an wasserlöslichem Phospor (mg/1000 g Boden) in der Gehaltsstufe "D" (BMLFUW 2006)96
Tabelle 39: Eindringwiderstände (MPa) im Mittel aller vier Standorte relativ, Variante 1 = 100 % in der Bodentiefe von 10,5 bis 31,5 cm99

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Basische Wirkung von Düngekalken (AMBERGER 1988)18
Abbildung 2: Beziehung zwischen Bodenreaktion und verschiedenen Prozessen und der Verfügbarkeit von Nährelementen im Boden (nach FEGER 1996, verändert aus KUNTZE et al. 1994)
Abbildung 3: Österreichkarte mit Lage der Versuchsstandorte (ÖZVG 2002)27
Abbildung 4: Referenzprofil für den Standort Mannsdorf (Österreichische Bodenkartierung 1993)
Abbildung 5: Referenzprofil für den Standort Altlichtenwarth (Österreichische Bodenkartierung 1997)29
Abbildung 6: Referenzprofil für den Standort Schönfeld (Österreichische Bodenkartierung 1972)31
Abbildung 7: Referenzprofil für den Standort Halbturn (Österreichische Bodenkartierung 1982)32
Abbildung 8: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Mannsdorf , Messstelle Groß Enzersdorf33
Abbildung 9: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Altlichte nwarth, Messstelle Wilfersdorf34
Abbildung 10: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Schönfeld , Messstelle Obersiebenbrunn35
Abbildung 11: Langjährige Niederschlagsverteilung in mm und langjährige Durchschnittstemperatur in ℃ am Standort Halbturn, Messstelle Andau36
Abbildung 12: Schablone zur Messung des Eindringwiderstandes42
Abbildung 13: GUELPH-Permeameter43
Abbildung 14: GUELPH-Permeameter (links), Werkzeug zur Herstellung des Bohrlochs (rechts)44
Abbildung 15: EIJKELKAMP – Bohrer zur Entnahme der Bohrkerne45
Abbildung 16: Profilaufbau am Versuchsfeld Mannsdorf (nach Bohrstich, Mai 1999)47
Abbildung 17: Profilaufbau am Versuchsfeld Altlichtenwarth (nach Bohrstich, Mai 1999)48
Abbildung 18: Profilaufbau am Versuchsfeld Schönfeld (nach Bohrstich, Mai 1999)49
Abbildung 19: Profilaufbau am Versuchsfeld Halbturn (nach Bohrstich, Mai 1999)50
Abbildung 20: Karbonat-Gehaltswerte in % im Ober- und Unterboden, 1996 und 199964
Abbildung 21: Phosphor-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199965
Abbildung 22: Kalium-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199966
Abbildung 23: Gehaltswerte an austauschbarem Calcium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199967
Abbildung 24: Gehaltswerte an austauschbarem Magnesium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden. 1996 und 199968

Abbildung 25: Gehaltswerte an austauschbarem Kalium in cmol+/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199969
Abbildung 26: Gehaltswerte an austauschbarem Natrium in cmol+/1000 g Boden im Oberund Unterboden, 1996 und 199970
Abbildung 27: Mangan-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199971
Abbildung 28: Kupfer-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199972
Abbildung 29: Zink-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199973
Abbildung 30: Eisen-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199974
Abbildung 31: Bor-Gehaltswerte in mg/1000 g Boden im Ober- und Unterboden, 1996 und 199975
Abbildung 32: Gehaltswerte an wasserlöslichem Phosphor in mg/1000 g Boden im Oberund Unterboden, 199976
Abbildung 33: Eindringwiderstand in MPa von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Mannsdorf, Mai 199977
Abbildung 34: Eindringwiderstand in MPa von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Altlichtenwarth, Mai 199978
Abbildung 35: Eindringwiderstand in MPa von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Schönfeld, Mai 199979
Abbildung 36: Eindringwiderstand in MPa von 15 bis 35 cm Bodentiefe am Standort Halbturn, Mai 199980
Abbildung 37: Wassergehalt (gravimetrisch) in % von 0 bis 50 cm Bodentiefe, Mittelwert über vier Standorte, Mai 199981
Abbildung 38: Eindringwiderstand in MPa von 15 bis 35 cm Bodentiefe, Mittelwert über vier Standorte, Deckfrucht Weizen, Mai 199982
Abbildung 39: Hydraulische Leitfähigkeit in cm/sec x 10 ⁻⁴ bei unterschiedlichem Carbokalk- Düngungsmengen im Mittel über alle vier Standorte84
Abbildung 40: Anzahl der Wurzeln je 100 cm² bei unterschiedlichen Carbokalk- Düngungsmengen in Summe aus 7 und 22 cm als Mittel über alle vier Standorte, relativ, Variante 1 = 10086
Abbildung 41: Zunahme der Phosphorwerte (in mg/1000 g Boden) je 10 Tonnen ausgebrachtem Carbokalk im Frühjahr 1999 in Abhängigkeit des Kalkgehaltes94
Abbildung 42: Eindringwiderstand in MPa von 3,5 bis 35 cm Bodentiefe zweier nebeneinander liegender Parzellen, Standort Mannsdorf, Mai 1999100

11 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Josef Wasner
Geburtstag 2. Mai 1971
Geburtsort Hollabrunn
Land Österreich
Staatsbürgerschaft Österreich

Familienstand ledig

Universität Universität für Bodenkultur Wien

Ausbildung 1990 bis 1998:

Studium an der Universität für Bodenkultur, Studienrichtung Landwirtschaft, Studienzweig

Pflanzenproduktion

Seit Oktober 1998:

Doktoratsstudium an der Universität für

Bodenkultur

Beruflicher Werdegang Seit 1999:

Referent in der NÖ Landes-Landwirtschaftskammer

Wien September 2009