III.2.4 Reaktionen der Kohlenstoffsenken

III.2.4.1 Die Zusammensetzung des Ertrages

Spezielles Augenmerk soll in diesem Kapitel auf die Beantwortung der Fragen „Förderte CO_2 den Weizenertrag durch erhöhte Senkenzahl oder durch erhöhtes Einzelkorngewicht?“ und „Wieviele der Halme bildeten Ähren aus? Welchen Anteil trugen Haupt- und Nebenhalme zum CO_2-Ertragszuwachs bei?“ gerichtet werden. Generell setzt sich der Kornertrag multiplikativ aus der Ährenzahl, der Zahl der Körner in einer Ähre und dem Tausendkorngewicht (Hay & Walker 1989) zusammen. Eine CO_2-bedingte Veränderung des Ertrages läßt sich durch Multiplikation der Veränderungen in den Komponenten erklären.

Zur Klärung der Fragen wurden an zwei Sommerweizensorten Biomasse-Ernten zur Reife durchgeführt: 1994 wurde hierfür die Sorte Nandu exponiert, 1995 die Sorte Minaret. Der Einfluß der Behandlungen auf die Ertragskomponenten des Weizens wird in Tabelle 3.4 zusammengefaßt dargestellt.

Das Tausendkorngewicht (TKG) wurde bei der 1994 angebauten Sorte Nandu durch die CO_2-Begasung positiv beeinflußt (einfach signifikant). Im Vergleich zu der starken relativen Ertragssteigerung unter erhöhtem CO_2 waren die Zuwächse des Tausendkorngewichtes gering. Die Ertragssteigerung beruhte in stärkerem Maße auf der durch CO_2 geförderten Ährenzahl und Kornzahl pro Ähre. Die Zahl der Ähren stand 1994 unter dem Einfluß der Düngung (höchstsignifikant). CO_2 erhöhte die Ährenzahl nur in der „+Düngung“. Die leichte Ertragssteigerung (nicht signifikant) bei Ozonerhöhung war auf eine größere Ährenzahl zurückzuführen. Da die Kornzahl pro Ähre 1994 nur aus Ährenzahl und Tausendkorngewicht berechnet wurde, konnte für diesen Parameter keine Varianzanalyse durchgeführt werden. Die Kornzahl pro Ähre war jedoch der Parameter, der 1994 den Ertragszuwachs durch CO_2-Begasung hauptsächlich trug. In der „-Düngung“ war er der einzige durch CO_2 geförderte Ertragsparameter. In der „+Düngung“ trug die Kornzahl pro Ähre stärker als die Ährenzahl zum Ertragsvorteil unter erhöhtem CO_2 bei.

Das Tausendkorngewicht (TKG) der Sorte Minaret sank unter erhöhtem CO_2 1995 signifikant ab. Im Vergleich zu den relativen Effekten auf den Ertrag war die Reaktion des Tausendkorngewichtes auf CO_2-Erhöhung vernachlässigbar. Ertragszuwächse setzten sich bei der Sorte Minaret zusammen aus einer Förderung von Ährenzahl und Kornzahl pro Ähre. Die Ährenzahl, die laut Varianzanalyse durch CO_2 und N-Versorgung höchstsignfikant beeinflußt wurde, hatte den größten Anteil am Ertragszuwachs in der höchsten CO_2-Stufe. Die

Varianzanalyse deckte bei der Ährenzahl und der Kornzahl pro Ähre zudem eine Interaktion CO_2 x O_3 auf: Sowohl in der „+Düngung“ als auch in der „-Düngung“ erhöhte Ozon in der Behandlung A-NF1,5 die Ährenzahl und erniedrigte die Kornzahl pro Ähre, während in der Behandlung A320-NF1,5 das umgekehrte Reaktionsmuster auftrat. Im Gegensatz zu dem Kornertrag wurde bei keinem der untersuchten Ertragsparameter eine Interaktion CO_2 x Düngung festgestellt.

Zur Klärung der Eingangsfragen „Wieviele der Halme bildeten Ähren aus?“ und „Welchen Anteil trugen Haupt- und Nebenhalme zum CO_2-Ertragszuwachs bei?“ liegen Daten der Sorte Minaret aus dem Jahr 1995 von der Erntereife vor, die folgende Ergebnisse erbrachten: Mit zunehmender CO_2-Konzentration bildeten mehr Halme Ähren aus (vgl. Abbildung 3.8). Düngungsbedingte Unterschiede der Ährenzahl wurden mit CO_2-Begasung größer. Die Zunahme der Ährenzahl in A320-NF fand unter Ozon in A320-NF1,5 nicht statt. Die Zahl der Triebe unterschied sich wenig in den Behandlungen mit Ausnahme der Variante A-NF1,5; -Düngung, in der es zu einem Einbruch der Triebzahl kam. Varianzanalytische Befunde zur Halmzahl sind Kapitel III.2.1 zu entnehmen.

Der Abbildung 3.9 zufolge wurde der Ertrag an Haupthalmen durch die Behandlungen kaum verändert (Ausnahme: hoher Wert in A-NF1,5; -Düngung). Der CO_2-Ertragszuwachs war damit vollständig auf Veränderungen in den Nebenhalm-Erträgen zurückzuführen.

Die Eingangsfragen lassen sich damit wie folgt beantworten: Ertragszuwächse durch CO_2 waren durch eine Förderung der Senkenzahl bedingt; demgegenüber war der Einfluß auf das Tausendkorngewicht vernachlässigbar. Der Anteil ährentragender Halme nahm bei CO_2-Exposition zu, und der CO_2-Ertragszuwachs wurde an Nebenhalmen erzielt (bei der Sorte Minaret im Jahr 1995).

<u>Kurzzusammenfassung:</u>

- Die CO_2-Förderung des Ertrages war bei der Sorte Nandu vor allem bedingt durch die Kornzahl pro Ähre (in der -Dgg. ausschließlich). Der Zuwachs der Ährenzahl trug schwächer bei (in der +Dgg.). Am niedrigsten war die Steigerung des Tausendkorngewichtes. Haupteinflußfaktor für die Ährenzahl war die Düngung.
- Die Sorte Minaret hatte bei CO_2-Begasung in A160-NF ein niedrigeres Tausendkorngewicht; wenig verändert war es in A320-NF. Den Hauptanteil an der Ertragszunahme unter erhöhtem CO_2 machte die Ährenzahl aus. Auch die Kornzahl pro Ähre stieg durch CO_2-Begasung an. Die Förderung der Ährenzahl in der höchsten CO_2-Stufe blieb bei Ozonbegasung aus. Mit zunehmender CO_2-Konzentration bildete ein größerer Anteil der Halme Ähren aus. Der CO_2-Ertragszuwachs wurde an Nebenhalmen erzielt.
- Durch CO_2 wurde das Einzelkorngewicht kaum gefördert, teilweise sogar erniedrigt (Minaret A160-NF). Die Ertragssteigerung kam durch gesteigerte Senkenzahl zustande.

Tab. 3.4:
Ertragskomponenten der Sommerweizensorten Nandu im Jahr 1994 und Minaret im Jahr 1995.
Behandlungsvergleich (% Diff. = % Differenz)
Ergebnisse der 2-(3-)faktoriellen Varianzanalysen

Sorte Nandu im Jahr 1994					
Behandlung	**Dgg.**	**Ertrag [g/Topf]**	**Anzahl Ähren**	**Körner pro Ähre**	**TKG [g]**
A-NF1,5	+	6,32±0,48	5,63±0,98	39,53	28,40±2,38
A-NF	+	5,72±0,98	5,00±0,76	37,02	30,90±2,08
A160-NF	+	7,90±0,63	6,25±1,28	40,22	31,43±1,74
A320-NF	+	8,41±0,69	5,63±0,92	47,02	31,77±4,01
A320-NF1,5	+	8,66±0,48	6,00±1,03	44,94	32,12±1,66
A-NF	-	4,71±0,78	4,50±0,93	33,41	31,33±1,87
A160-NF	-	5,97±0,87	4,50±1,20	39,92	33,23±2,14
A320-NF	-	6,58±0,36	4,25±0,46	47,89	32,33±1,70
Vergleich	**Dgg.**	**Ertrag [% Diff.]**	**Anzahl Ähren [% Diff.]**	**Körner pro Ähre [% Diff.]**	**TKG [% Diff.]**
A-NF/A-NF1,5	+	+10	+13	+7	-8
A320-NF/A320-NF1,5	+	+3	+7	-4	+1
A-NF/A160-NF	+	+38	+25	+9	+2
A-NF/A320-NF	+	+47	+13	+27	+3
A-NF/A160-NF	-	+27	0	+19	+6
A-NF/A320-NF	-	+40	-6	+43	+3
Varianzanalyse: Variationsursache		**P-Werte für Ertrag**	**P-Werte für Anzahl Ähren**	**P-Werte für Körner pro Ähre**	**P-Werte für TKG**
Faktor CO_2		0,000			
Faktor Dgg.		0,000	0,000		0,022
Interaktion CO_2 x Dgg.					
Faktor CO_2		0,000			0,025
Faktor O_3					
Interaktion CO_2 x O_3					

Fortsetzung Tab. 3.4:
Ertragskomponenten der Sommerweizensorten Nandu im Jahr 1994 und Minaret im Jahr 1995.
Behandlungsvergleich (% Diff. = % Differenz)
Ergebnisse der 2-(3-)faktoriellen Varianzanalysen

Sorte Minaret im Jahr 1995					
Behandlung	**Dgg.**	**Ertrag [g/Topf]**	**Anzahl Ähren**	**Körner pro Ähre**	**TKG [g]**
A-NF1,5	+	5,57±0,71	5,89±1,27	34,21±8,49	29,05±3,07
A-NF	+	5,61±0,75	5,31±0,70	39,01±6,97	27,88±4,94
A160-NF	+	6,11±0,73	5,75±0,58	44,98±3,96	23,84±2,83
A320-NF	+	8,60±0,56	6,81±0,66	46,28±4,29	27,49±1,72
A320-NF1,5	+	7,33±0,81	6,00±1,05	47,96±8,06	26,25±3,73
A-NF1,5	-	5,14±0,92	4,89±0,78	36,04±6,61	29,84±5,00
A-NF	-	5,11±0,45	4,38±0,50	41,81±5,16	28,40±3,12
A160-NF	-	5,80±0,53	5,06±0,44	44,57±4,74	26,00±2,87
A320-NF	-	6,67±0,88	5,50±0,89	45,37±6,07	27,18±2,52
A320-NF1,5	-	6,84±0,38	5,40±0,97	48,00±7,43	27,07±1,76
Vergleich	**Dgg.**	**Ertrag [% Diff.]**	**Anzahl Ähren [% Diff.]**	**Körner pro Ähre [% Diff.]**	**TKG [% Diff.]**
A-NF/A-NF1,5	+	-1	+11	-12	+4
A320-NF/A320-NF1,5	+	-15	-12	+4	-5
A-NF/A160-NF	+	+9	+8	+15	-14
A-NF/A320-NF	+	+53	+28	+19	-1
A-NF/A-NF1,5	-	+1	+12	-14	+5
A320-NF/A320-NF1,5	-	+3	-2	+6	0
A-NF/A160-NF	-	+14	+16	+7	-8
A-NF/A320-NF	-	+31	+26	+9	-4
Varianzanalyse: Variationsursache		**P-Werte für Ertrag**	**P-Werte für Anzahl Ähren**	**P-Werte für Körner pro Ähre**	**P-Werte für TKG**
Faktor CO_2		0,000	0,000	0,000	0,012
Faktor Dgg.		0,000	0,000		
Interaktion CO_2 x Dgg.		0,000			
Faktor CO_2		0,000		0,000	
Faktor Dgg.		0,000	0,000		
Faktor O_3		0,049			
2-fache Interaktion		0,010 CO_2 x Dgg 0,010 Dgg x O_3	0,005 CO_2 x O_3	0,007 CO_2 x O_3	
3-fache Interaktion		0,019			

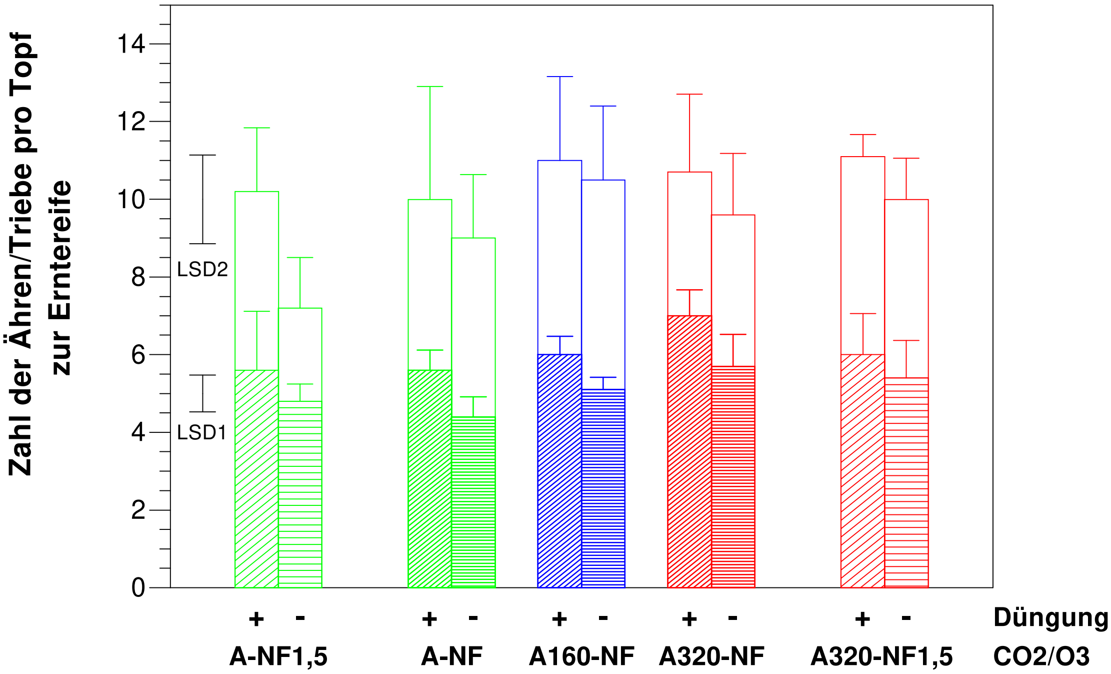

Abb. 3.8: Einfluß der Exposition und Düngung auf die Zahl der Ähren (schraffierte Säulen) und auf die Zahl der Triebe pro Topf (leere Säulen) zur Erntereife (Sorte Minaret im Jahr 1995, n=5 Töpfe pro Kammer u. Variante). (Zwei Behandlungen sind signifikant verschieden, wenn der Mittelwertunterschied der Ähren- bzw. Triebzahl größer ist als der eingezeichnete LSD1- bzw. LSD2-Wert.)

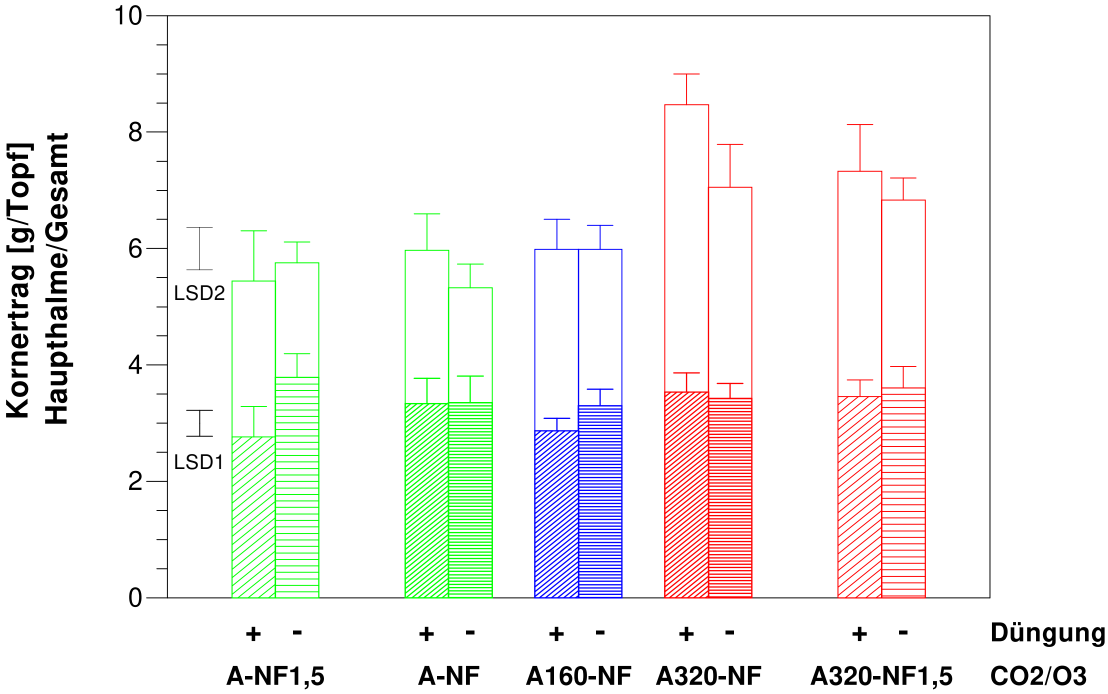

Abb. 3.9: Einfluß der Exposition und Düngung auf Haupthalmertrag (schraffierte Säulen) und Gesamtertrag eines Topfes (leere Säulen) (Sorte Minaret im Jahr 1995, n=5 Töpfe pro Kammer u. Variante).
(Zwei Behandlungen sind signifikant verschieden, wenn der Mittelwertunterschied des Haupthalmertrages bzw. Gesamtertrages größer ist als der eingezeichnete LSD1- bzw. LSD2-Wert.)

III.2.4.2 Das Ährenwachstum

Dieses Kapitel geht der speziellen Frage nach, wie sich das Ährenwachstum unter erhöhter CO_2-Konzentration veränderte und welchen Einfluß CO_2 auf Senkenstärke und ~aktivität der Ähren ausübte.

Zur Klärung der Fragen wurden an die in wöchentlichem Abstand erhobenen Daten der Ährentrockenmasse empirische Funktionen angepaßt. Es wurde das „Wachstumskonzept" von Senkenstärke und ~aktivität angewendet. Die Senkenaktivität wird dabei mit der relativen Wachstumsrate einer Kohlenstoff-Senke gleichgesetzt und die Senkenstärke mit der absoluten Wachstumsrate (vgl. Kapitel IV.2.4.2).

Die Modellbildung für die Ähren-Trockenmasse

An die Ährentrockenmassen wurden mit zwei Ausnahmen Polynome 3. Grades angepasst (vgl. Tabelle 3.5). Die Anpassung gelang hervorragend. Das niedrigste „adjusted R^2" betrug 0,967. Die Residuenanalyse wies keine Abweichungen von den Voraussetzungen der linearen Regression nach. Ein Wert wurde aufgrund fehlender Plausibilität aus der Analyse herausgenommen und als Ausreißer identifiziert.

Tab. 3.5: Die empirischen Modelle für die Trockenmasse der Ähren
(B = Parameter der Funktion, n = Zahl der Datenpunkte, p = Zahl der Parameter, Mallow's Cp = Stat. Maßzahl für Wahl des Polynomgrades (Cp ≤ p, Cp = Minimum), adj. R² = adjusted R², K-S = Kolmogoroff-Smirnoff-Test, Sh-W = Shapiro-Wilks-Test, Bes. = Besonderheit (s. unten))

Exposition Behandlung	Dgg.	B_0	B_1	B_2	B_3	n	p	Cp (x^2/x^3)	adj. R²	K-S/ Sh-W	Bes.
A-NF	+	-23,95564	0,74908	-0,00712	2,22E-05	50	4	9,70/4	0,967	>0,2/0,24	
A-NF1,5	+	-11,96728	0,29156	-0,00152		16	3	2,06/4	0,975	>0,2/0,41	①
A160-NF	+	-33,37707	1,10262	-0,01135	3,87E-05	50	4	38,55/4	0,980	>0,2/0,38	
A320-NF	+	-35,38868	1,16432	-0,01191	4,05E-05	50	4	58,28/4	0,989	>0,2/0,43	
A320-NF1,5	+	-33,09534	1,09222	-0,01119	3,81E-05	32	4	18,99/4	0,976	>0,2/0,65	
A-NF	-	-21,85024	0,66063	-0,00592	1,69E-05	50	4	8,62/4	0,977	>0,2/0,56	
A-NF1,5	-	-12,17461	0,29381	-0,00152		16	3	2,34/4	0,987	>0,2/0,21	①
A160-NF	-	-21,96251	0,67788	-0,00623	1,86E-05	50	4	9,04/4	0,973	>0,2/0,69	
A320-NF	-	-21,87525	0,64008	-0,00538	1,39E-05	50	4	5,87/4	0,980	>0,2/0,27	
A320-NF1,5	-	-22,27099	0,67962	-0,00610	1,76E-05	31	4	7,92/4	0,984	>0,2/0,33	②

Besonderheiten: ① 1 Kammer, ② 1 Ausreißer

Der Einfluß von Exposition und Düngung auf die Ähren-Trockenmasse und deren Wachstumsrate

Der Verlauf der Ähren-Trockenmasse in der logarithmischen Auftragung der Abbildung 3.10, 3.11 ist anfangs durch einen linearen Anstieg (Tag 55-70), dann durch einen langsamer werdenden Anstieg geprägt, bis ungefähr zum Tag 90 ein Plateau erreicht wird.

Auch die Modelle der Ähren-Trockenmasse demonstrierten eine Interaktion der Faktoren CO_2-Konzentration und Düngung, wie Abbildung 3.10 zeigt. In A-NF war kein Unterschied der Ähren-Trockenmasse durch die N-Versorgung festzustellen. In A160-NF ergab sich eine signifikante Förderung durch die „+Düngung" im Zeitraum 70.-75. Tag nach Aussaat. In A320-NF bestand eine signifikante Förderung ab dem 60. Tag. Erhöhte CO_2-Konzentration förderte die Ährentrockenmasse stärker in der „+Düngung" (vgl. Abbildung 3.11 a,b). Starke und signifikante Unterschiede traten in beiden Düngungsstufen zwischen A-NF und A160-NF auf der einen Seite und A320-NF auf der anderen Seite auf. Unter Ozoneinfluß unterschieden sich die Ähren-Trockenmassen unter heutiger CO_2-Konzentration intermediär zwischen dem 70. und 80. Tag: Sie lagen signifikant niedriger (vgl. Abbildung 3.11 c,d). Die Ähren-Trockenmasse zur Endernte unterschied sich dann nicht mehr (signifikant). Unter verdoppelter CO_2-Konzentration war die Trockenmasse der Ähren durch Ozon geringfügig („+Düngung") bzw. nicht („-Düngung") reduziert. Dies zeigt Abbildung 3.11 e,f.

Nach dem oben beschriebenen Konzept ist die relative Wachstumsrate der Ähre ein Maß für ihre Senkenaktivität. Abbildung 3.12 stellt den Einfluß der Düngung auf die Ährenwachstumsrate dar. Ersichtlich ist einmal mehr die Interaktion CO_2 x Düngung. Unter erhöhter CO_2-Konzentration ergab sich ein düngungsbedingter Unterschied: In der Mangelversorgung der „-Düngung" lag die relative Wachstumsrate anfangs niedriger, nahm aber im Gegensatz zur „+Düngung" schwächer und fast linear ab, so daß die RGR der „-Düngung" im Zeitraum Tag 80-90 größer war. Bemerkenswert ist der Befund einer negativen Wachstumsrate zum Expositionsende in A160-NF und A320-NF, -Düngung. In der „+Düngung" zeigte sich eine zeitlich begrenzte (nicht signifikante) Förderung durch erhöhtes CO_2, die bis zum Tag 70 anhielt (siehe Abbildung 3.13 a). In A160-NF, -Düngung erhöhte sich die RGR gegenüber der CO_2-Außenkonzentration kaum. Dies stimmt mit einem in dieser Behandlung erniedrigten Harvest-Index überein (vgl. Kapitel III.2.1). In A320-NF, -Düngung hielt die nicht-signifikante Förderung am längsten an. Ozon unter der CO_2-Konzentration von heute erniedrigte anfangs die RGR; später war die RGR aufgrund des schwächeren Abfalls durch Ozon erhöht. Im Vergleich A320-NF1,5/A320-NF ist nur eine geringe Beeinflussung der RGR durch Ozon zu erkennen, die aber lange anhielt.

In Analogie zu der relativen Wachstumsrate der oberirdischen Trockenmasse (vgl. Gesamtpflanzen-Ebene, Kapitel III.2.2.) ist ein Einfluß der Ährentrockenmasse auf die Ähren-RGR zu erwarten. Abbildung 3.14 zeigt darum eine Auftragung gegen die Ähren-Trockenmasse. Die Senkenaktivität von Ähren mit gleicher Trockenmasse lag unter erhöhter CO_2-Konzentration stets höher. Eine Abhängigkeit der CO_2-Förderung von der Ährengröße war nur in A160-NF, +Düngung auszumachen; für alle übrigen CO_2-Begasungsvarianten war die Förderung konstant. Durch Ozon wurde unter heutiger CO_2-Konzentration das Ährenwachstum bei geringer Ähren-Trockenmasse reduziert. Je schwerer die Ähren wurden, desto geringer wurde der Unterschied im Vergleich mit Pflanzen, die der Ozonkonzentration der Außenluft ausgesetzt wurden. Gering waren die Einflüsse Ozons unter verdoppelter CO_2-Konzentration;. in der „+Düngung" waren die RGR allerdings stets erniedrigt.

Absolute Wachstumsraten (AGR) der Ähren werden hier als Maß für die Senkenstärke verstanden (siehe oben). Die Raten lagen anfangs niedrig, nahmen mit der Zeit zu, erreichten ihr Maximum um den 70. bis 80. Tag nach Aussaat und nahmen dann bis zur Erntereife wieder ab (Abbildungen 3.15 und 3.16). Abbildung 3.15 stellt Effekte der Düngung auf diesen Parameter vor. In allen CO_2-Varianten sank die AGR der Ähren zur Erntereife auf einen Wert unter Null ab, d.h. das Gewicht der Ähren nahm ab. Deutlich wird wiederum die Interaktion CO_2 x Düngung. Die düngungsbedingten Veränderungen der AGR wurden größer unter erhöhtem CO_2. Sie waren in A160-NF und A320-NF gleichartig und sahen wie folgt aus: Absolute Wachstumsraten der „-Düngung" blieben frühzeitig zurück; es wurde in der Mangelversorgung eine niedrigere maximale AGR später erreicht; die AGR nahmen dann weniger rasch ab, so daß die schlechte N-Versorgung in der Phase Tag 80-90 besser wuchs. Dies ist um so erstaunlicher, weil die Blattfläche in A160-NF und A320-NF, -Düngung früher abnahm (vgl. Organ-Ebene Kapitel III./IV.2.5.1). Die CO_2-Förderung der absoluten Wachstumsrate fiel in der „+Düngung" stärker aus. Hier betrug die maximale AGR 0,48 g Tag^{-1}, während in der „-Düngung" 0,38 g Tag^{-1} erreicht wurden (beides im Vergleich zu 0,27 g Tag^{-1} in A-NF). Damit war die maximale Förderung der Ährenwachstumsrate durch CO_2-Erhöhung in der „+Düngung" wesentlich größer (+73%) als aufgrund der zur Erntereife um ca. 50% erhöhten Kornzahl zu erwarten gewesen war. Das bedeutet de facto, daß auch die Senkenstärke des Einzelkorns zu diesem Zeitpunkt zugenommen hat (siehe Diskussion). Weil das Tausendkorngewicht zur Erntereife unverändert war (vgl. Kapitel III.2.4.1), hat sie aber nur intermediär zugenommen. Ozonbegasung führte unter heutiger CO_2-Konzentration zu einem zeitlich verzögerten Ährenwachstum. Diese Reaktion stimmt gut mit dem verzögerten Gesamtpflanzenwachstum in diesen Behandlungen überein (vgl. Kapitel III.2.2). Ein Einfluß existierte unter erhöhtem CO_2 nur in der „+Düngung" und bestand in einer Reduktion der maximalen Ähren-AGR.

Abschließend soll die Eingangsfrage des Kapitels explizit beantwortet werden: Die Senkenaktivität der Ähren war temporär durch CO_2 erhöht (bis zum Tag 70 in der „+Düngung"; in A320-NF, -Düngung länger). CO_2-Exposition förderte die Senkenstärke bis zum Tag 80 in der „+Düngung", bis zum Tag 90 in A320-NF, -Düngung.

<u>Kurzzusammenfassung:</u>

- In der Ähren-Trockenmasse zeigte sich eine Interaktion CO_2 x Dgg.: In A320-NF war die TM ab dem Tag 60 durch die +Dgg. signifikant erhöht. Ozon reduzierte intermediär die Ähren-TM (Vergleich A-NF1,5/A-NF); zur Erntereife bestand der Unterschied nicht mehr. Ozonbedingte Unterschiede in A320 bestanden in reduzierter TM in der +Dgg..
- Die Ähren-RGR und damit die Senkenaktivität wurde durch CO_2 temporär erhöht. Die Förderung hielt in der -Dgg. länger an. Unter CO_2-Exposition war die Ähren-RGR in der -Dgg. anfänglich niedriger, zwischen Tag 80 und 90 höher. Dieselbe zeitabhängige Reaktion (auf Ozon) zeigte die Behandlung A-NF1,5 im Vergleich zu A-NF. Unter erhöhtem CO_2 wirkte Ozon nur geringfügig, aber über den gesamten Expositionszeitraum, negativ auf die RGR ein.
- Vergleicht man Ähren gleicher Trockenmasse, war stets eine CO_2-Förderung des Ährenwachstums sichtbar. Ozon reduzierte in A-NF1,5 die Ähren-RGR nur bei Vorliegen einer geringen Ähren-TM.
- Absolute Wachstumsraten und damit die Senkenstärke der Ähren wurden in der +Dgg. durch CO_2 stärker erhöht (maximale AGR (Tag 70-80): in A320-NF,+Dgg. 0,48 g Tag^{-1}, in A320-NF,-Dgg. 0,38 g Tag^{-1} , in A-NF 0,27 g Tag^{-1}). Damit nahm intermediär die Senkenstärke einzelner Körner in A320-NF,+Dgg. zu. Zwischen Tag 80 und 90 bestand in A320-NF ein düngungsbedingter Unterschied mit höherer AGR (Senkenstärke) in der -Dgg., obwohl die Blattfläche in der -Dgg. zu dieser Zeit geringer war. Ozon reduzierte die maximale AGR in A320-NF1,5.

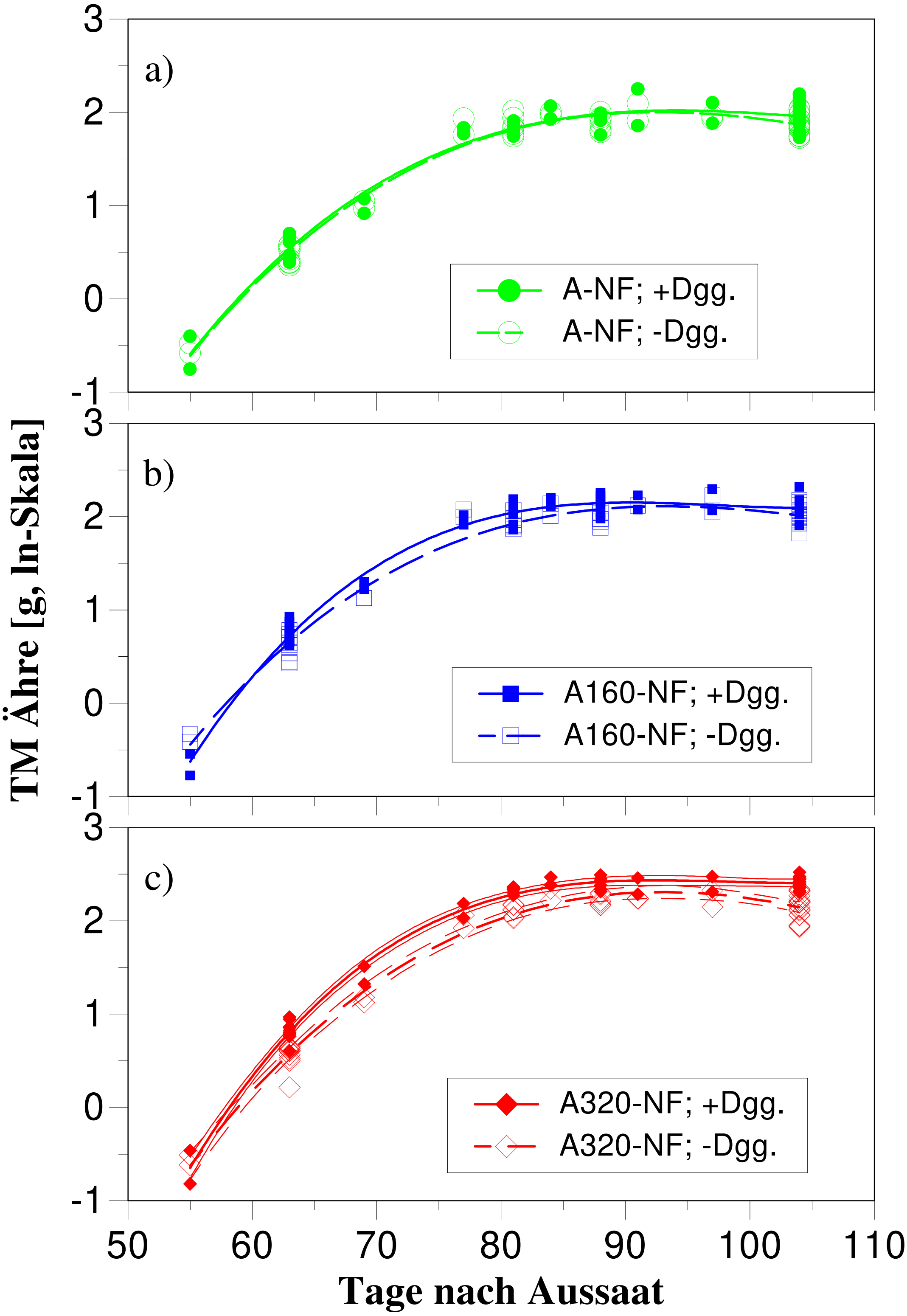

Abb. 3.10: Einfluß der Düngung auf die Ähren-Trockenmasse in den Behandlungen
a) A-NF
b) A160-NF
c) A320-NF
(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

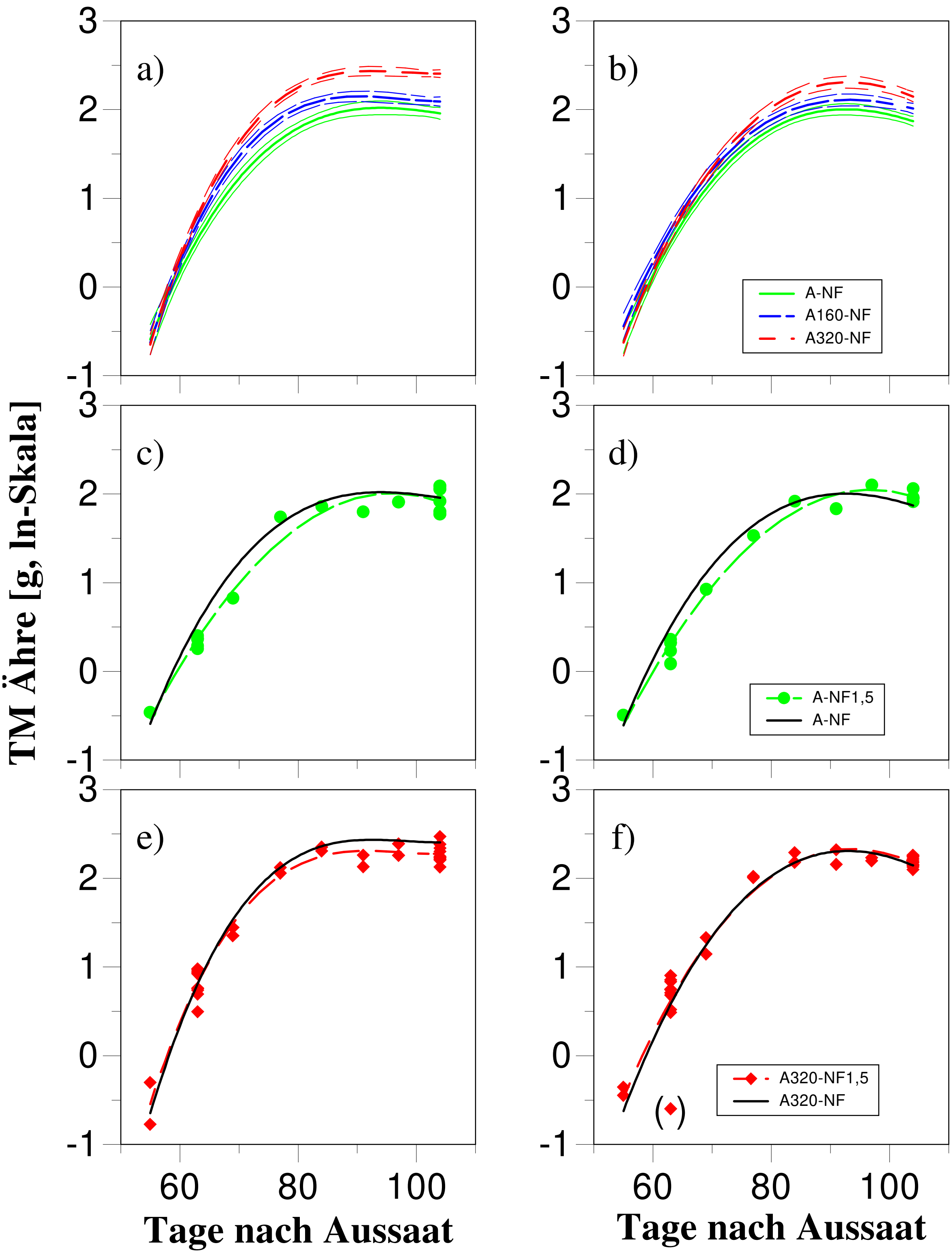

Abb. 3.11: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Ähren-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

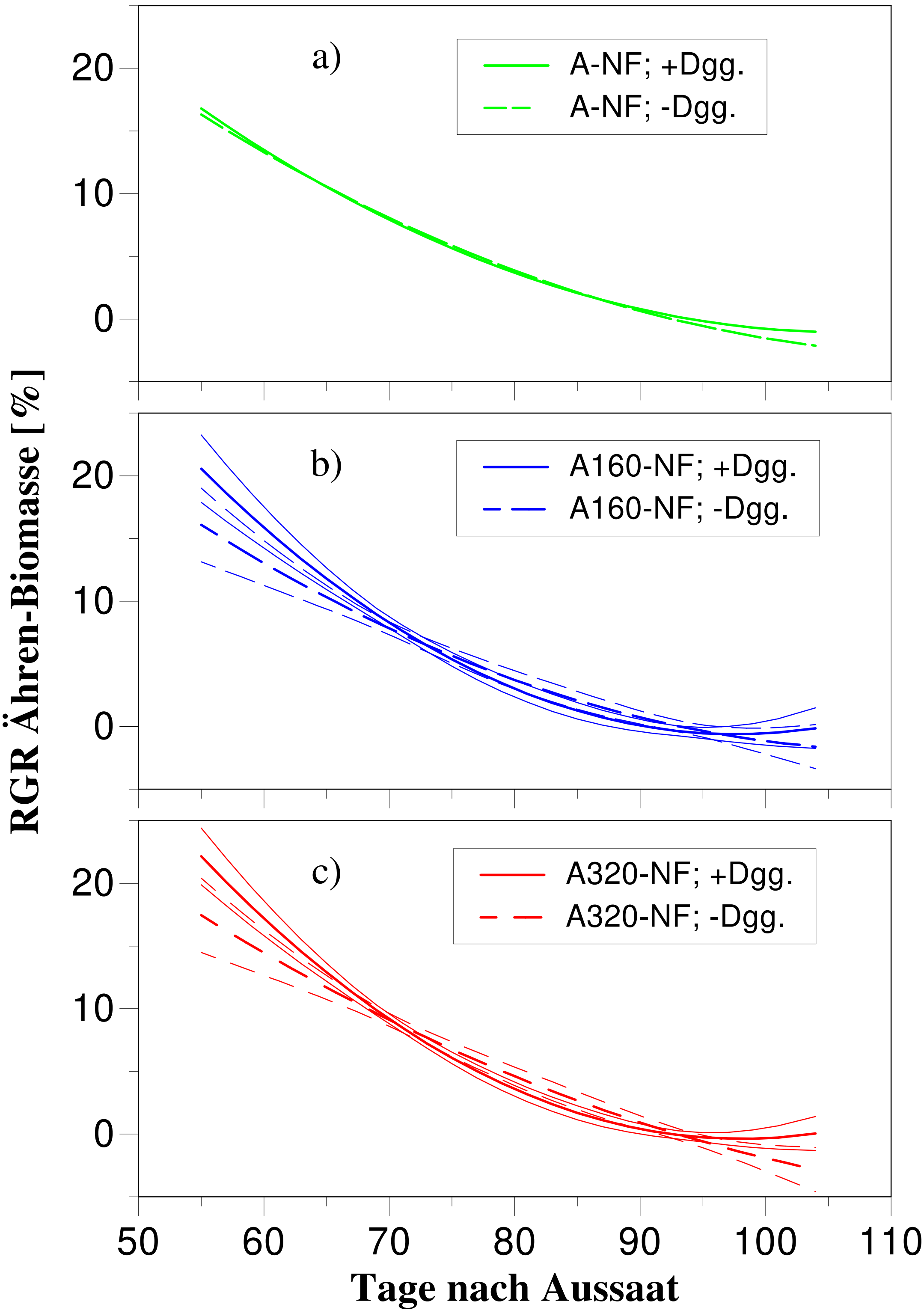

Abb. 3.12: Einfluß der Düngung auf die Relative Wachstumsrate (RGR) der Ähren-Trockenmasse in den Behandlungen
a) A-NF
b) A160-NF
c) A320-NF
(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

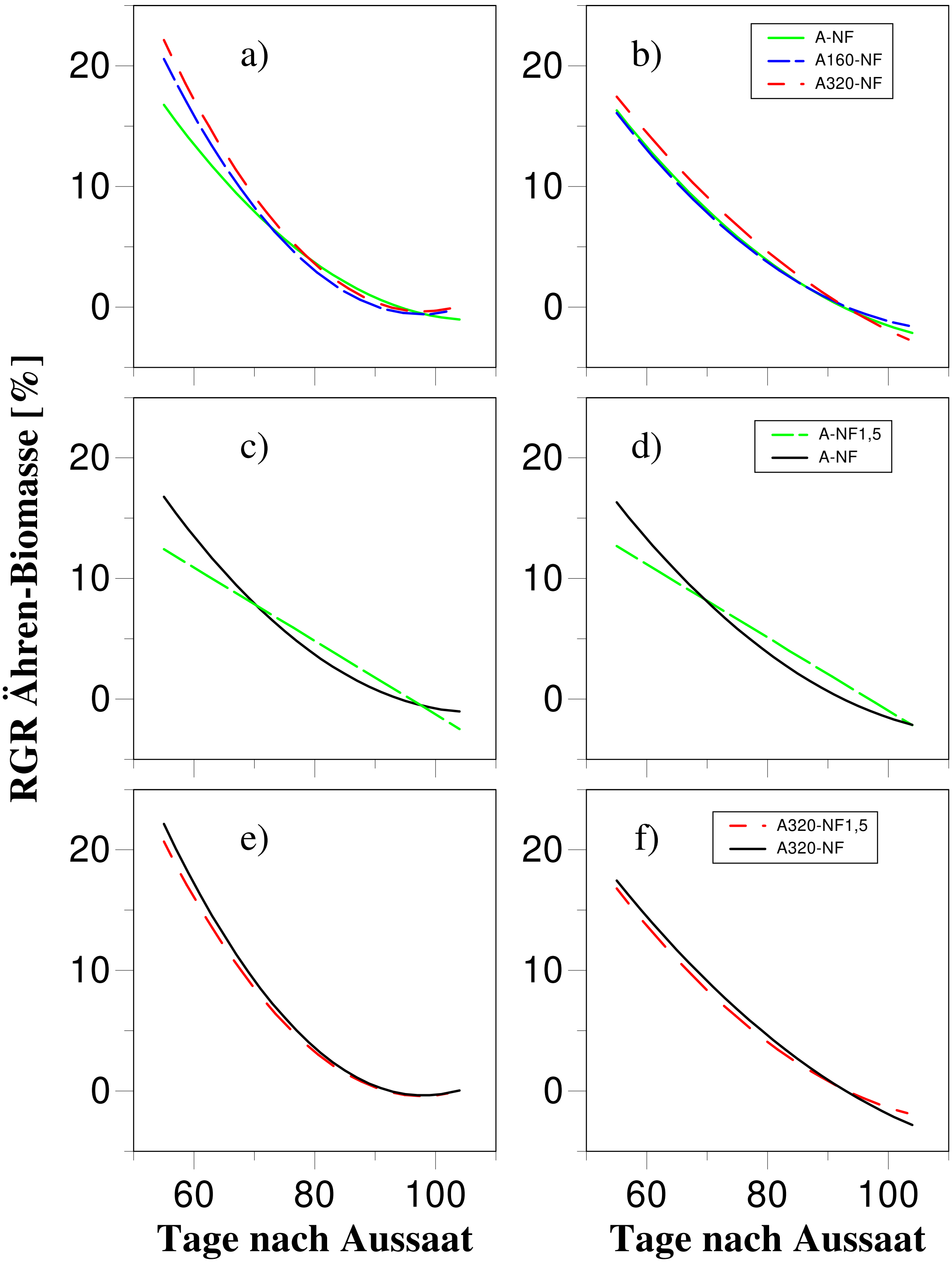

Abb. 3.13: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Relative Wachstumsrate (RGR) der Ähren-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)

b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)

c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)

d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)

e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)

f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

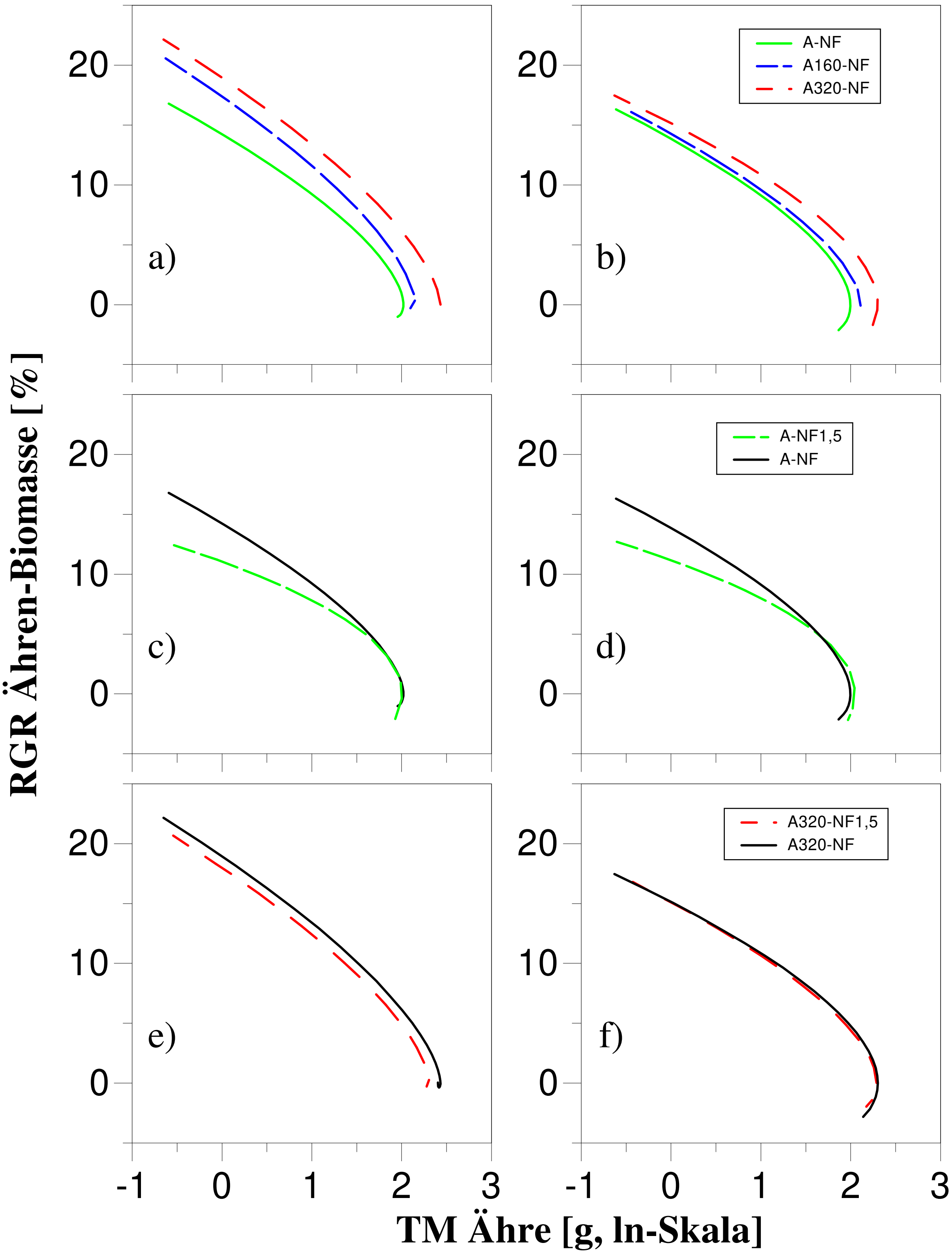

Abb. 3.14: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Relative Wachstumsrate (RGR) der Ähren-Trockenmasse, aufgetragen gegen die Ähren-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

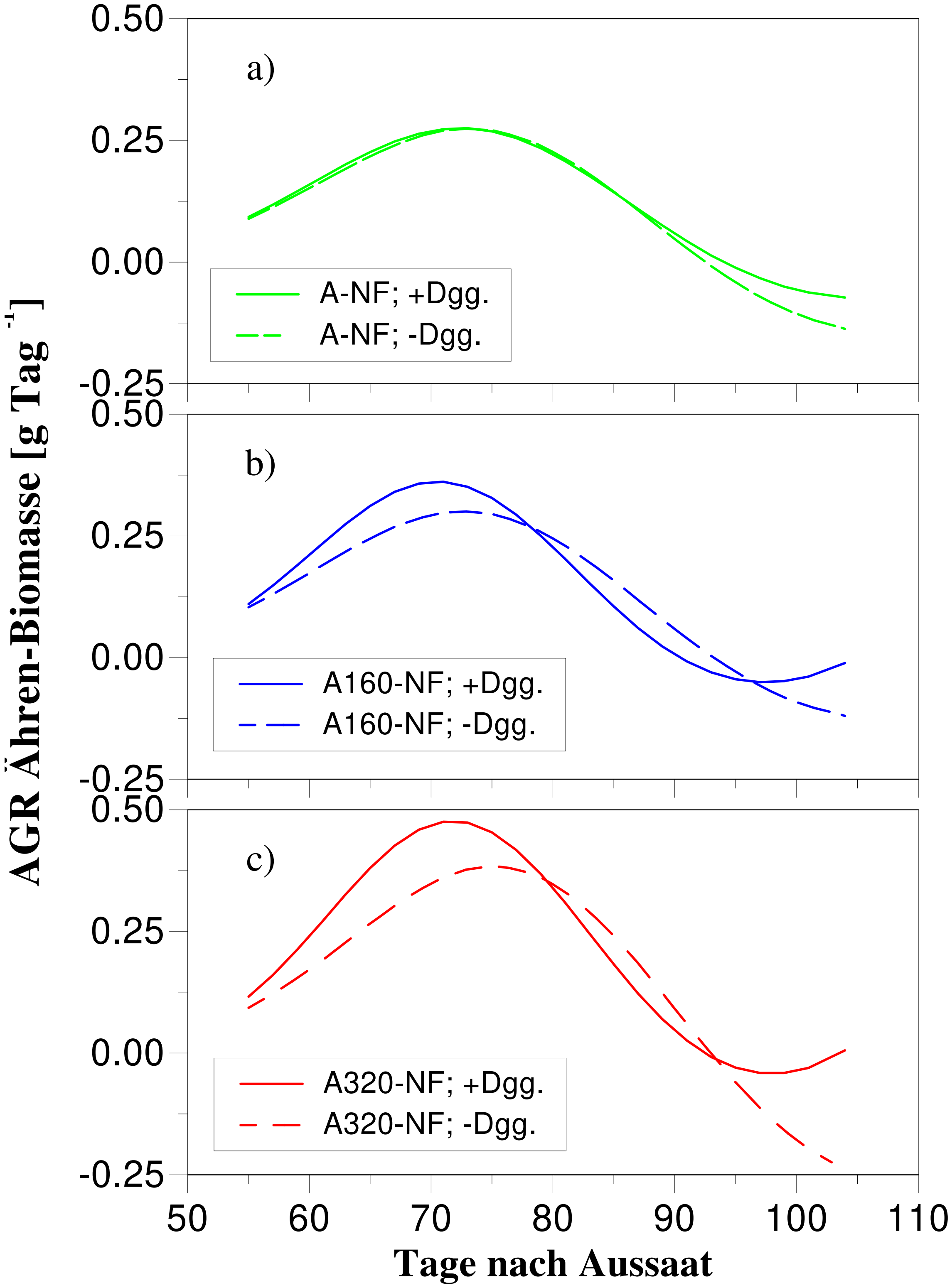

Abb. 3.15: Einfluß der Düngung auf die Absolute Wachstumsrate (AGR) der Ähren-Trockenmasse in den Behandlungen
a) A-NF
b) A160-NF
c) A320-NF

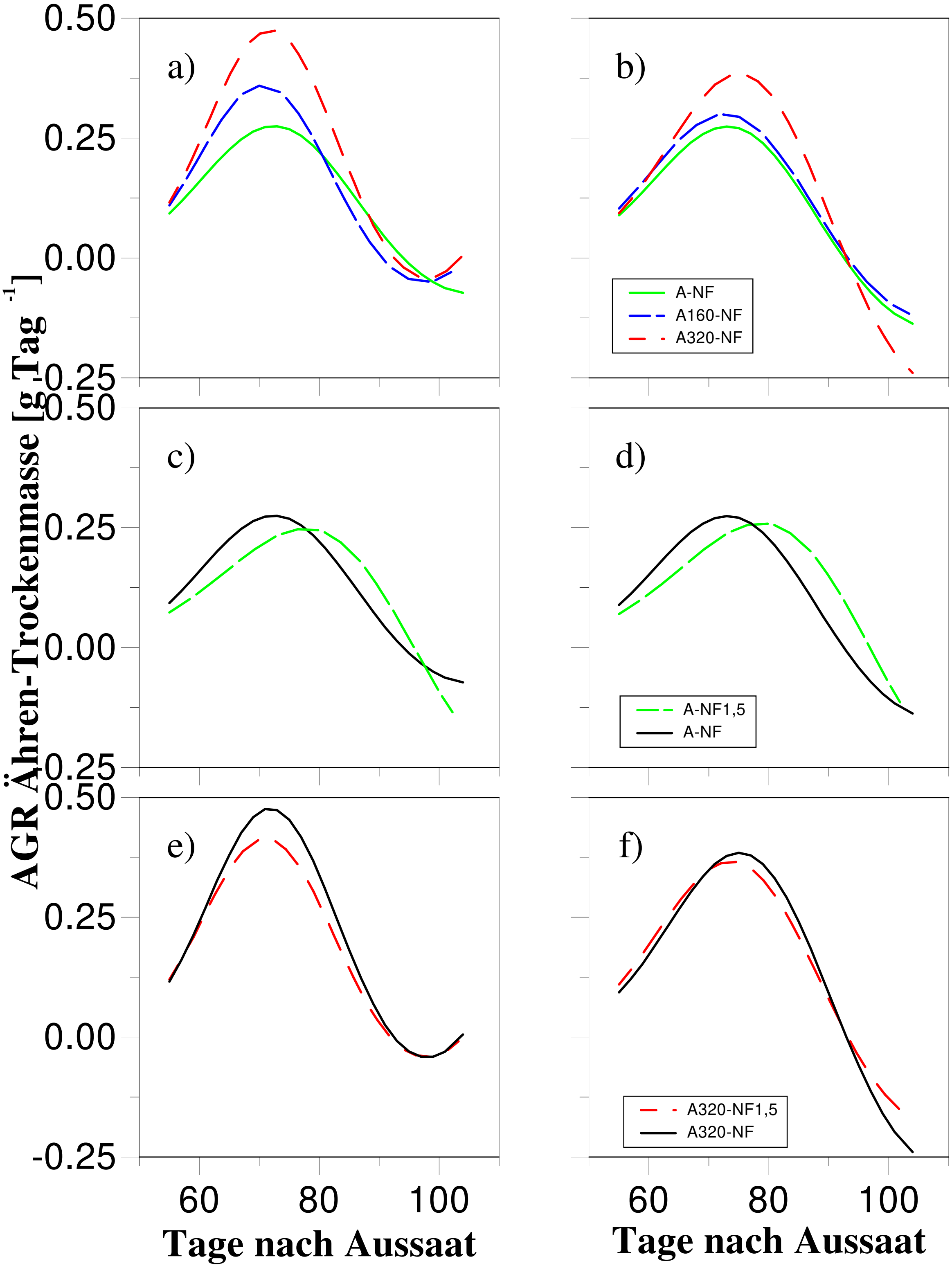

Abb. 3.16: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Absolute Wachstumsrate (AGR) der Ähren-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

III.2.4.3 Das Halmwachstum

Das vorliegende Kapitel beantwortet die Detailfragen der Fragestellung: „Wie beeinflußte erhöhte Kohlendioxid-Konzentration das Halmwachstum?“ „Wie änderte sich die Senkenaktivität und ~stärke von Halmen unter CO_2-Exposition?“ und „Welchen Einfluß hatte eine CO_2-Erhöhung auf die Bestockung?“

Um die beiden ersten Fragen zu klären, wurden Wachstumsraten der Halme auf der Grundlage empirischer Modelle der wöchentlich erhobenen Halm-Trockenmasse-Daten kalkuliert. Relative (Absolute) Wachstumsraten fungieren auch in diesem Kapitel als Maß für die Senkenaktivität (Senkenstärke). Die Rolle der Halme als intermediäre Kohlenhydratspeicher wird ferner für die Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sein.

Die Modellbildung für die Halm-Trockenmasse

An die Daten der Halm-Trockenmassen wurden Polynome vom Grad 3-4 angepasst, die aus biologischer Sicht sinnvoll erschienen. Den statistischen Entscheidungskriterien blieb die Wahl des Polynomgrades überlassen. Der Fit gelang sehr gut, das niedrigste adjusted R^2 betrug 0,949. Die Residuen waren in zwei Fällen nicht normalverteilt; ihre Verteilung war zu steil. Eine Residuenanalyse wies in zwei Fällen hohe Werte nach, die nicht auf Transformationsprobleme zurückzuführen waren. Ursachen für diese Abweichung vom Kurvenverlauf sind nicht bekannt, auf Stimmigkeit mit den Daten der anderen Organe wurde in diesen Fällen geprüft.

Tab. 3.6: Die empirischen Modelle für die Halmtrockenmasse
(B = Parameter der Funktion, n = Zahl der Datenpunkte, p = Zahl der Parameter, Mallow's Cp = Stat. Maßzahl für Wahl des Polynomgrades (Cp ≤ p, Cp = Minimum), adj. R^2 = adjusted R^2, K-S = Kolmogoroff-Smirnoff-Test, Sh-W = Shapiro-Wilks-Test, Bes. = Besonderheit (s. unten))

Exposition	Dgg.	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	n	p	Cp (x^3/x^4)	adj. R^2	K-S/ Sh-W	Bes.
A-NF	+	-14,76735	0,61520	-0,00766	3,10E-05		64	4	3,20/5	0,954	0,19	
A-NF1,5	+	-24,54825	1,16241	-0,01875	1,27E-04	-3,03E-07	23	5	8,15/5	0,990	>0,2/0,57	①
A160-NF	+	-21,59414	0,96676	-0,01435	8,78E-05	-1,80E-07	64	5	5,08/5	0,981	>0,2	
A320-NF	+	-13,85483	0,47283	-0,00294	-2,30E-05	2,05E-07	64	5	5,29/5	0,980	0,03	④⑤
A320-NF1,5	+	-15,77494	0,63739	-0,00756	2,91E-05		46	4	3,62/5	0,972	>0,2/0,70	
A-NF	-	-15,08336	0,62379	-0,00770	3,08E-05		64	4	3,00/5	0,949	>0,2	
A-NF1,5	-	-26,51753	1,31862	-0,02332	1,81E-04	-5,24E-07	23	5	12,06/5	0,988	0,12/0,04	①⑤
A160-NF	-	-19,10151	0,78649	-0,00978	3,95E-05		63	4	3,00/5	0,980	>0,2	②
A320-NF	-	-16,52746	0,66614	-0,00795	3,08E-05		64	4	3,00/5	0,967	0,02	④④
A320-NF1,5	-	-11,68822	0,36523	-0,00115	-3,48E-05	2,29E-07	46	5	5,23/5	0,979	>0,2/0,92	

Besonderheiten: ① 1 Kammer, ② 1 Ausreißer, ④ 1 hoher Wert, ⑤ steile Verteilung

Der Einfluß von Exposition und Düngung auf die Halm-Trockenmasse und deren Wachstumsrate

Der Verlauf der Halmtrockenmassen war in allen Behandlungen geprägt durch eine exponentielle Wachstumsphase mit — in der logarithmischen Auftragung — linear steigenden Trockenmassen. Diese Phase umfaßte die Anlage von Halmen, die Halmelongation und Kohlenhydrateinlagerung. Sie wurde gefolgt von einer Periode, in der die Halmtrockenmasse in behandlungsabhängiger Weise abnahm. Der Grund für die Abnahme war: Es wurden gespeicherte Kohlenhydrate aus den Halmen abgezogen. Unbefriedigend ist das Kurvenverhalten der letzten 5 Tage, in denen die Halm-Trockenmasse für viele Behandlungen wieder anstieg: Ob dies Folge eines Artefaktes ist, wird Gegenstand der Diskussion sein. Dieser allgemeine Kurvenverlauf kann Abbildung 3.17 entnommen werden.

Für die unterschiedlich gedüngten Weizenpflanzen in A-NF, also unter der heutigen CO_2-Konzentration, waren keine verschiedenen Halm-Trockenmassen festzustellen (siehe Abbildung 3.15). Signifikante Unterschiede der Düngungsvarianten ergaben sich in A160-NF um den 100. Tag nach Aussaat (Konfidenzbänder wurden nicht eingezeichnet.). In der höchsten CO_2-Konzentration förderte die Stickstoffversorgung der „+Düngung“ die Halmtrockenmassen ab dem Tag 70 signifikant. Dieses Ergebnis zeigt eine Interaktion von CO_2-Begasung und Düngung an. Unter der Kohlendioxidkonzentration der Außenluft waren die Weizenhalme anfangs schwerer (vgl. Abbildung 3.18). Mit erhöhter CO_2-Konzentration begaste Pflanzen erreichten signifikant höhere maximale Halmtrockenmassen und eine höhere Masse zum Zeitpunkt der Endernte. Die Förderung durch erhöhte CO_2-Konzentration war in der „+Düngung“ stärker, besonders in A320-NF. Der größere Kurvenabstand zwischen A320-NF und A160-NF, +Düngung bei maximaler TM deutet auf eine erhöhte Remobilisierung von gespeicherten Kohlenhydraten in A320-NF hin. Ozon bewirkte unter heutiger CO_2-Konzentration eine Reduktion der Trockenmassen. In der „+Düngung“ war die maximale Trockenmasse geringfügig erniedrigt. Zur Endernte sank die Trockenmasse signifikant. In der „-Düngung“ trat dieser Ozoneffekt nicht auf, die maximale Halmmasse lag aber deutlich (signifikant) niedriger und es fehlte die mit der Kohlenhydrat-Remobilisierung verbundene Abnahme der Trockenmasse. Keinen Einfluß auf die Halmtrockenmasse hatte die Ozonbegasung, wenn sie mit erhöhter CO_2-Konzentration verbunden war.

Abbildung 3.19 zeigt den Einfluß der CO_2-Exposition auf die relative Halmwachstumsrate, die ein Maß für die Senkenaktivität darstellt. Am Anfang wuchsen die Halme der Weizenpflanzen je nach Behandlung um 21-27% pro Tag; dieser Anfangswert sank im Laufe der Ontogenie schnell ab. Dies bedeutet, daß die Senkenaktivität ebenfalls am Anfang am größten war und danach absank.

Erhöhte CO_2-Konzentration förderte das relative Wachstum der Halmtrockenmassen in der „+Düngung" ungefähr bis zum Tag 60 signifikant (vgl. Abbildung 3.19 a), förderte also die Senkenaktivität der Halme, und zwar bis zum Ende der Wachstumsperiode. In der „-Düngung" war das Bild weniger einheitlich (Abbildung 3.19 b). Dies war hauptsächlich zurückzuführen auf die anfangs schwach ausgeprägte Förderung der RGR in A320-NF. Eine signifikante Förderung durch CO_2-Begasung trat in dieser Variante der Stickstoffversorgung um den 50. Tag auf. Der Übersichtlichkeit halber wurde in der Abbildung trotzdem auf Konfidenzbänder verzichtet. Ozon veränderte die Halmwachstumsrate nur in der „+Düngung", wenn die Pflanzen der Kohlendioxidkonzentration der Außenluft ausgesetzt waren. Durch Ozonbegasung waren die relativen Halmtrockenmassenzuwächse des Sommerweizens hier zu Beginn der Exposition größer. Später nahmen die Trockenmassen in dieser Behandlung — ersichtlich an der negativeren RGR — stärker ab.

Absolute Wachstumsraten repräsentieren die Senkenstärke der Halme und werden in Abbildung 3.20 gezeigt. Die Raten wuchsen bis zum 50. Tag nach Aussaat an, erreichten dann ihr Maximum und sanken später wieder ab. In der Phase Tag 70-90 wird ein Teil der Trockenmasse remobilisiert — erkennbar an den negativen Wachstumsraten.

Eine Förderung der Senkenstärke durch CO_2 bestand vom Tag 40 bis zum Ende der Halm-Wachstumsphase. An Ergebnissen der höchsten CO_2-Stufe sind weiterhin zu nennen: Es bestand eine Düngungsabhängigkeit der maximalen Wachstumsrate mit 0,27 g Tag^{-1} in der „+Düngung" und 0,23 g Tag^{-1} in der „-Düngung". In A320-NF, +Düngung wurden mit -0,1 g Tag^{-1} die niedrigsten Wachstumsraten festgestellt. Folglich muß in dieser Variante eine schnellere Remobilisierung erfolgt sein. Ozonwirkungen auf die absolute Wachstumsrate der Halme waren unter heutiger CO_2-Konzentration je nach N-Versorgung verschieden: In der „+Düngung" war die maximale AGR leicht erhöht und die minimale AGR erniedrigt; in der „-Düngung" war es umgekehrt. Demzufolge wurde unter Ozon in der „+Düngung" mehr und in der „-Düngung" weniger remobilisiert. Einen geringen Einfluß hatte Ozon in A320.

Der Einfluß von Exposition und Düngung auf die Bestockung

Dieser Abschnitt wendet sich der Beantwortung der Kapitelfrage „Welchen Einfluß hatte eine CO_2-Erhöhung auf die Bestockung?“ zu. Folgendes ist im Zusammenhang mit der Bestockungsreaktion zu bedenken: Nimmt die Halm-Trockenmasse zu, kann das zurückgeführt werden auf stärkeres Wachstum bestehender Halme oder auf eine erhöhte Neu-Anlage von Halmen. Entsprechend kann eine Remobilisierung von Speicherkohlenhydraten oder — in geringem Ausmaß — eine Halm-Reduktion Ursache für eine Abnahme der Halmtrockenmasse sein. Notwendig für die Interpretation des Halm-Wachstums ist also auch eine zeitlich differenzierte Betrachtung der Bestockungsreaktion. Da sich die Zahl der Triebe im Untersuchungszeitraum nicht stark änderte, eignete sich diese Größe nicht für eine funktionale Modellierung. Statt dessen wurden die Daten der drei „klassischen“ Ernten für eine Darstellung der Triebzahl in den Abbildungen 3.21 und 3.22 herangezogen.

Zu den drei Terminen wurde für die Varianten, die nicht zusätzlichem Ozon ausgesetzt waren, eine zweifache Varianzanalyse mit den Faktoren Düngung und CO_2-Konzentration durchgeführt (siehe Tabelle 3.7). Im Stadium des Schossens war die Voraussetzung der Varianzhomogenität aufgrund einer hohen Variation der Triebzahl in der Behandlung A-NF,+Düngung nicht gegeben (siehe Ergebnisse des Bartlett- und Cochran-Testes). Die in Tabelle 3.7 für diesen Termin angegebenen Signifikanzen der Faktoreffekte müssen demzufolge nach unten korrigiert werden. Die stärksten Effekte gingen zu diesem Zeitpunkt von der Stickstoffversorgung aus (schwach signifikant). Während der Vollblüte hatten sowohl CO_2-Konzentration als auch Düngung einen höchst- bzw. hochsignifikanten Einfluß auf die Zahl der Triebe. Zur Erntereife veränderten beide Faktoren die Triebzahl nicht. Zu keinem Zeitpunkt konnte eine Wechselwirkung nachgewiesen werden.

Tab. 3.7: Zwei-faktorielle Varianzanalyse: Einfluß von CO_2-Konzentration und Düngung auf die Zahl der Triebe pro Topf (FG = Freiheitsgrade, EA = Erklärungsanteil)

a) am Tag 41 (Stadium: Schossen) Cochran's-C: 0,010 Bartlett-Box F: 0,104

Quelle der Variation	Quadratsumme	FG	Mittlere Quadratsumme	F Wert	Signifikanz von F
CO_2	21,43	2	10,72	2,85	0,067 (n.s.)
Düngung	17,07	1	17,07	4,54	0,038 (*)
CO_2 x Düngung	15,83	2	7,92	2,11	0,132 (n.s.)
Modell (EA 21,1%)	54,33	5	10,87	2,89	0,022 (*)
Innerhalb+Residual	203,00	54	3,76		
Total	257,33	59	4,36		

b) am Tag 63 (Stadium: Vollblüte) Cochran's-C: 0,521 Bartlett-Box F: 0,260

Quelle der Variation	Quadratsumme	FG	Mittlere Quadratsumme	F Wert	Signifikanz von F
CO_2	57,90	2	28,95	10,28	0,000 (***)
Düngung	26,67	1	26,67	9,47	0,003 (**)
CO_2 x Düngung	14,03	2	7,02	2,49	0,092 (n.s.)
Modell (EA 39,3%)	98,60	5	19,72	7,01	0,000 (***)
Innerhalb+Residual	152,00	54	2,81		
Total	250,60	59	4,25		

c) am Tag 104 (Stadium: Erntereife) Cochran's-C: 0,147 Bartlett-Box F: 0,468

Quelle der Variation	Quadratsumme	FG	Mittlere Quadratsumme	F Wert	Signifikanz von F
CO_2	15,63	2	7,82	1,81	0,173 (n.s.)
Düngung	11,27	1	11,27	2,61	0,112 (n.s.)
CO_2 x Düngung	1,03	2	0,52	0,12	0,887 (n.s.)
Modell (EA 10,7%)	27,93	5	5,59	1,29	0,280 (n.s.)
Innerhalb+Residual	233,00	54	4,31		
Total	260,93	59	4,42		

Signifikanzniveau: (n.s.) P >0,05 (*) 0,05 • P >0,01 (**) 0,01 • P >0,001 (***) P •0,001

Die Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff hatte nur in zwei Fällen einen signifikanten Einfluß auf die Zahl der Triebe (vgl. Abbildung 3.21): Während des Schossens, am Tag 41, erhöhte die Düngung die Halmzahl in A-NF; zur Vollblüte (Tag 63) trat eine signifikante Förderung in A320-NF auf. Eine Förderung der Halmzahl durch die Düngung war aber generell ausgeprägt, so daß gutgedüngte Pflanzen zwischen 0,5 und 2,5 Halme mehr besaßen.

Der wichtigste in Abbildung 3.22 erkennbare CO_2-Effekt war, daß die Halmzahl sowohl in der „+Düngung“ als auch in der „-Düngung“ unter erhöhtem CO_2 noch nach der sogenannten Bestockungsphase zwischen dem Schossen und der Blüte stark zunahm. Dies führte in der „+Düngung“ nach dem ersten Erntetermin zu einer Umkehrung der „Halm“-Verhältnisse: Hatten Umgebungsluft-Pflanzen anfangs mehr Halme (signifikant im Vergleich zu A160-NF), waren es zur Blüte Pflanzen der CO_2-Begasungsvarianten, die mehr Halme trugen. Für die Pflanzen, die in A320-NF gewachsen waren, waren es zu diesem Zeitpunkt signifikant mehr. Da Halme nicht gezählt wurden, wenn ihre Länge 5 cm unterschritt, konnte es durch Reduktionsprozesse auch zu einem Absinken der Halmzahl kommen. Darauf beruhend wurde die große Halmzahl der Behandlung A320-NF bis zur

Endernte wieder reduziert, so daß letztendlich die Halmzahl der Endernte unabhängig von der Begasung war. In der „-Düngung“ war die Halmzahl am Tag 41 in allen CO_2-Stufen gleich; danach trugen Pflanzen der CO_2-Erhöhung geringfügig mehr Triebe. Eine signifikante Beeinflussung der Halmzahl zur Endernte war auch hier nicht gegeben.

Der Ozoneinfluß auf die Halmzahl, für den wegen des Kammerausfalls keine Varianzanalyse durchgeführt werden konnte, richtete sich unter Umgebungs-CO_2-Konzentration stark nach der Stickstoffversorgung. Im Vergleich zu A-NF förderte Ozon in A-NF1,5; +Düngung erst zwischen Blüte und Endernte die Halmzahl so stark, daß die Halmzahl der mit Umgebungsluftozon gewachsenen Pflanzen erreicht werden konnte. Diese Reaktion stellt eine Anlage von Nottrieben dar. Vor der Nottriebsreaktion lag die Zahl der Triebe unter Ozoneinfluß tendenziell niedriger. In A-NF1,5; -Düngung konnte keine Anlage von Nottrieben festgestellt werden, vielmehr kam es durch Ozon nach anfänglich identischer Zahl zu einer kontinuierlichen Reduktion der Halmzahl bis der Unterschied zur Endernte signifikant wurde. Eine Ozonwirkung auf die Halmzahl unter erhöhtem CO_2 war in der „+Düngung“ gar nicht ausgebildet; in der „-Düngung“ waren unter Ozoneinfluß anfangs schon mehr Halme angelegt (signifikant), später wurden auch hier identische Halmzahlen festgestellt.

Kurzzusammenfassung:

- Der Verlauf der Halm-Trockenmasse läßt die Phase des Wachstums und der Kohlenhydrat-Einlagerung und die der Kohlenhydrat-Remobilisierung erkennen. Eine Interaktion CO_2 x Dgg. ist sichtbar mit im Düngungsvergleich signifikanter Förderung in A320-NF, +Dgg. ab Tag 70. Halme waren in A-NF anfangs schwerer als bei CO_2-Exposition. Durch die höchste CO_2-Stufe wurde die maximale TM und diejenige der Endernte signifikant erhöht. In A-NF1,5 reduzierte Ozon in der +Dgg. stärker die End-TM, in der -Dgg. stärker die maximale TM.
- Die RGR der Halm-Trockenmasse und damit die Senkenaktivität wurde durch CO_2 bis zum Tag 60 (in der +Dgg.), auf jeden Fall bis zum Ende der Wachstumsperiode gefördert. Ozon hatte einen Einfluß nur in A-NF1,5; +Dgg..
- CO_2 erhöhte die Senkenstärke (Halm-AGR) vom Tag 40 bis zum Ende der Wachstumszeit. Maximale AGR unterschieden sich düngungsabhängig in A320-NF (Interaktion CO_2 x Dgg.). In A320-NF, +Dgg. wurde mehr an Kohlenhydraten (minimale AGR) remobilisiert. Deutliche Ozonwirkungen existierten nur in A-NF1,5: In der +Dgg. wurde mehr, in der -Dgg. weniger remobilisiert.
- Gut gedüngte Pflanzen besaßen zu allen Terminen 0,5-2,5 Halme mehr. Unter CO_2 nahm die Halmzahl zwischen Schossen und Blüte zu; zur Blüte wurde die Halmzahl dann in der +Dgg. durch CO_2 signifikant gefördert. Zur Endernte war die Bestockung unabhängig von der Begasung. In A-NF1,5; +Dgg. erhöhte Ozon die Halmzahl vor der Endernte; hier lag eine Nottriebsreaktion vor.

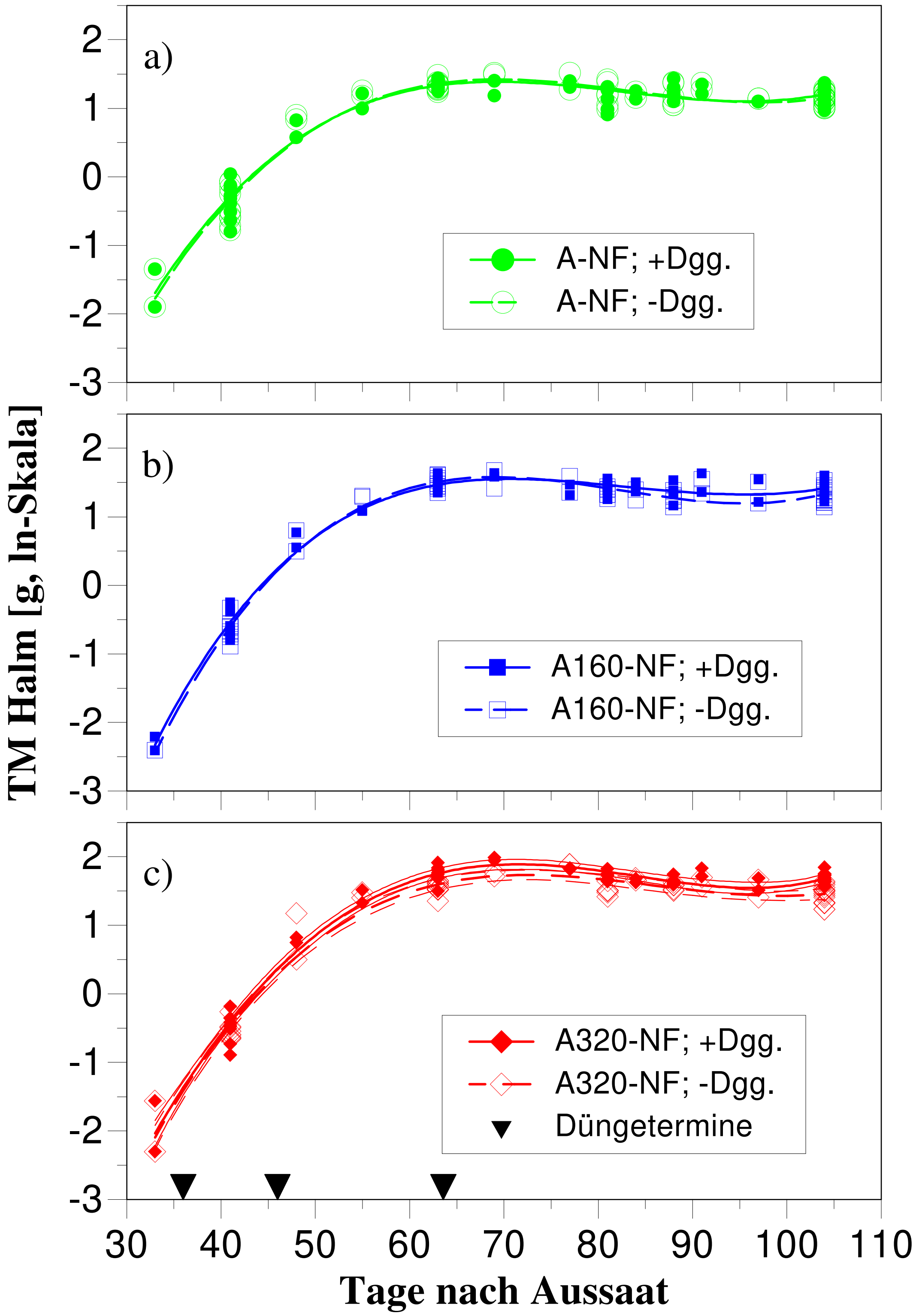

Abb. 3.17: Einfluß der Düngung auf die Halm-Trockenmasse in den Behandlungen
a) A-NF
b) A160-NF
c) A320-NF
(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

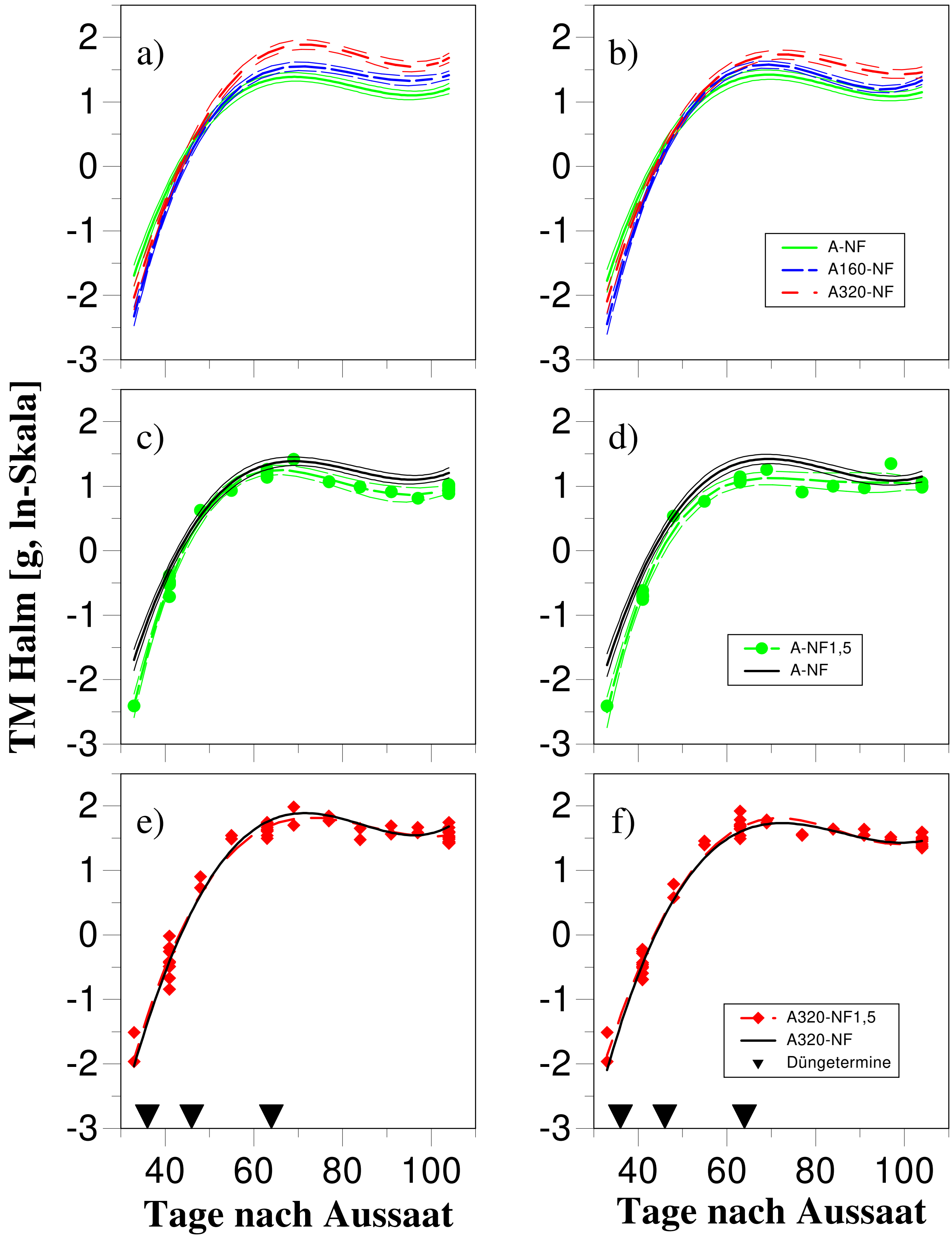

Abb. 3.18: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Halm-Trockenmasse
a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)
(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

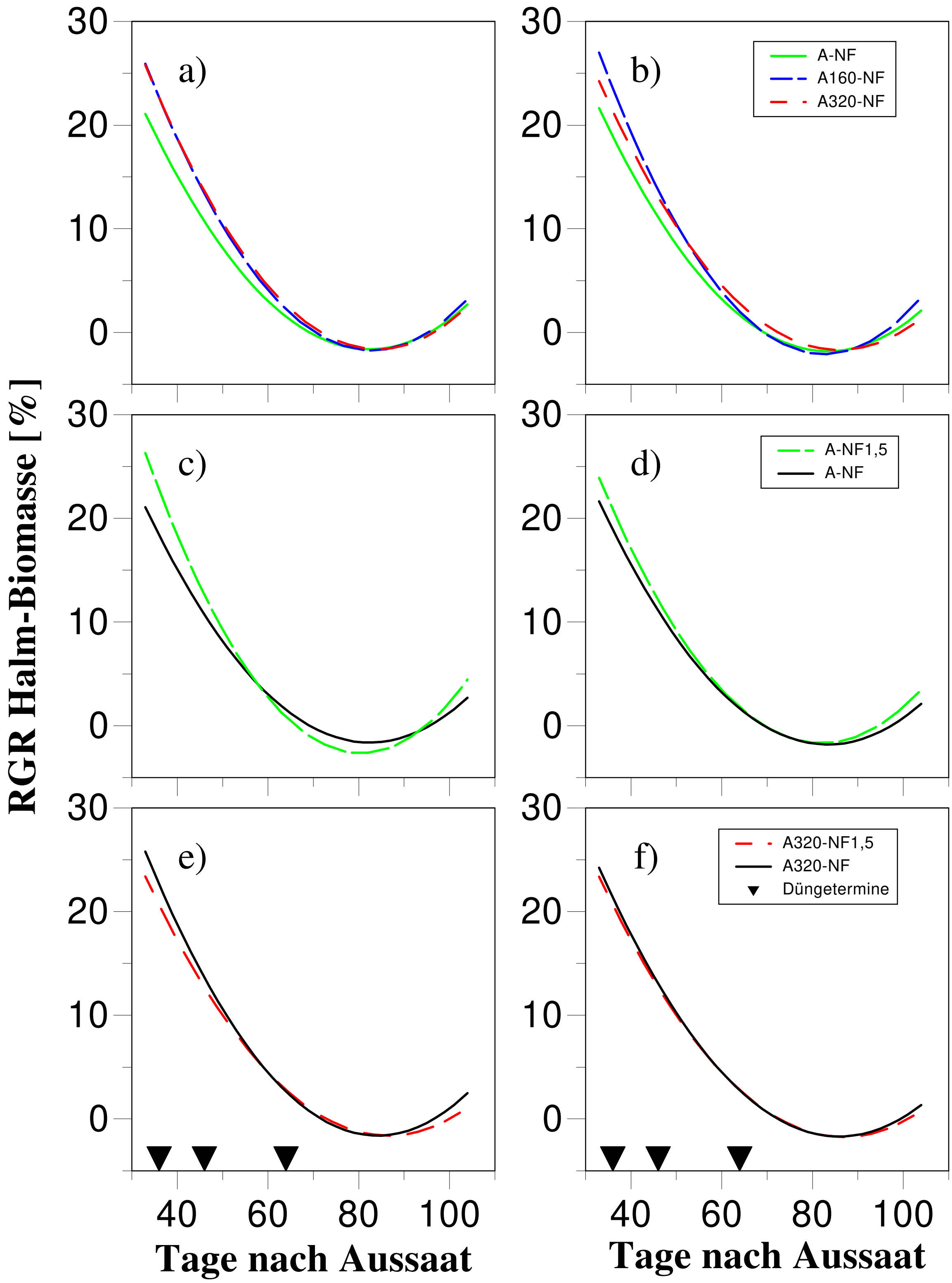

Abb. 3.19: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Relative Wachstumsrate (RGR) der Halm-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

(Zwei Funktionen sind signifikant verschieden, wenn die sie begleitenden Konfidenzbänder einander nicht überlappen. Konfidenzbänder wurden nur bei Vorliegen von signifikanten Unterschieden eingezeichnet.)

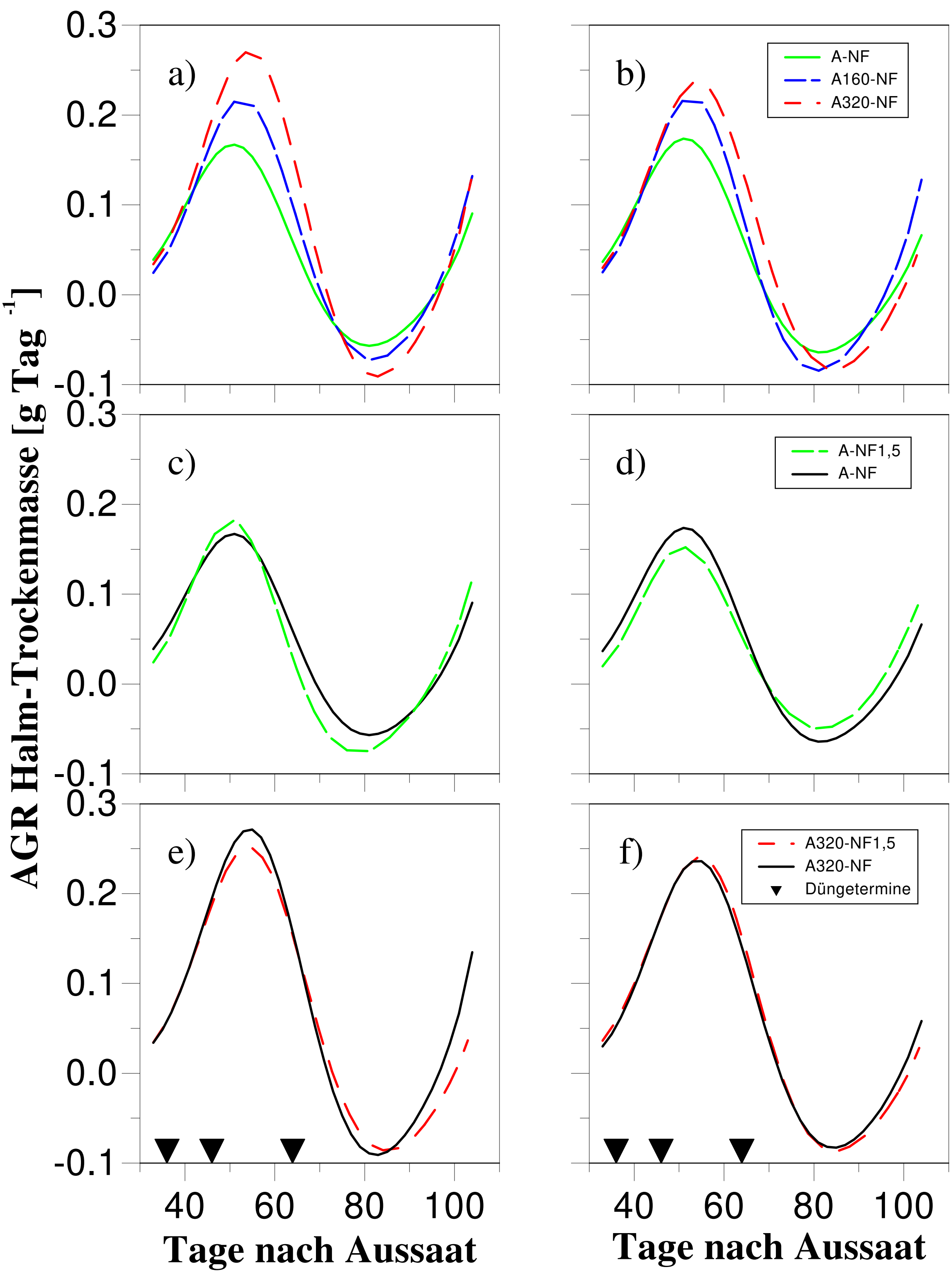

Abb. 3.20: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Absolute Wachstumsrate (AGR) der Halm-Trockenmasse

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

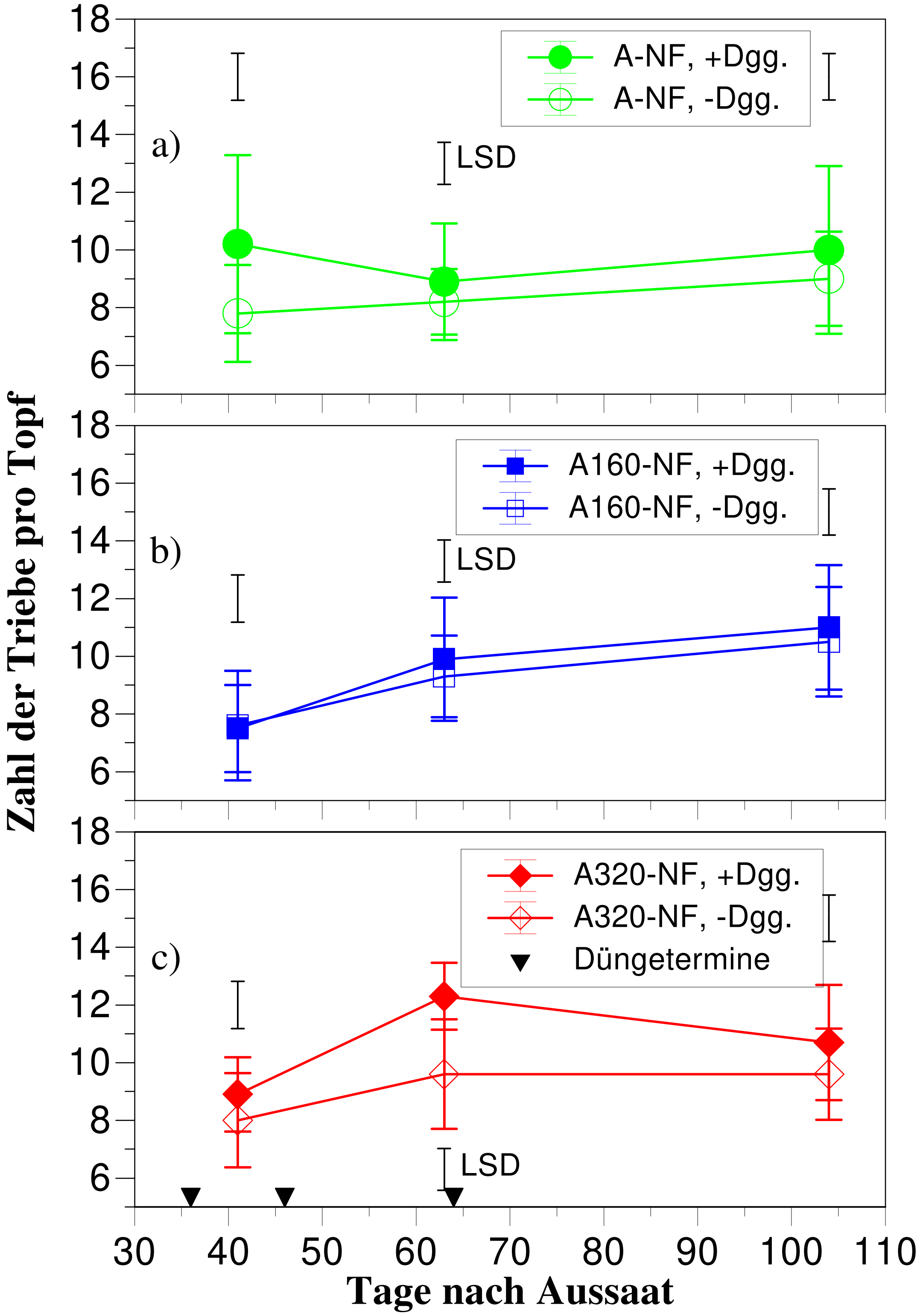

Abb. 3.21: Einfluß der Düngung auf die Zahl der Triebe pro Topf
(Tag 41 „Schossen“; Tag 63 „Vollblüte“; Tag 104 „Erntereife“; n=5 Töpfe pro Kammer u. Variante)
a) A-NF
b) A160-NF
c) A320-NF
(Zwei Mittelwerte sind signifikant verschieden, wenn ihr Unterschied größer als der eingetragene LSD-Wert ist.)

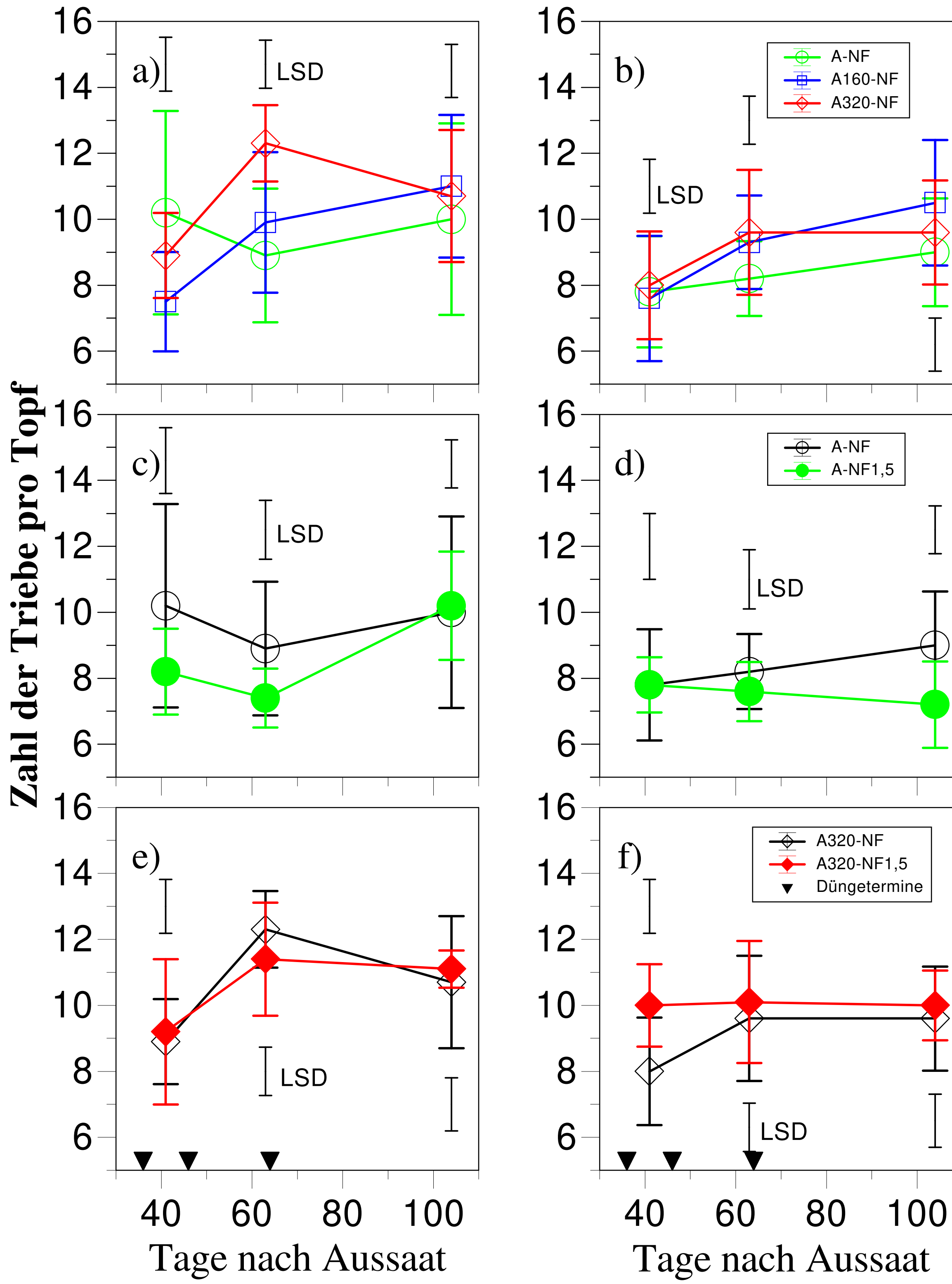

Abb. 3.22: Einfluß der CO_2- und der O_3-Konzentration auf die Zahl der Triebe pro Topf (Tag 41 „Schossen“; Tag 63 „Vollblüte“; Tag 104 „Erntereife“, n=5 Töpfe pro Kammer u. Variante)

a) CO_2-Einfluß (**+Dgg.**)
b) CO_2-Einfluß (**-Dgg.**)
c) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**+Dgg.**)
d) O_3-Einfluß A-NF/A-NF1,5(**-Dgg.**)
e) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**+Dgg.**)
f) O_3-Einfluß A320-NF/A320-NF1,5(**-Dgg.**)

(Zwei Mittelwerte sind signifikant verschieden, wenn ihr Unterschied größer als der eingetragene LSD-Wert ist.)

III.2.4.4 Die Kohlenhydratreserven der Halme

Das vorliegende Kapitel soll eine Klärung der Fragen herbeiführen: Wie reagierten die temporären Kohlenhydratreserven im Halm auf CO_2; welchen Beitrag lieferten sie zur Kornfüllung?

Hierzu wurde 1994 an der Sorte Minaret eine Kohlenhydratanalytik in einzelnen Internodien der Haupthalme durchgeführt. Beginnnend mit dem Stadium Schossen und endend mit der Erntereife wurden dafür 4 Töpfe pro Variante in wöchentlichem Abstand geerntet. Für Biomassezwecke wurden Trockenmassen einzelner Fraktionen bestimmt. In diese Untersuchung wurden nur gut gedüngte Weizenpflanzen der Expositionsvarianten A-NF und A320-NF einbezogen.

Wachstum und Ertrag der Sorte waren 1994 durch CO_2-Erhöhung um 49,7 bzw. 43,2 % gesteigert (siehe Tabelle 3.8). Von allen untersuchten Pflanzenorganen zeigten die Getreidehalme mit 65,7 und 107% die höchsten relativen Trockenmassenzunahmen. Für die Haupthalme war dies nicht nur auf ein gefördertes Längenwachstum zurückzuführen — sondern auch auf verstärkte Einlagerungsprozesse. Halme remobilisierten unter erhöhtem CO_2 größere Anteile ihrer Trockenmasse (vgl. Tabelle 3.8). Generell überstieg die Förderung der Nebenhalm-Parameter durch CO_2 die der Haupthalm-Parameter. Durch CO_2 wurde die Bestockung gefördert und die Ährenzahl erhöht. Zuwächse der Blatt-Trockenmassen waren gering (siehe Tabelle 3.8).

Folgende Ergebnisse erbrachte die Bestimmung der Fructankonzentration in den Halminternodien: Bei im Vergleich mit Literaturwerten insgesamt sehr niedrigen Konzentrationen zeigte sich unter erhöhtem CO_2 im Haupthalm eine Steigerung maximaler Fructangehalte (Fraktion 1 und 3, siehe Abbildung 3.23) sowie eine Verschiebung des zeitlichen Verlaufs, insbesondere eine Verzögerung der Auslagerung (siehe hochsignifikante Unterschiede von Fraktion 2 und 3).

Die drastische Reaktion der Menge wasserlöslicher Kohlenhydrate im Haupthalm auf CO_2 ist dargestellt in Abbildung 3.24. Gefördert wurden alle im Haupthalm gemessenen Komponenten (Fructane, Saccharose, Red. Zucker). Die Fructanmenge jedoch zeigte die massivsten Zuwächse. Fructane akkumulierten in A-NF bis zur vollendeten Blüte (60. Tag nach Aussaat), während diese Phase unter erhöhtem CO_2 8 Tage später endete.

<u>Kurzzusammenfassung:</u>

- Oberirdische Trockenmasse und Ertrag der Sorte Minaret waren 1994 durch CO_2-Verdopplung um 50 und 43% gesteigert. Von allen Organen zeigten Halme die höchste Trockenmassenzunahme, eine verstärkte Einlagerung und Remobilisierung, aber auch eine Längenzunahme. CO_2 förderte die Bestockung und erhöhte die Ährenzahl. Reaktionen der Blatt-TM waren gering.
- Maximale Fructankonzentrationen in den unteren Haupthalm-Internodien und im Ährenstiel (signifikant) wurden durch CO_2 erhöht. Unter CO_2-Einfluß verzögerte sich die Auslagerung.
- Die Gesamtmenge aller im Haupthalm eingelagerten Kohlenhydrat-Komponenten (Fructane, Saccharose, Red. Zucker) erhöhte sich durch CO_2-Begasung. Die Akkumulation von Fructanen endete unter erhöhtem CO_2 8 Tage später.

Tab. 3.8: Die Reaktion von Weizenorganen auf CO_2-Begasung. Sorte Minaret im Jahr 1994.
Mittelwerte ± Standardabweichungen bei Endernte (außer [1)]), Trockenmasse (TM) in [g/Topf]

Parameter	A-NF	A320-NF	Prozentualer Zuwachs
TM Gesamtpflanze [g]	6,22 ± 1,63	9,31 ± 1,79	49,7
Kornertrag [g]	3,38 ± 1,37	4,84 ± 1,05	43,2
Ährenzahl	2,63 ± 0,74	3,50 ± 0,76	33,1
Halmzahl	5,30 ± 1,20	6,45 ± 1,43	21,7
TM Körner am Haupthalm [g]	1,63 ± 0,37	1,92 ± 0,14	17,5
TM Ähre am Haupthalm [g]	1,96 ± 0,37	2,46 ± 0,15	25,5
TM Blätter am Haupthalm [g]	0,92 ± 0,09	1,01 ± 0,13	9,8
Maximale TM Haupthalm[1)] [g]	0,67 ± 0,07	1,11 ± 0,18	65,7
TM Haupthalm [g]	0,58 ± 0,14	0,80 ± 0,25	37,9
Länge des Haupthalms [cm]	50,43 ± 6,52	61,01 ± 4,72	21,0
TM Ähren an Seitenhalmen [g]	2,10 ± 1,20	3,74 ± 1,17	78,1
Maximale TM Seitenhalme[1)] [g]	1,72 ± 0,55	3,56 ± 1,55	107,0
TM Seitenhalme [g]	1,30 ± 0,89	1,69 ± 0,51	
TM Blätter an Seitenhalmen [g]	0,60 ± 0,03	0,70 ± 0,08	16,7

[1)]Maximal-Werte der Untersuchungsphase

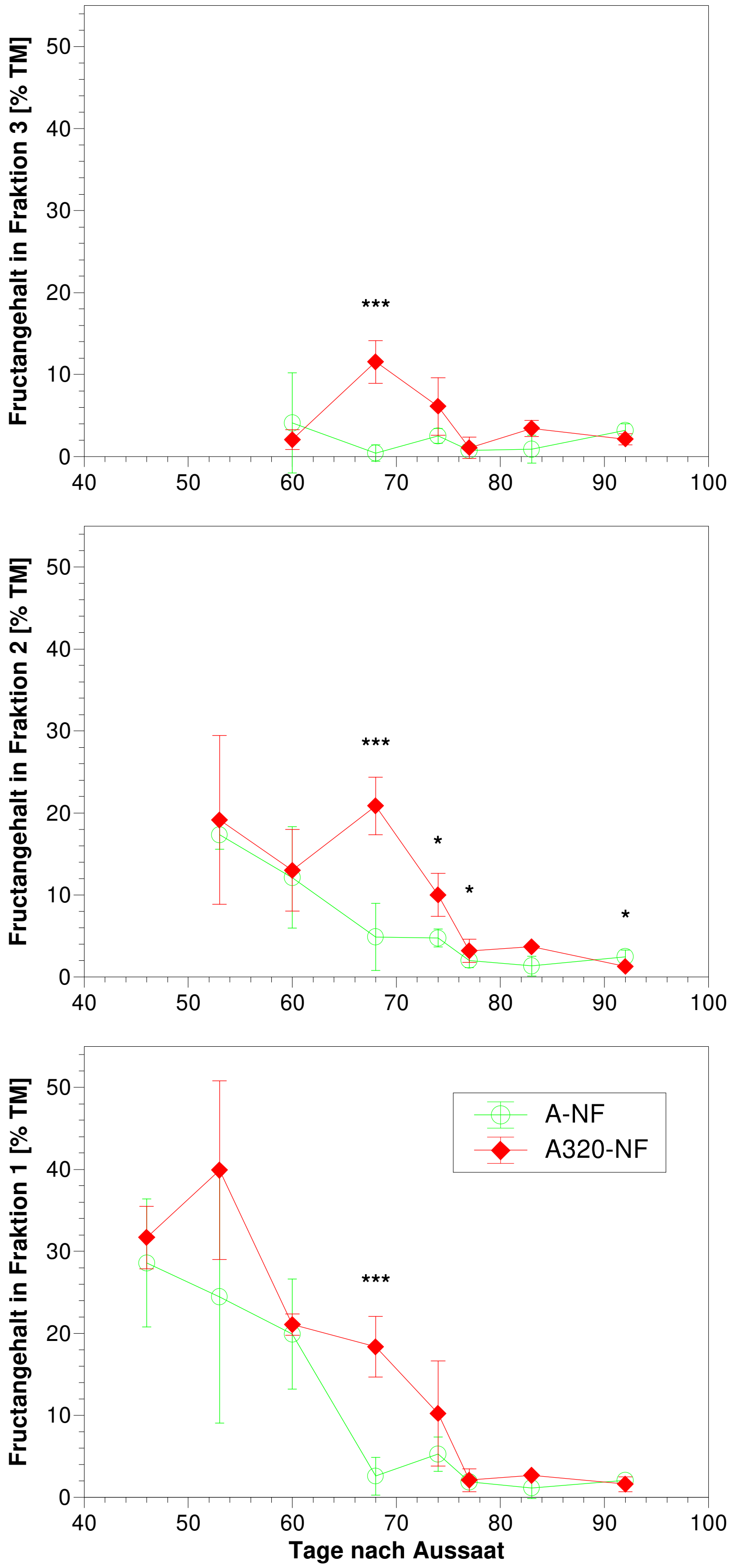

Abb. 3.23: Einfluß der CO_2- Konzentration auf den Fructangehalt [% TM] in den Internodien-Fraktionen 1,2,3 (n = 4 Töpfe pro Variante). Sorte Minaret im Jahr 1994.
Ergebnisse des t-Tests für unabhängige Stichproben: (* 0,05 • P > 0,01;** 0,01 • P > 0,001; *** P •0,001)

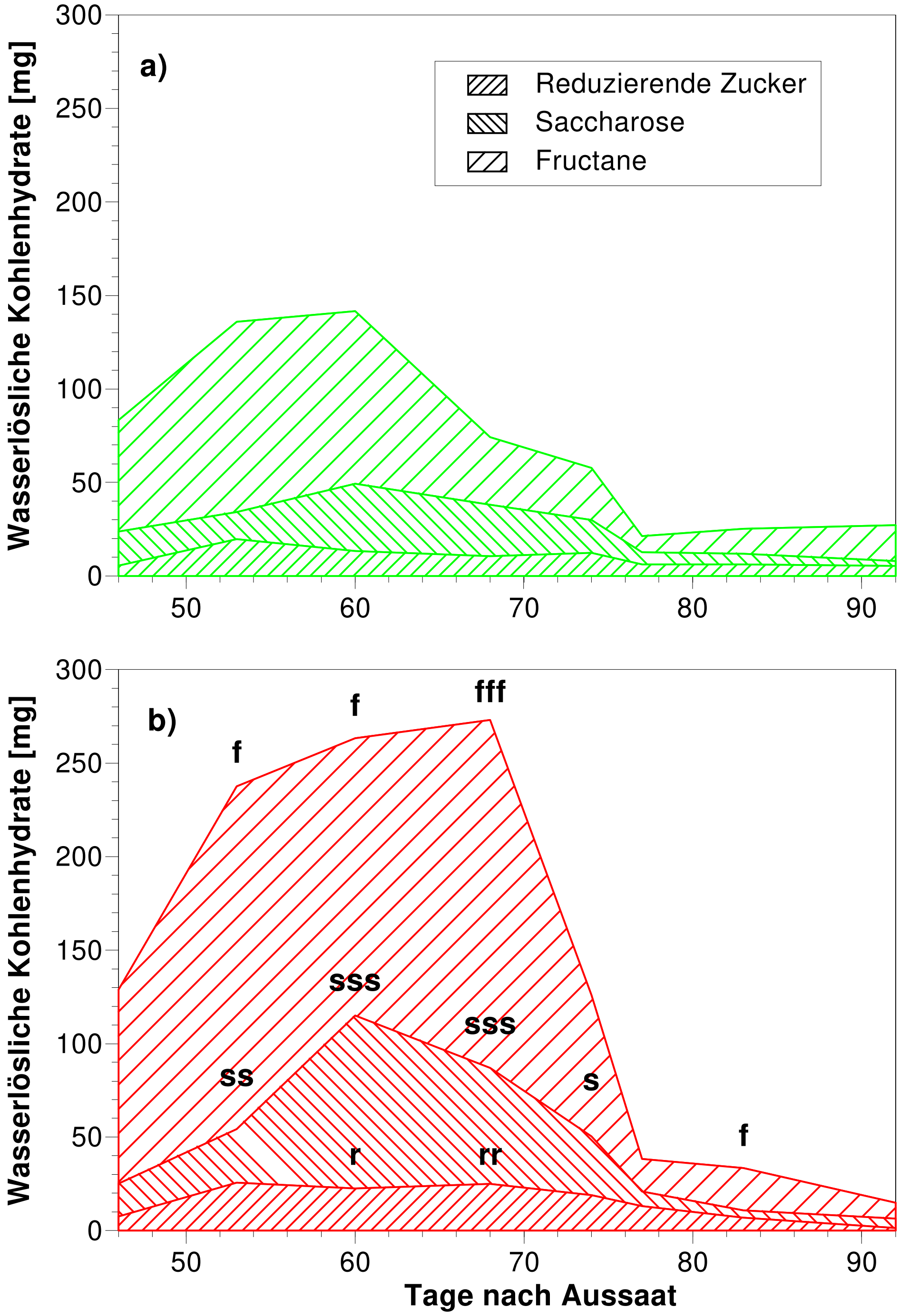

Abb. 3.24: Einfluß der CO_2-Konzentration auf die Zusammensetzung der Wasserlöslichen Kohlenhydrate im Haupthalm (n = 4 Töpfe pro Variante). Sorte Minaret im Jahr 1994.
a) CO_2-Außenkonzentration (A-NF)
b) Erhöhte CO_2-Konzentration (A320-NF)
Ergebnisse des t-Tests für unabhängige Stichproben werden dargestellt für Fructane/Saccharose/Reduzierende Zucker als f/s/r $p<0{,}05$; ff/ss/rr $0{,}001<p<0{,}01$; fff/sss/rrr $p<0{,}001$.