

Da HEINZ (2000) nur über Datensätze mit hoher Bodenfeuchte verfügen konnte (keine Sommer-/Herbst-Daten), konnte sie nur die "theoretische" optimale Bodenfeuchte ermitteln (siehe Tab. 3.5-D). Diese lag bei 65 Vol.-%, einem verhältnismäßig unrealistischen Wert, da dann fast der gesamte Bodenporenraum des Lindener Grünlands wassergefüllt wäre. Daher könnte diffusiver Gasaustausch kaum noch stattfinden, und die Bestandesatmungsraten müßten aufgrund von Sauerstoffmangel im Boden bereits rückläufig sein. Die sich hier über den größeren Datensatz ergebende optimale Bodenfeuchte liegt für beide CO₂-Behandlungen bei realistischeren Werten, nämlich bei 40,3 Vol.-% für erhöhtes CO₂, und bei 39,3 Vol.-% für die Kontrollbehandlung.

Berechnet man mit der in Tab. 3.5-D angegebenen Koeffizienten, d.h. mit der Modellbeschreibung der Abhängigkeit der Bestandesatmung von Temperatur und Feuchte, den Q₁₀-Wert für die Raten unter erhöhtem und aktuellen CO₂, so ergibt sich für die E-Raten ein Q₁₀ von 2,45 und für die A-Raten ein Q₁₀ von 2,68. Die Temperatursensitivität der Bestandesatmung ist unter erhöhtem CO₂ also allenfalls leicht verändert.

3.6 Lachgasflüsse in den FACE-Ringen

3.6.1 Allgemeiner Verlauf und Extremwerte der Lachgasflüsse

Während des gesamten Untersuchungszeitraums traten keine nennenswerten negativen Lachgasflüsse (d.h. Aufnahme in den Boden) auf. Wurden solche Flüsse gemessen, so handelte es sich stets um sehr geringe Werte nahe oder unterhalb der Nachweisgrenze. Da vereinzelt in der Literatur von negativen Lachgasflüssen berichtet wird (vgl. GRANLI & BØCKMANN 1994) und diese zumindest theoretisch möglich wären (vollständige N₂O-Reduktion in anaeroben Tiefen bei diffusiver "Nachlieferung" des N₂O als Elektronenakzeptor von der Bodenoberfläche), wurde bei der Auswertung wie folgt vorgegangen: Lag der N₂O-Anstieg oder -Abfall in den Kammern unterhalb der tagesaktuellen analytischen Nachweisgrenze des GC (2 x die Standardabweichung von 6 Analysen des Atmosphärenstandards) oder lag das R² des Anstiegs/Abfalls unter 0,8, so wurde als Anstieg bzw. Abfall der Konzentration in der Kammer die Hälfte des Nachweisgrenzwerts zur Berechnung des Flusses verwendet. Dabei wurde dem Fluß jeweils das Vorzeichen gegeben, welches der vorherrschenden Richtung (Zu- oder Abnahme) der Konzentration in der Kammer entsprach. Negative N₂O-Flüsse weit oberhalb der Nachweisgrenze traten in den vier Jahren der Messungen niemals auf; auch in der Vorversuchsperiode konnten sie nicht beobachtet werden.

Tabelle 3.6-A: Extremwerte (Maxima) der gemittelten N₂O-Flüsse der einzelnen CO₂-Ringe sowie der einzelnen Kammern (jeweils A bis C) während des Untersuchungszeitraums 1997 bis 2000 (in µg N₂O-N m⁻² h⁻¹). Unter jedem Wert: Zeitpunkt des Maximums (vgl. Abb. 3.6-A). Da minimale Raten stets um die Nachweisgrenze lagen (d.h. nahe Null, siehe Text), werden sie hier nicht aufgeführt.

Ring/Kammer	E1	A1	E2	A2	E3	A3	E Mw	A Mw
Maximum Mw	1113,5	278,8	609,7	1168,8	422,1	531,1	665,3	449,1
Datum	23.04.98	07.05.99	09.10.98	23.04.98	23.04.98	28.04.98	23.04.98	23.04.98
Maximum A	1306,9	348,0	373,5	410,4	305,6	285,2	--	--
Datum	17.10.00	28.04.98	30.08.99	05.05.00	05.05.00	06.08.99	--	--
Maximum B	2129,5	610,1	1815,0	1421,4	575,2	310,6	--	--
Datum	23.04.98	07.05.99	09.10.98	23.04.98	05.05.00	30.04.99	--	--
Maximum C	973,5	234,7	145,5	1912,5	1090,1	1145,1	--	--
Datum	23.04.98	12.05.97	26.04.99	23.04.98	23.04.98	28.04.98	--	--

Die höchste je unter einer Haube gemessene N₂O-Flußrate betrug 2130 µg N m⁻² h⁻¹ und wurde am 23.04.1998 direkt nach der Düngung am 21./22. April auf E1-B gemessen (Tab. 3.6-A). Die zweithöchste Rate wurde am gleichen Tag mit 1913 µg N m⁻² h⁻¹ auf A2-C gemessen. Von 18 Maximalwerten (18 Kammern insgesamt) lagen 14 jeweils in den vierzehn Tagen unmittelbar nach der Frühjahrsdüngung Ende April (Tab. 3.6-A). Da im Jahr 2000 aufgrund von GC-Problemen gerade die Messungen direkt vor und nach der Düngung fehlen (Datenlücke: 18.04. bis 01.05.2000) und in diesem Jahr der

Boden schon sehr warm und die Vegetationsperiode untypisch weit fortgeschritten war, könnten insgesamt noch mehr Maxima in der "Düngeperiode" gelegen haben. Die restlichen vier Maxima lagen in der Spätsommer-Herbst-Periode (2x August, 2x Oktober) und wurden in zwei Fällen nach kräftigen Niederschlägen am vorherigen Tag erzielt.

Vergleicht man die Maxima der pro CO₂-Ring gemittelten N₂O-Flüsse, so ergibt sich keine direkte Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (nicht dargestellt). So erreichte der Ring A2 die höchste (gemittelten) Emissionsrate mit 1170 µg N m⁻² h⁻¹, dicht gefolgt von einem der trockensten Ringe, E1, mit 1114 µg N m⁻² h⁻¹. Bei den gemittelten Raten der Ringe E1 bis A3 wurden fünf von sechs Maxima in den 14 Tagen nach einer Düngung gemessen, über alle E- und A-Kammern gemittelt wurden beide Maxima am 23.04.1998 erreicht.

3.6.2 Verlauf der N₂O-Emissionen der Kontrollflächen im Jahresgang

Generell wiesen die Jahresgänge der Kontrollflächen-N₂O-Flüsse (A1 bis A3) die gleiche Charakteristiken auf wie sie auch schon in der Vorversuchsserie beschrieben wurden (bei geringerer Düngung, wie hier bei den CO₂-Ringen, 40 kg N ha⁻¹ a⁻¹): Die höchsten Raten wurden stets nach der Düngung im April gemessen. Dabei traten 1998 in allen drei Ringen höhere Spitzenwerte auf als 1999 (Abbildungen 3.6-B, c bis h). Da im Jahre 2000 die Werte direkt nach der Düngung fehlen (GC-Ausfall), können keine Aussagen über die Höhe des Düngepeaks in diesem Jahr gemacht werden. Die hohen Raten gingen nach der Düngung rasch bis Ende Mai / Anfang Juni auf ein sehr viel niedrigeres Niveau zurück. Während der warmen folgenden Sommermonate stiegen sie wieder an (1998: mittlere K-Rate zwischen 10 und 25 µg N m⁻² h⁻¹; 1999: zwischen 10 und 50 µg N m⁻² h⁻¹; 2000: um 10 µg N m⁻² h⁻¹). Hierbei zeigten die trockeneren Kontrollringe A1 und A3 die am stärksten ausgeprägte Saisonalität, d.h. deutlich höhere Raten im Sommer mit starkem Rückgang im Oktober (Abb. 3.6-B, c bis h). Dieser Verlauf war im feuchtesten Kontrollring A2 weniger ausgeprägt (vgl. auch Abb. 3.6-C, a bis d).

Während des laufenden CO₂-Experiments (1997 bis 2000) trat bisher keine Frostperiode wie im Winter 1996/1997 auf; daher konnten bisher auch keine hohen winterlichen N₂O-Flüsse wie im Vorversuch gemessen werden. Eine Ausnahme stellen einige Tage im Januar 1999 im K1-Ring dar: Hier traten bei oberflächlichem Bodenfrost (wenige mm Eindring-Tiefe) einige erhöhte Emissionsraten auf (Abb. 3.6-B, d). Dies Ereignis ist aber in keiner Weise mit der ausgeprägten Frost-Tau-Periode 1996/1997 vergleichbar; somit ist die Beantwortung der anfangs aufgestellten Hypothese bezüglich der winterlichen N₂O-Flüsse unter erhöhtem CO₂ (noch) nicht möglich.

Zur Abhängigkeit der N₂O-Flüsse der Kontrollringe von Bodenfeuchte und Bodentemperatur siehe Abschnitt 3.6.4.

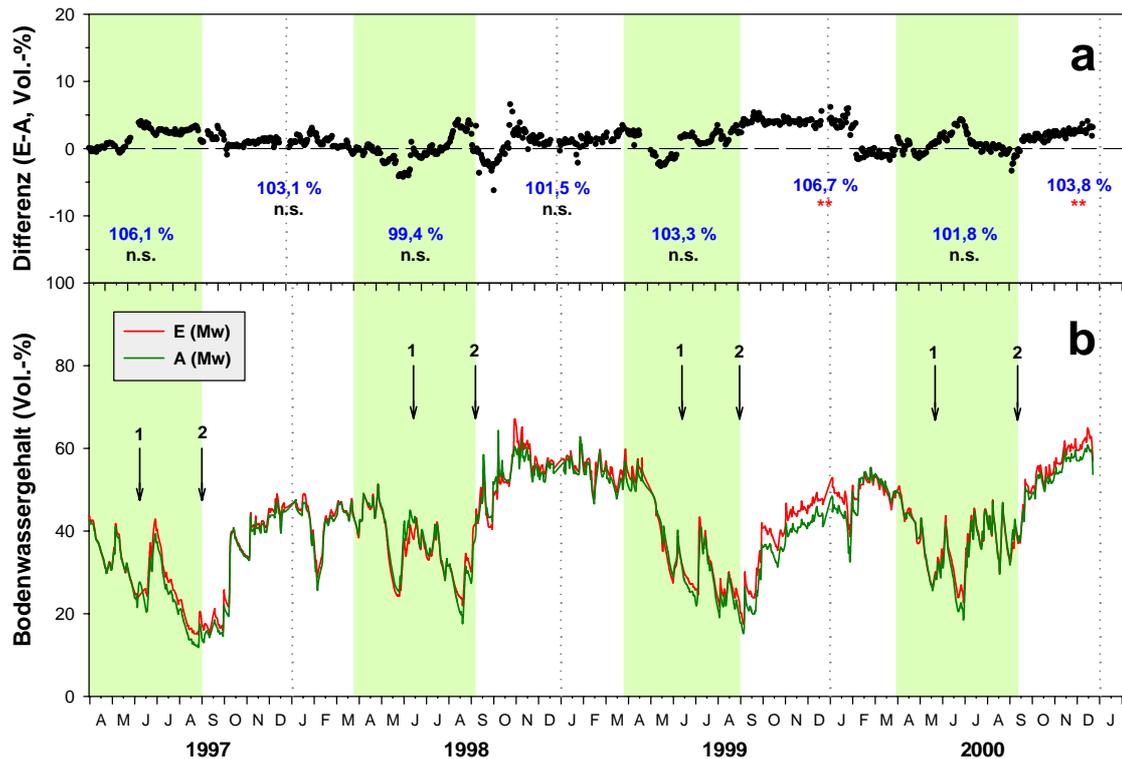


Abbildung 3.6-A: Mittlere Bodenfeuchte der E- und A-Ringe im Untersuchungszeitraum; ohne Standardabweichung dargestellt; ansonsten alles wie Graphik 3.1-B dargestellt.

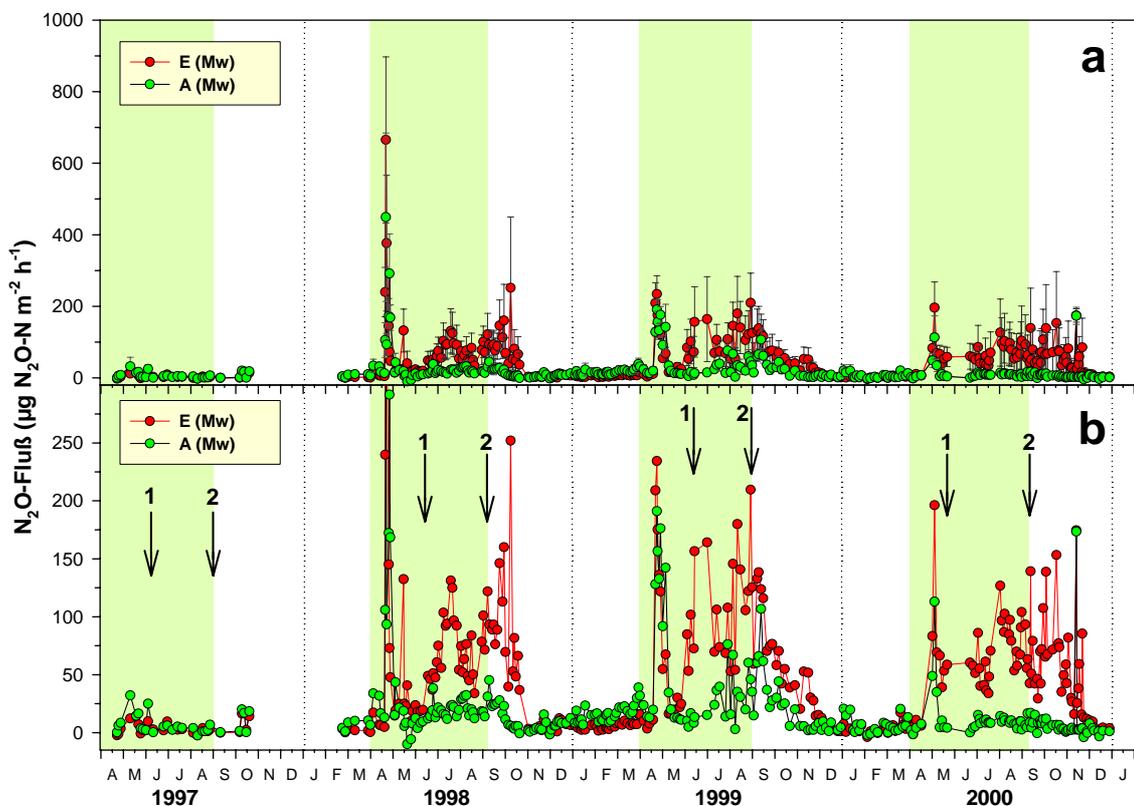


Abbildung 3.6-B: Mittlere N_2O -Flüsse der E- und A-Ringe im Untersuchungszeitraum ($n = 9$ pro Datenpunkt); **a)** mit Standardfehler und Maximalwerten, **b)** gleicher Datensatz ohne Standardfehler und mit vergrößernder Ordinatenskalierung zur übersichtlicheren Darstellung. Grün hinterlegt: "Vegetationsperiode" des Haupt-Biomasse-Wachstums von April bis zur zweiten Ernte. Pfeile: Zeitpunkte der ersten und zweiten Ernte (Zahlen).

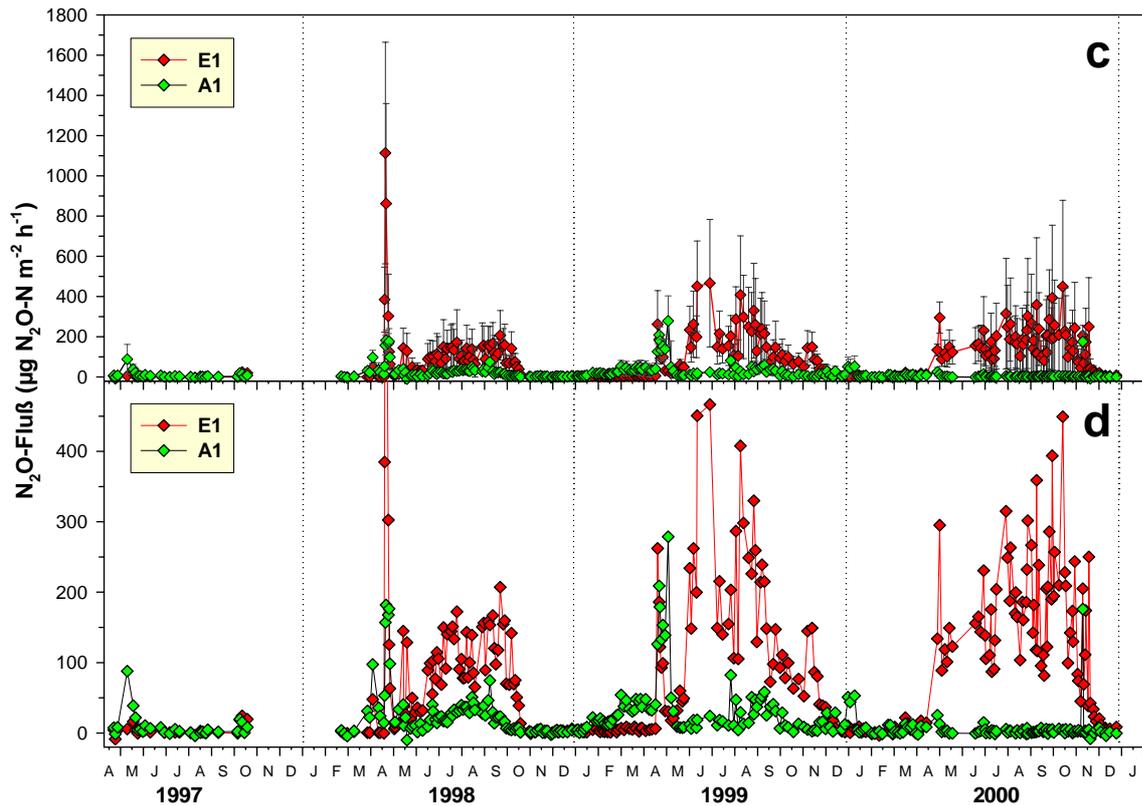


Abbildung 3.6-B: Verlauf der gemittelten N_2O -Flüsse im E1- und A1-Ring (je $n = 3$ pro Datenpunkt) im Untersuchungszeitraum; c) mit Standardfehler und Maximalwerten, d) gleicher Datensatz ohne Standardfehler und mit vergrößernder Ordinatenkalierung zur übersichtlicheren Darstellung.

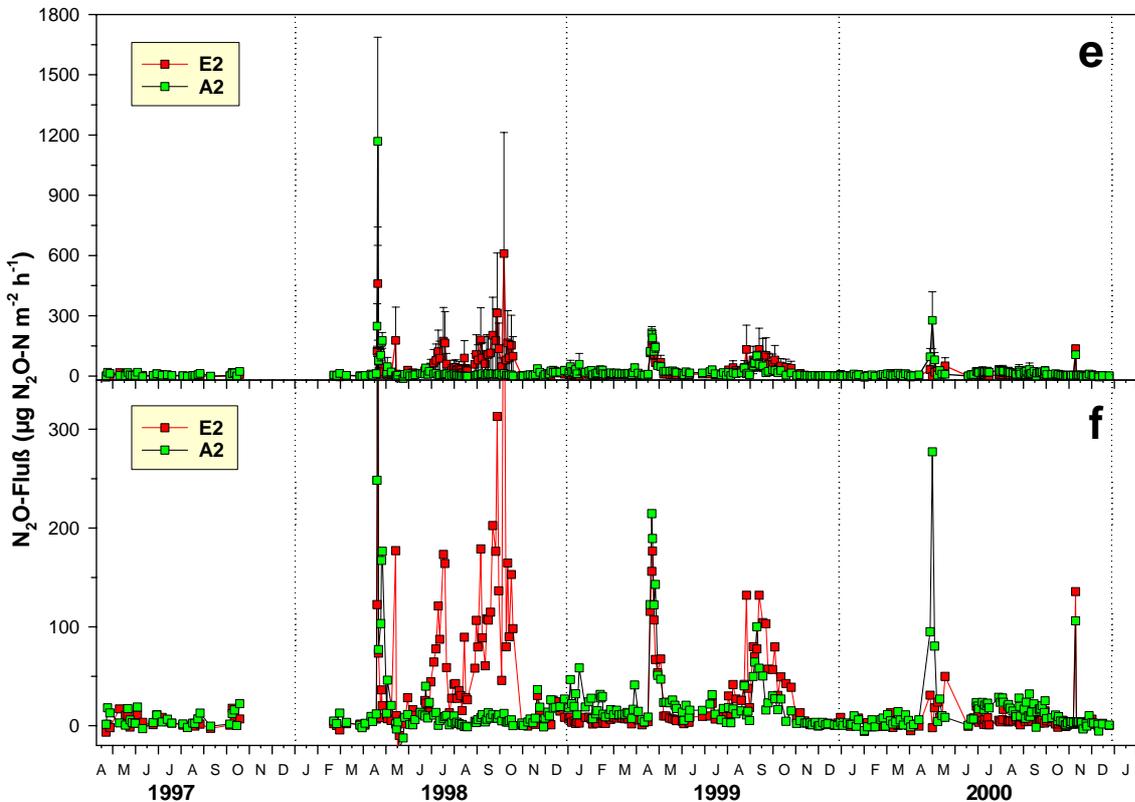


Abbildung 3.6-B: Verlauf der gemittelten N_2O -Flüsse im E2- und A2-Ring (je $n = 3$) im Untersuchungszeitraum; e) mit Standardfehler und Maximalwerten, f) gleicher Datensatz ohne Standardfehler und mit vergrößernder Ordinatenkalierung zur übersichtlicheren Darstellung.

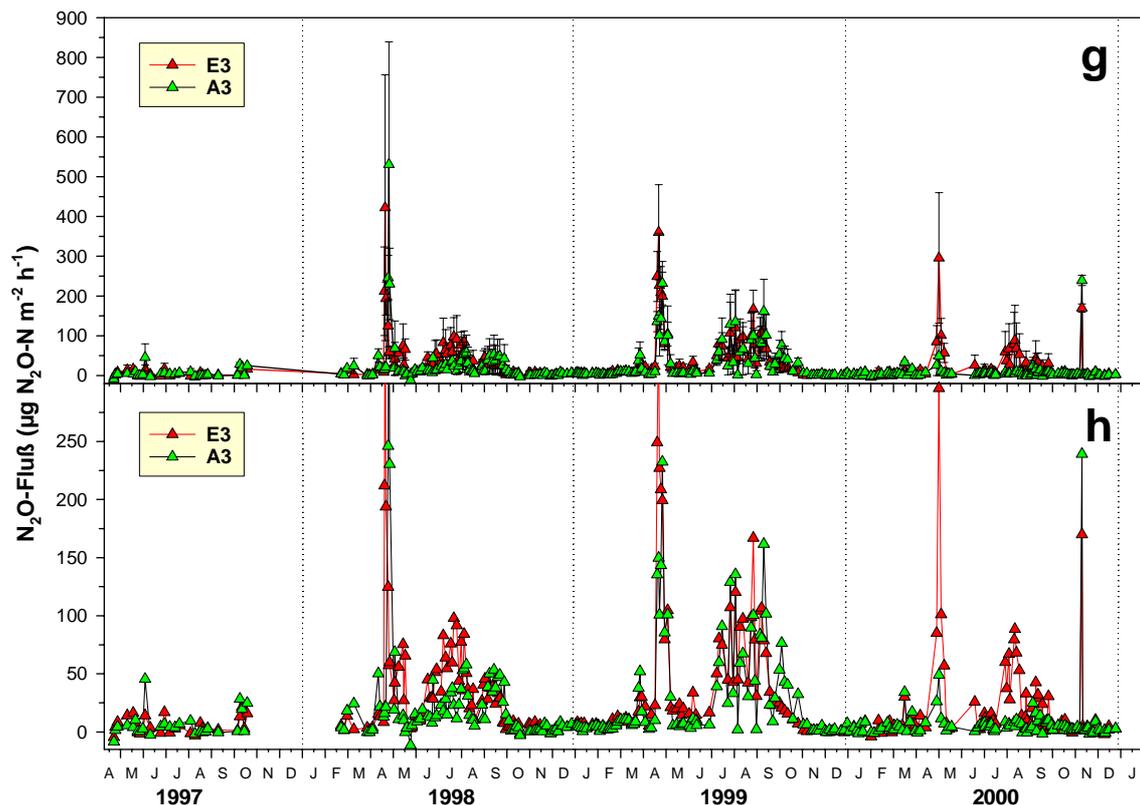


Abbildung 3.6-B: Verlauf der gemittelten N_2O -Flüsse im E3- und A3-Ring (je $n = 3$) im Untersuchungszeitraum; **g**) mit Standardfehler und Maximalwerten, **h**) ohne Standardfehler (siehe a bis f).

3.6.3 N_2O -Flüsse unter erhöhtem CO_2

Wie bereits Abb. 3.6-B (a, b) verdeutlicht, unterschieden sich die N_2O -Flüsse im Jahr vor Beginn der CO_2 -Anreicherung kaum voneinander (siehe auch Abb. 3.6-C, 3.6-D und Tab. 3.6-B). So betragen die mittleren N_2O -Emissionen der E-Flächen in der Phase vor Beginn der CO_2 -Anreicherung (Beginn: Mai 1998) 106 % der Emissionen der A-Flächen, und in keinem der Ringpaare (oder im Mittel) bestand ein signifikanter Unterschied (Tab. 3.6-B).

Nach Beginn der CO_2 -Anreicherung hingegen emittierten die Ringe unter erhöhtem CO_2 während der (ausklingenden) Vegetationsperiode (Juni bis Oktober-November) wesentlich größere Mengen an N_2O als die Kontrollflächen (Abb. 3.6-B, a, b und Abb. 3.6-C, a). Den größten Anteil hieran hatte der trockenste der E-Ringe, E1 (Abb. 3.6-B, c, d; Abb. 3.6-C, b). Während im Jahr 1997 unter keiner der drei verwendeten Maxikammern ein derartiges Emissionsverhalten gemessen werden konnte, verwandelte sich in jedem der bisher drei Jahre der CO_2 -Anreicherung eine der drei E1-Maxikammern in einen "hot spot" der N_2O -Emissionen. Eine zweite Kammer emittierte häufig genauso viel oder mehr N_2O wie die höchste aller 9 verwendeten A-Maxikammern, und die dritte E1-Kammer lag in ihrer Emissionshöhe auf A1-Niveau. Interessanterweise verwandelte sich jedes Jahr (1998 bis 2000) eine andere der E1-Kammern in den hot spot: 1998 war es Kammer C, 1999 Kammer B und im Jahr 2000 Kammer A. Diese " N_2O -Quelle" emittierte dann sehr kontinuierlich während des

Sommers N₂O, an jedem Tag, an dem gemessen wurde (hohe zeitliche Kontinuität = geringe *temporal variability*).

Betrachtet man die Ringpaare getrennt, so zeigen sich folgende Tendenzen: Der gewaltige Unterschied zwischen E1 und A1 während des Sommers/Herbsts (Juni bis Oktober/November) scheint konstant bestehen zu bleiben (Abb.3.6-D). Dabei waren die A1-Emissionen im Sommer 2000 geringer als in den Vorjahren, was die prozentuale Differenz E1 – A1 im Jahr 2000 besonders hoch treibt (Tab. 3.6-B: 1908 %). Weiterhin scheint sich die Dauer der hohen N₂O-Emissionen auf E1 vom Herbst bis in den Winter hinein auszudehnen (Abb. 3.6-D).

Im ersten Jahr der CO₂-Anreicherung zeigte Ring E2 ein dem E1 sehr ähnliches Emissionsverhalten; auch hier gingen die hohen Werte hauptsächlich auf eine *hot spot*-Maxikammer zurück. Schon im zweiten Jahr, 1999, waren die N₂O-Emissionen im Kontrollring A2 geringfügig, aber signifikant höher als die des E2 (Tab. 3.6-B); prozentual war die Emission beider Ringe fast identisch. Im Jahr 2000 schließlich waren die N₂O-Flüsse des E2 im Verhältnis zum A2 wieder auf einem ähnlich niedrigen Level wie vor Beginn der CO₂-Anreicherung (Tab. 3.6-B); prozentual waren sie sogar niedriger als 1997 (Abb. 3.6-D).

Bei Ringpaar 3 war das Emissionsverhalten von E und A zueinander ähnlich wie bei Ringpaar 1, nur war der Unterschied zwischen den CO₂-Behandlungen bei weitem nicht so groß wie bei Ringpaar 1 (Abb. 3.6-D). Aber auch hier waren die E3-N₂O-Flüsse vor Beginn der CO₂-Anreicherung eher niedriger als die A3-Flüsse, während sie seit Bestehen der CO₂-Anreicherung stets höher waren, davon 1998, 2000 sowie über die gesamte Anreicherungsperiode betrachtet (hoch-)signifikant höher.

Tabelle 3.6-B: Unterschiede in den N₂O-Flußraten (µg N m⁻² h⁻¹) zwischen den einzelnen Ringpaaren sowie zwischen dem E- und A-Mittel während verschiedener Untersuchungszeiträume. Pre-CO₂: April 1997 bis einschl. April 1998. Post-CO₂: Mai 1998 bis Dezember 2000. Fehlende Daten 1997: Aufnahme der Messungen Mitte April 1997; Datenlücke November 1997 bis Februar 1998: GC-Probeme (vgl. 2.1). Statistischer Test für die Zeitreihen: Man-Whitney-Test (Daten nicht normalverteilt). Man beachte bei Ringpaar 2: 1999 und 2000 A > E (signifikant). n = Anzahl der Messungen, Mw = Mittelwert.

Mittelwert fett, *Median kursiv*, E-Mittel in % des A-Mittels blau, p-Wert des U-Tests: rot=Signifikanz

Zeit	n	E1		A1		E2		A2		E3		A3		E Mw		A Mw	
1997	28	4,2	2,6	9,3	4,7	4,1	2,6	6,6	3,1	5,4	3,0	6,2	3,3	4,6	2,6	7,3	4,0
Pre-CO ₂	44	68,7	2,3	30,0	7,1	19,4	3,0	48,4	4,5	29,3	4,8	31,2	4,2	39,1	3,0	36,9	6,7
1998	91	92,6	68,8	26,1	16,2	59,1	25,6	29,0	7,4	35,4	18,2	27,5	12,5	62,5	47,5	27,5	14,1
1999	95	90,0	40,7	33,5	18,5	25,6	8,4	26,1	15,7	38,8	14,5	31,6	7,3	51,5	21,9	30,3	16,8
2000	106	115,9	110,7	6,1	2,5	6,2	3,7	14,5	7,5	17,4	5,0	7,6	3,8	46,0	42,4	9,5	6,0
Post-CO ₂	276	95,5	78,2	18,6	7,5	28,1	7,1	16,9	10,0	27,6	9,1	18,5	6,2	50,2	41,0	18,0	10,4

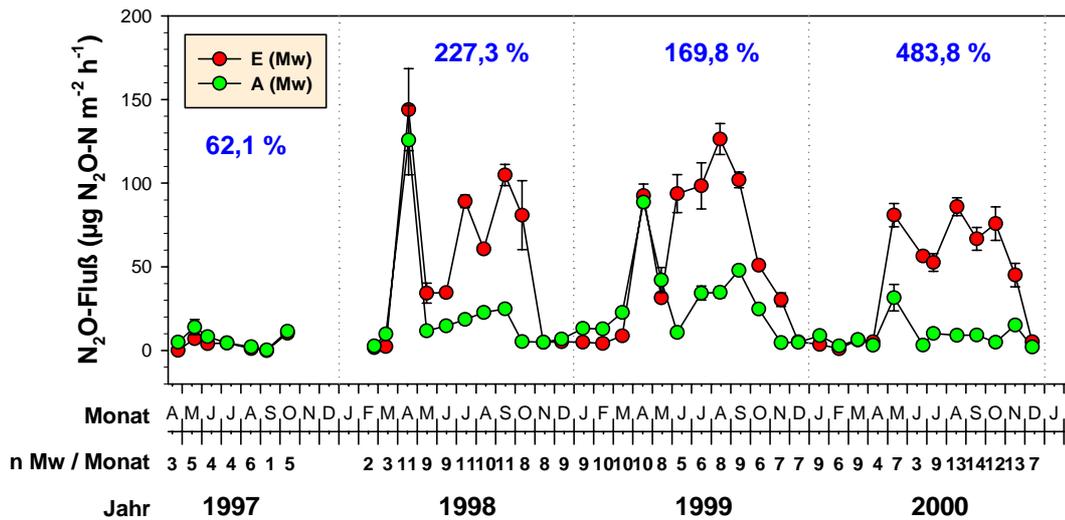


Abbildung 3.6-C: Monatsmittel der N₂O-Flüsse der E- und A-Flächen. Standardabweichung: Zeitliche Variabilität der E- und A-Mittelwerte (=Abb. 3.6-B, a, b) im betreffenden Monat. n: Anzahl Messungen.

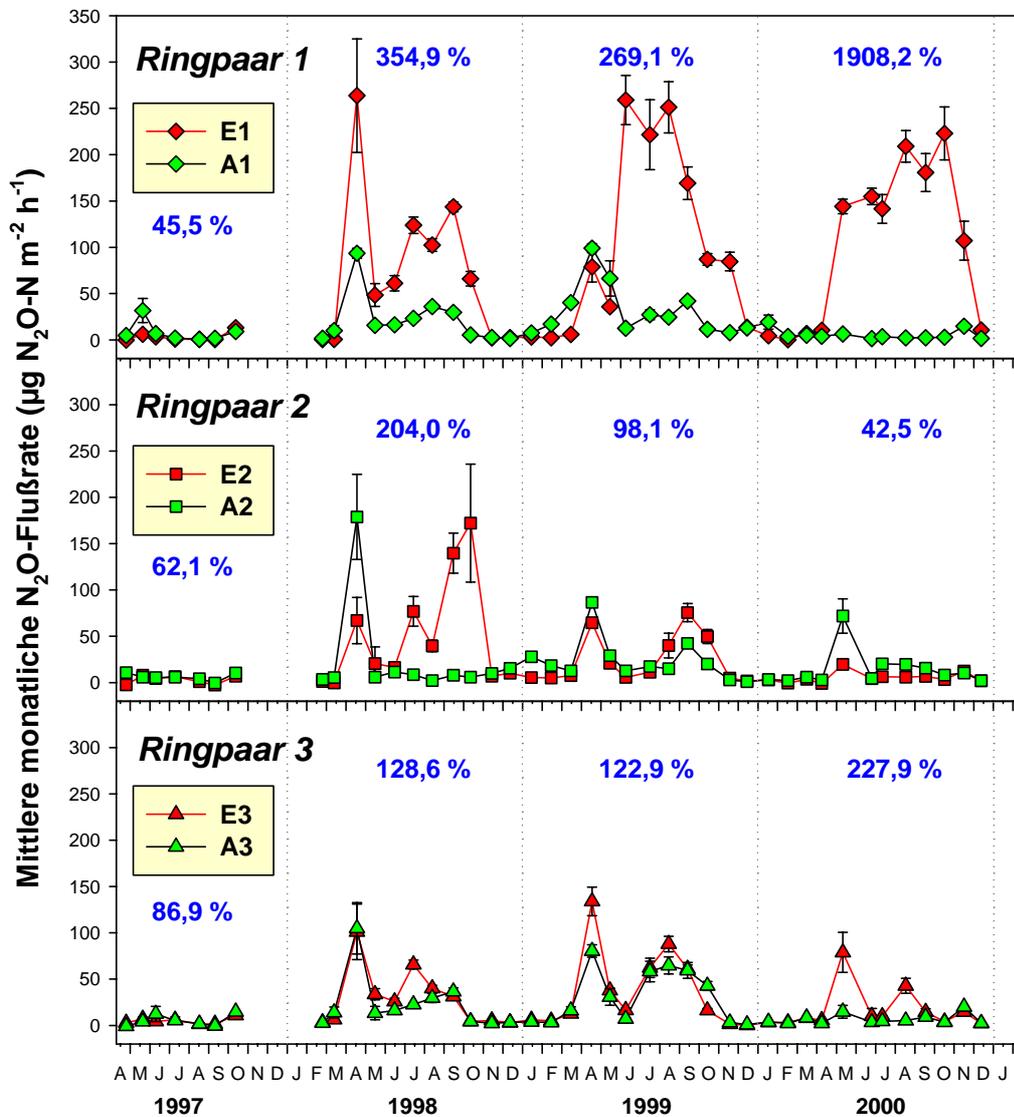


Abbildung 3.6-D: Monatsmittel der N₂O-Flüsse der einzelnen E- und A-Ringe. Standardabweichung: Zeitliche Variabilität der E- und A-Ring-Mittelwerte (=Abb. 3.6-B, c-h) im betreffenden Monat.

Es könnte der Einwand erhoben werden, das Jahr 1997 sei so trocken gewesen, daß die Unterschiede zwischen den Ringpaaren dadurch nivelliert worden seien. Aus dem Verlauf der Bodenfeuchte-Kurven (Abb. 3.6-A, **b**) wird jedoch ersichtlich, daß im Juni bzw. Juli nach der ersten Ernte durchaus noch eine den Jahren 1998 bis 2000 vergleichbare Bodenfeuchte bestand. Hätte z.B. die Fläche E1 schon vor der CO₂-Anreicherung ihr "derzeitiges" Emissionsmuster gezeigt, so hätten zumindest in diesen Monaten einige hohe E1-Raten gemessen werden müssen. Auf dem kleinen Plot 2.5 (ebenfalls mit 40 kg N ha⁻¹ a⁻¹ gedüngt), der dem Ring E1 unmittelbar benachbart ist, wurde zudem während der Sommer 1996 und 1997 (Vorversuchs-Meßreihe) zu keinem Zeitpunkt derartig hohe, zeitkonstante N₂O-Emissionen beobachtet und auch keine Einzel-Emissionsereignisse. Dieses Verhalten ist erst seit Beginn der CO₂-Anreicherung zu beobachten.

Über die gesamte Untersuchungsperiode betrachtet, bestand vor Beginn der CO₂-Anreicherung weder im Mittel noch zwischen den einzelnen Ringpaaren (E und A) ein signifikanter Unterschied. Danach hingegen waren die Emissionen der E-Ringe fast immer (signifikant) höher als die der zugehörigen A-Ringe (Ausnahme Ringpaar 2, 1999 und 2000; Tab. 3.6-B).

Die mittleren E- und A-N₂O-Flüsse wurden nach folgenden Perioden gegliedert:

- Periode "Nach der Düngung": Ab dem jeweiligen Düngedatum bis Ende Juni (Abklingen des Düngeeffekts, vgl. Vorversuche)
- Sommer/Herbst-Periode: Dünger-unbeeinflusste N₂O-Flüsse der Vegetationsperiode
- Winter-/Frühjahrs-Periode: Phase der i.d.R. sehr geringen N₂O-Emissionen

Diese wurden in Abb. 3.6-E einander gegenüber gestellt. Auch hier zeigt sich die zuvor beschriebene Tendenz: Vor Beginn der CO₂-Anreicherung waren die A-N₂O-Emissionen tendenziell etwas höher als die E-Flüsse. In allen drei Vegetationsperioden seit Beginn der CO₂-Anreicherung hingegen waren die E-N₂O-Flüsse höchstsignifikant größer als die A-Flüsse. Die (vollständigen) Düngeperioden 1998 und 1999 waren nicht signifikant voneinander verschieden. Da die Düngeperiode 2000 unvollständig war (fehlende Daten direkt nach der Düngung), kann diesbezüglich keine Aussage getroffen werden. Während in der ersten Winterperiode die A-N₂O-Flüsse höchstsignifikant größer waren als die E-Flüsse, waren sie in der folgenden Winterperiode 1999 nicht mehr signifikant voneinander verschieden. In der noch unvollständigen Winterperiode 2000/2001 sind bislang die E-N₂O-Emissionen höchstsignifikant größer; die Ursache hierfür liegt vor allem in den bis in den Dezember hinein ausgedehnten N₂O-Emissionen der *hot spots* auf E1 (vgl. 3.6-C, -D). Es bleibt abzuwarten, ob sich das Muster des Jahres 1998/1999 wiederholt, in dem die A-Flüsse mit Abschluß der Vegetationsruhe im Frühjahr doppelt so hoch waren wie die E-Flüsse (Abb. 3.6-B, b), oder ob sich der angedeutete Trend (Betrachtung der Winterperioden in Folge) zu ebenfalls höheren winterlichen N₂O-Emissionen unter erhöhtem CO₂ fortsetzen wird.

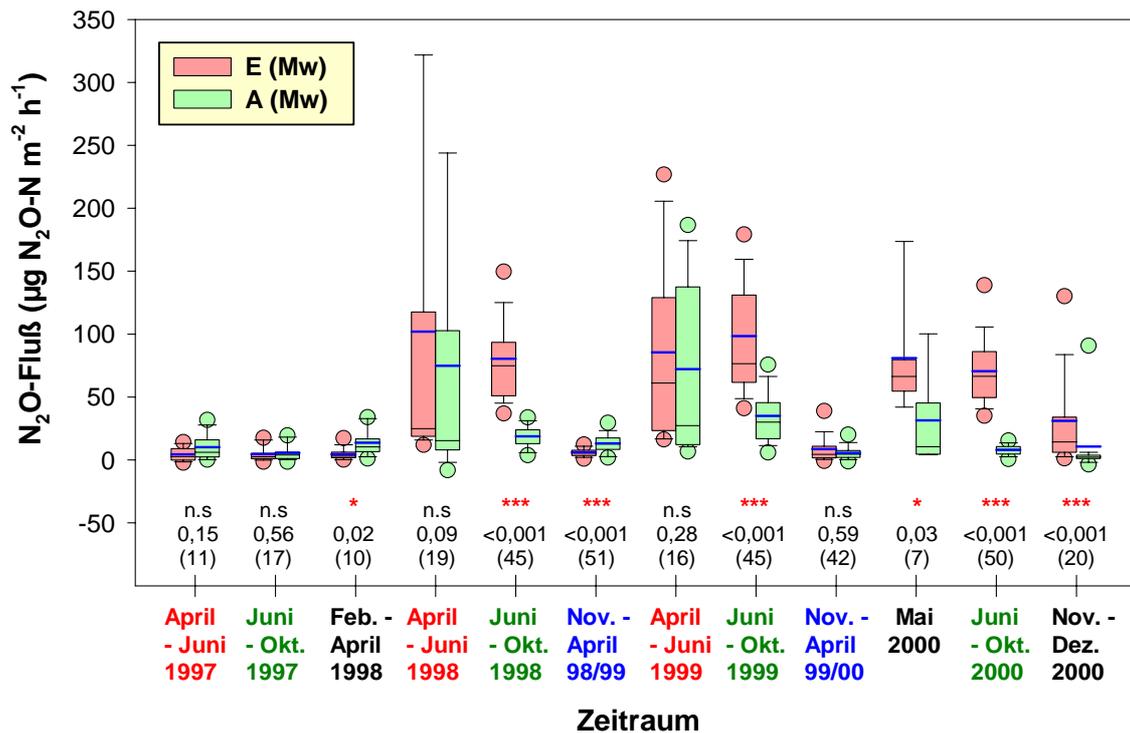


Abbildung 3.6-E: Boxplots der drei Jahres-Emissionsperioden (siehe Text). Kreissymbole: 5- und 95 %-Perzentile; fehlen in den Düngeperioden 1998 und 2000 zwecks übersichtlicherer Ordinatenkalierung. Beschriftungen: Düngeperiode rot, Vegetationsperiode grün, Winterruhe-Periode blau. Fehlende Daten: Unvollständige Periode schwarz beschriftet. Statistische Tests: T-Test oder U-Test (bei nicht-normalverteilten Daten). Unter den Boxen: Signifikanzniveau, P-Wert und n-Zahl der Meßzeitpunkte.

3.6.4 Abhängigkeit der N_2O -Flüsse von Bodenfeuchte und Bodentemperatur

Grundsätzlich bestand eine gewisse negative Korrelation der N_2O -Flußraten mit der Bodenfeuchte; diese war jedoch bei keinem der nachfolgend vorgestellten Datensätze des gesamten Untersuchungszeitraums für die Bodenfeuchte höher als $|r| = -0,361$ (Ring E3; stets Spearman Rang-Korrelationstest, da die N_2O -Flußraten nicht-normalverteilt waren). Nach ZÖFEL (1992) ist die Korrelation mit der Bodenfeuchte (über das ganze Jahr betrachtet) somit als "geringe Korrelation" zu bezeichnen (Abb. 3.6-F, **a, c, e, g**). Im Falle des A2 handelt es sich sogar nur um eine "sehr geringe Korrelation" ($r < 0,2$; Abb. 3.6-F, **e**). Die geringen Korrelationen (alle außer A2) waren stets negativ, d.h. über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet stiegen die N_2O -Emissionen bei sinkender Bodenfeuchte.

Bei der Korrelation der N_2O -Flüsse mit der Bodentemperatur ist auffällig, daß die Korrelation eines E-Rings stets deutlich besser war als die seines A-Ring-Partners (Abb. 3.6-F, **b, d, f, h**). So wies der E1-Ring eine hohe Korrelation mit der Bodentemperatur auf (ebenso der E-Mittelwert), der E3 eine mittlere Korrelation und der E2 eine geringe Korrelation. Die A- N_2O -Flußraten hingegen zeigten stets eine geringe oder sehr geringe Korrelation mit der Bodentemperatur.

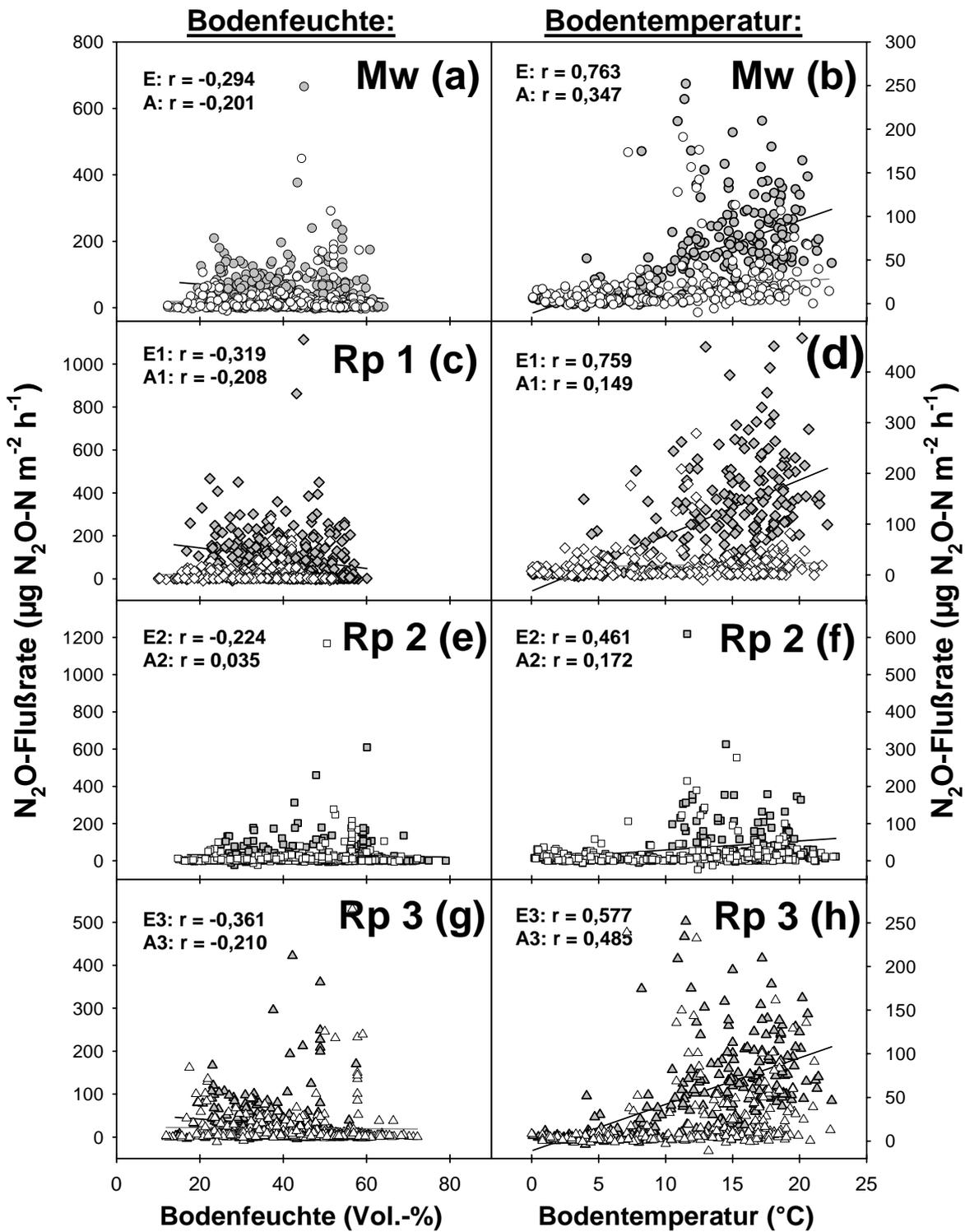


Abbildung 3.6-F: Korrelationen der N_2O -Flußraten der E- und A-Mittelwerte sowie der einzelnen Ringpaare (=Rp) mit der Bodenfeuchte (linke Spalte) und der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (rechte Spalte).

Graue Symbole: erhöhtes CO_2 , weiße Symbole: aktuelles CO_2 . r-Wert: Spearman-Korrelationskoeffizient des Datensatzes (siehe Text).

Bodentemperatur-Messungen: ab 5. Mai 1998; daher fehlen die hohen Flußraten aus der jeweils linken Abbildung (die der Düngung im April 1998).

Da die Winter-N₂O-Flußraten stets sehr gering waren, war für diesen Zeitraum praktisch keine Korrelation vorhanden; die Flußraten direkt nach einer Düngung gehorchten einem dritten Einflußfaktor (erhöhte N-Verfügbarkeit). Diese Zeiträume wurden daher aus dem Gesamtdatensatz ausgeschlossen; für die verbleibenden Vegetationsperioden wurde anschließend die Korrelation der mittleren E- und A-N₂O-Flußrate mit der Bodenfeuchte bzw. Bodentemperatur geprüft (Abb. 3.6-G).

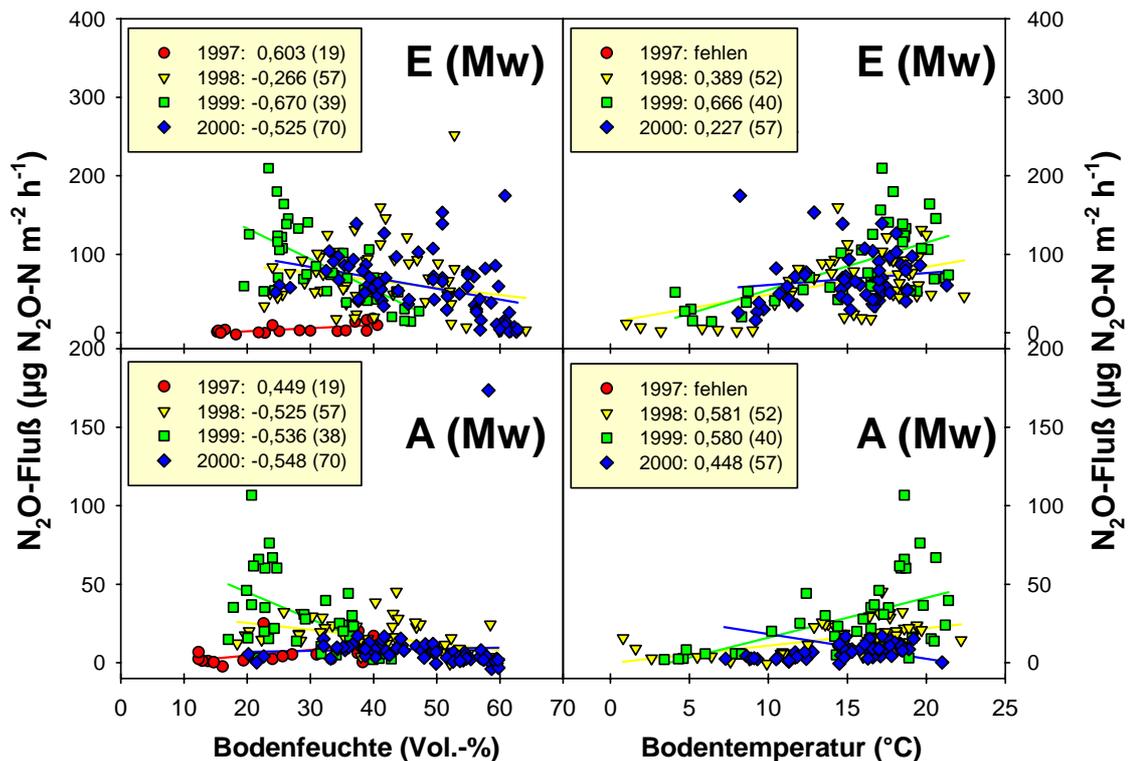


Abbildung 3.6-G: Korrelation der N₂O-Flüsse der vier Zeiträume Juni bis November mit der Bodenfeuchte (linke Spalte) und der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (rechte Spalte). Temperaturdaten des Jahres 1997 fehlen (siehe Text.). Legende: r-Wert des abgebildeten Datensatzes (Spearman-Rang-Korrelationskoeffizient), dahinter in Klammern: n-Zahl der Meßwert-Paare.

Im sehr trockenen Sommer 1997 bestand eine positive Korrelation mit der Bodenfeuchte (E- und A-Daten), in allen folgenden Jahren war sie negativ, d.h. eine höhere Bodenfeuchte verminderte die N₂O-Emissionen (Abb. 3.6-F). Die Korrelation der A-N₂O-Emissionen mit der Bodentemperatur verbesserte sich durch die Betrachtung der Sommerperioden (gegenüber dem gesamten Datensatz) deutlich, die der E-Raten nicht. In den Sommerzeiträumen lagen trotz der verschiedenen Emissionsniveaus (E versus A) alle Korrelationen im Bereich "geringe bis mittlere Korrelation". Die Beeinflussbarkeit der N₂O-Emissionen durch die Faktoren Feuchte und Temperatur läßt somit keinen Unterschied bezüglich der CO₂-Behandlung erkennen. Würde z.B. der Anteil des Prozesses Denitrifikation drastisch zunehmen unter erhöhtem CO₂, könnte die Korrelation mit der Bodenfeuchte ein positives Vorzeichen annehmen. Die dargestellten Resultate lassen diesbezüglich keine große Veränderung erkennen.

3.6.5 Jahresbilanzen der N₂O-Emissionen unter erhöhtem CO₂

Bei einer Integration der N₂O-Flüsse auf Tagesbasis (Extrapolation fehlender Tageswerte zwischen zwei Meßtagen) ergibt sich eine seit Beginn der CO₂-Anreicherung emittierte Menge von 11,33 kg N₂O-N ha⁻¹ für die E-Flächen und 3,91 kg N ha⁻¹ für die Kontrollflächen (E = 290 % von A = 100 %). Während bei den A-Flächen im Schnitt etwa 40 % der Jahresemissionen auf die Vegetationsperiode entfielen, ging diese unter erhöhtem CO₂ zu 70 % in die Jahresbilanz ein (Mittel 1998 bis 2000; Abb. 3.6-H).

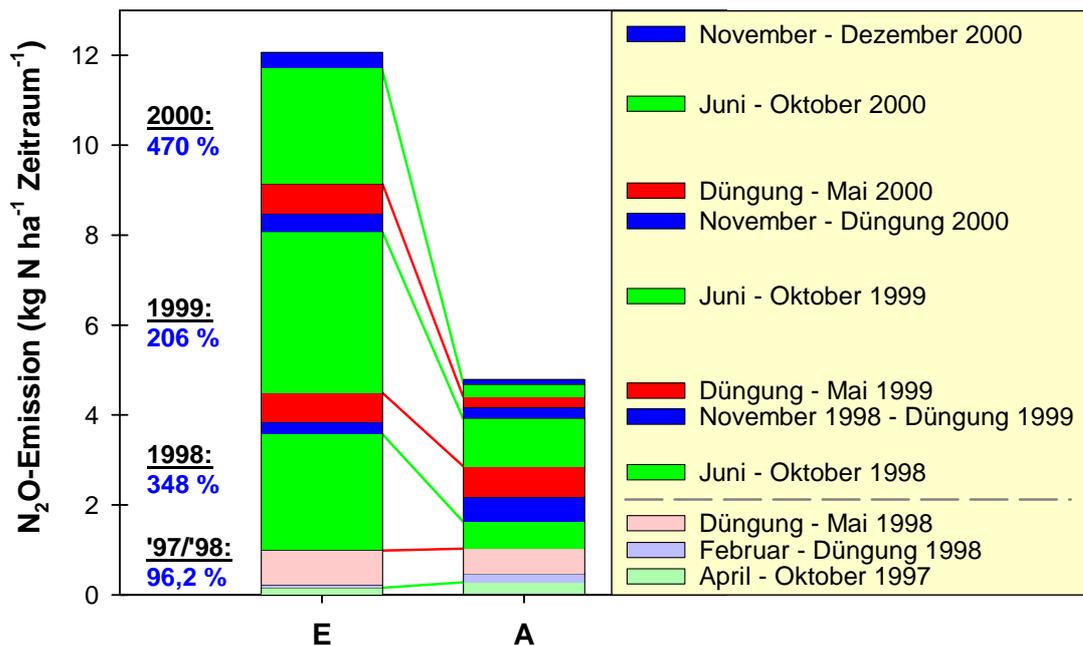


Abbildung 3.6-H: Summen der als N₂O emittierten Stickstoffmengen im Verlaufe der fast vierjährigen Meßperiode. Legende rechts: Abfolge der in den Säulen dargestellten Zeitperioden. Oberhalb der grauen, gestrichelten Linie: Zeitperioden (komplett) nach Beginn der CO₂-Anreicherung (Mai 1998). Zahlen linke Seite: E-Summe in Prozent der A-Summe. (1997/1998 steht für die Periode vor Beginn der CO₂-Anreicherung, 1998 bezeichnet den "Rest" dieses Jahres nach Beginn der CO₂-Anreicherung.)

Die jährlichen Emissionssummen der Kontrollflächen lagen in den Jahren 1998 bis 2000 zwischen 0,53 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (A1, 2000) und 2,54 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (A1, 1999) bei einem Mittelwert von 1,53 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ (3 A-Flächen x 3 Jahre). Dieser Wert liegt deutlich oberhalb der Emissionsmenge von 0,57 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹, die in der relativ trockenen Vorversuchsperiode 1996/1997 gemessen wurde (Mittelwert der beiden 40-kg-N-Parzellen). Nur im Jahr 2000 existierte eine starke positive Korrelation zwischen den Jahresemissionssummen der Ringe A1 bis A3 und den mittleren Bodenfeuchten (R² = 0,93), im sehr niederschlagsreichen Jahr 1998 war die Korrelation dagegen negativ (R² = 0,66; nicht abgebildet). Für die Ringe E1 bis E3 trat in keinem der Untersuchungsjahre eine Korrelation mit der Bodenfeuchte auf (R² 0,03 bis 0,37).

3.7 Methanflüsse in den FACE-Ringen

3.7.1 Allgemeiner Verlauf und Extremwerte der CH₄-Flußraten

Wie die folgenden Abbildungen zeigen, war Methanoxidation in allen Ringen während des gesamten Jahresgangs stets die dominierende CH₄-Flußrichtung. (Flüsse unter der Nachweisgrenze: Berechnung wie bei N₂O). Dabei wurden im Sommer in allen CO₂-Ringen Aufnahmeraten von mehr als 60 µg C m⁻² h⁻¹ erreicht (gemittelt über die drei Kammern; vgl. Tab. 3.7-B). Bisweilen konnten auch CH₄-Emissionen gemessen werden. Diese traten hauptsächlich in den Wintermonaten mit hoher Bodenfeuchte auf (Ausnahme: Kammer E1-A, Tab. 3.7-B). Bei Ringpaar 1 lagen die Emissionsraten stets um die Nachweisgrenze (Abb. 3.7-B, c), bis auf die erwähnte Ausnahme (Abb. 3.7-B, d, e): Im September 2000 begann Kammer A in Ring E1 mit hoher Rate Methan zu emittieren, wobei am 11.9.2000 von dieser Kammer eine Maximalrate von 869,4 µg C m⁻² h⁻¹ erreicht wurde (vgl. Tab. 3.7-A). Nach einigen Tagen sank die Emission wieder auf Null bzw. sie verwandelte sich wieder in Oxidation (Abb. 3.7-B, d). Anfang Oktober 2000 wies die gleiche Kammer E1-A erneut ein (kleineres) CH₄-Emissionsereignis auf (Abb. 3.7-B, e). Ringpaar 2 (Abb. 3.7-B, f) zeigte im Februar und März 2000 Methanemissions-Ereignisse (A2: 2x, E2: 1x), die gemittelt über 20 µg C m⁻² h⁻¹ lagen, d.h. weit oberhalb der Nachweisgrenze. Auf diesem feuchtesten Ringpaar zeigte jede der (jeweils) drei Kammern eines CO₂-Rings (E2, A2) CH₄-

Tabelle 3.7-B: Maximale und minimale CH₄-Flußraten, die im Untersuchungszeitraum gemessen wurden, und der Zeitpunkt ihres Auftretens (Flüsse in µg CH₄-C m⁻² h⁻¹).

Ring/Kammer	Maximum	Minimum	Max. am:	Min. am:	
E1	A (3)	869,4	-99,7	13.09.00	15.07.99
	B (2)	2,1	-85,1	18.01.00	15.07.99
	C (1)	2,1	-100,1	18.01.00	15.07.99
A1	A (3)	2,2	-136,1	18.01.00	22.06.98
	B (2)	2,1	-86,6	18.01.00	13.09.99
	C (1)	2,4	-60,1	26.12.99	13.09.99
E2	A (3)	32,4	-117,3	06.03.00	15.07.99
	B (2)	21,1	-134,5	06.03.00	15.07.99
	C (1)	24,8	-136,5	06.03.00	15.07.99
A2	A (3)	18,1	-130,1	06.03.00	03.08.98
	B (2)	8,0	-102,6	06.03.00	15.07.99
	C (1)	93,2	-123,6	18.02.00	15.07.99
E3	A (3)	36,9	-64,2	03.03.98	11.09.00
	B (2)	3,3	-75,2	14.02.00	18.08.97
	C (1)	2,7	-87,9	01.12.98	29.06.98
A3	A (3)	5,4	-98,4	29.04.98	11.09.00
	B (2)	27,8	-119,6	03.03.98	31.08.00
	C (1)	2,8	-104,3	15.04.99	11.09.00

Emissionen über der Nachweisgrenze (Tab. 3.7-A). Bei Ringpaar 3 konnte im April 1998 in E3 und A3 je einmal eine CH₄-Abgabe (Mittel: 10 µg C m⁻² h⁻¹) gemessen werden (Abb. 3.7-B), die auf die Emissionen je einer Kammer im betreffenden Ring zurückging (vgl. Tab. 3.7-A).

Das CH₄-Emissionsereignis in Ring E1 war groß genug, um den Mittelwert aller drei E-Ringe in den positiven Bereich zu ziehen (Abb. 3.7-B, a, b). Es beeinflusste entscheidend die Bilanz der E-Flächen des Sommers 2000 (Tab. 3.7-B; Abb. 3.7-C, a).

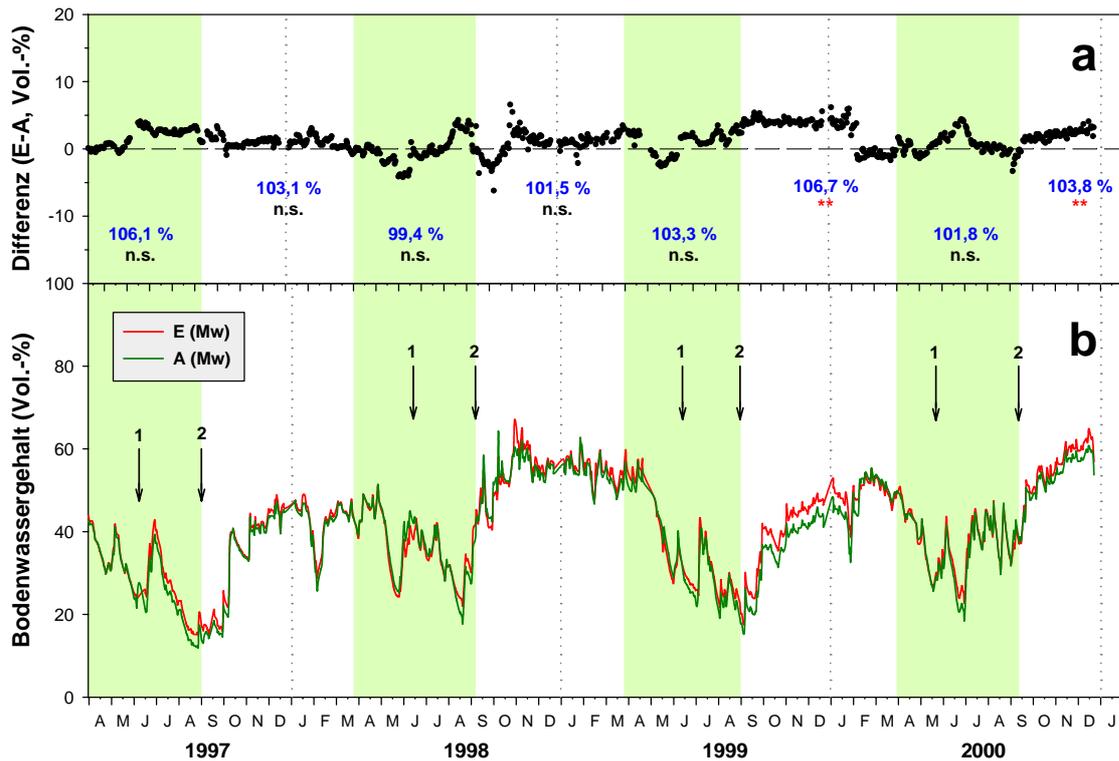


Abbildung 3.7-A: Verlauf der mittleren Bodenfeuchte der E- und A-Ringe im Untersuchungszeitraum. Darstellung wie unter 3.1-B.

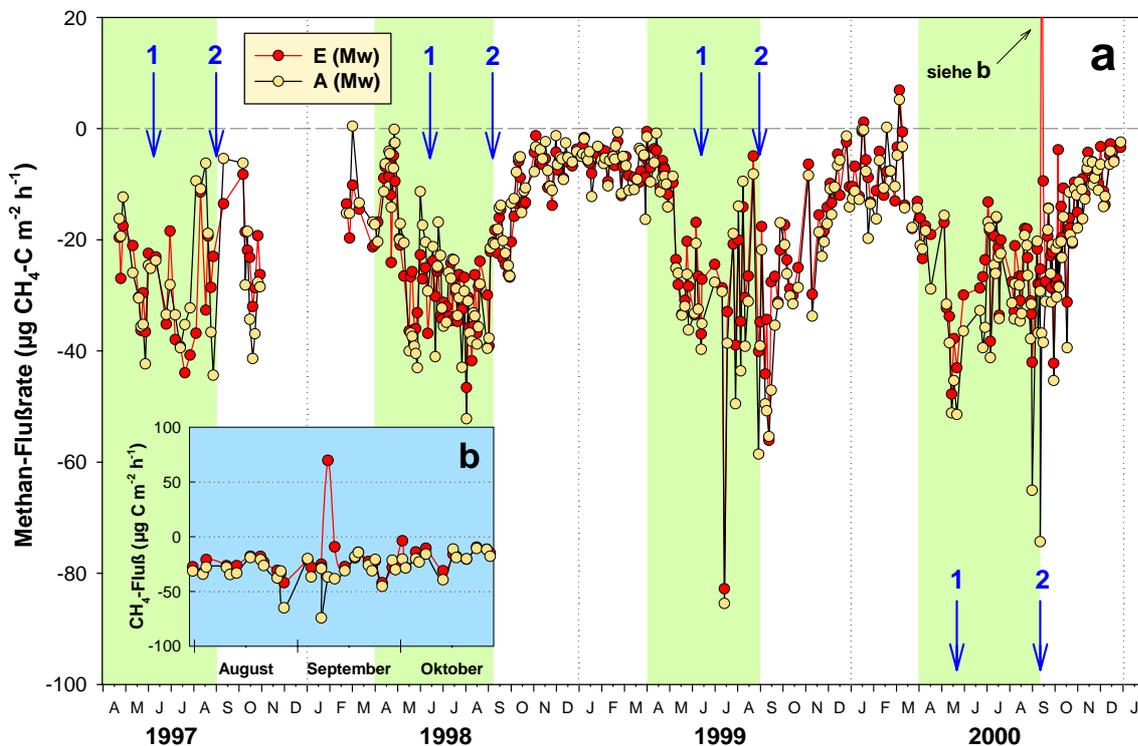


Abbildung 3.7-B: a) Jahresgang der Methanflußraten der gemittelten E- und A-Behandlung. Jeder Datenpunkt: $n = 9$. b) Ausschnittsvergrößerung des (gemittelten) CH_4 -Emissionsereignisses (vgl. 3.7-B, e) mit geeigneter Ordinatenkalierung. Zugunsten größerer Übersichtlichkeit wurde auf die Standardfehler-Darstellung verzichtet.

Über die gesamte Meßperiode gemittelt, betrug der Standardfehler für E 3,9 und für A 3,5 $\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Grün hinterlegt: "Vegetationsperiode" (ab 1. April bis zur zweiten Ernte); Pfeile mit Zahlen: Zeitpunkte der ersten und zweiten Ernte.

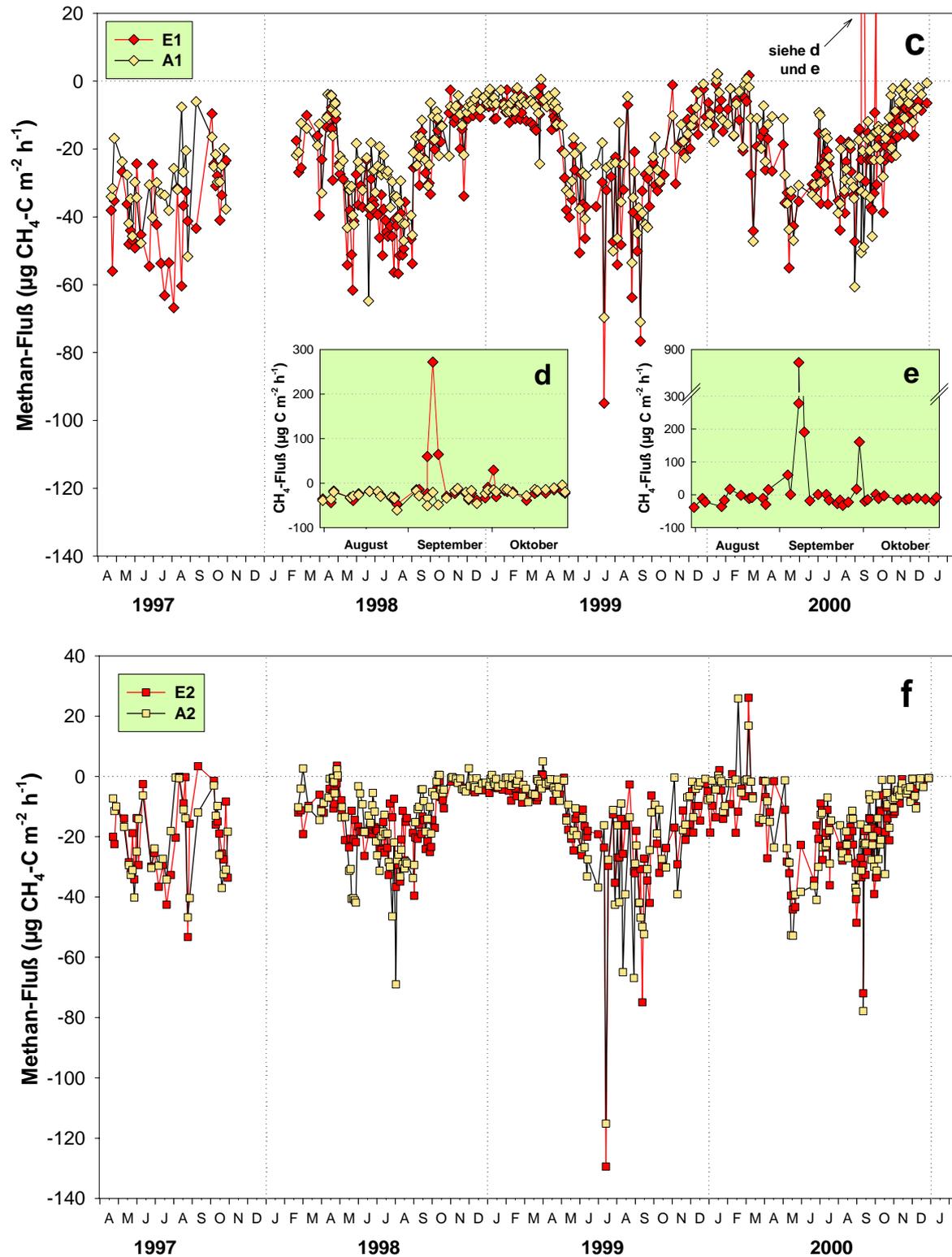


Abbildung 3.7-B: Verlauf der Methanflußraten der Ringpaare 1 (c, d, e) und 2 (f) im Untersuchungszeitraum. Jeder Datenpunkt: $n = 3$ (c, d und f). Zugunsten einer größeren Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Standardfehler-Balken verzichtet.

Abbildung d: Ausschnitt mit dem CH_4 -Emissionsereignis mit geeigneter Ordinatenskalierung.

Abbildung e: CH_4 -Fluß der Kammer E1-A, unter der die Emission auftrat.

Über die gesamte Meßperiode gemittelt, betrug der Standardfehler für E1 und A1 6,4 und 4,1 $\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ und für E2 und A2 3,6 bzw. 3,2 $\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

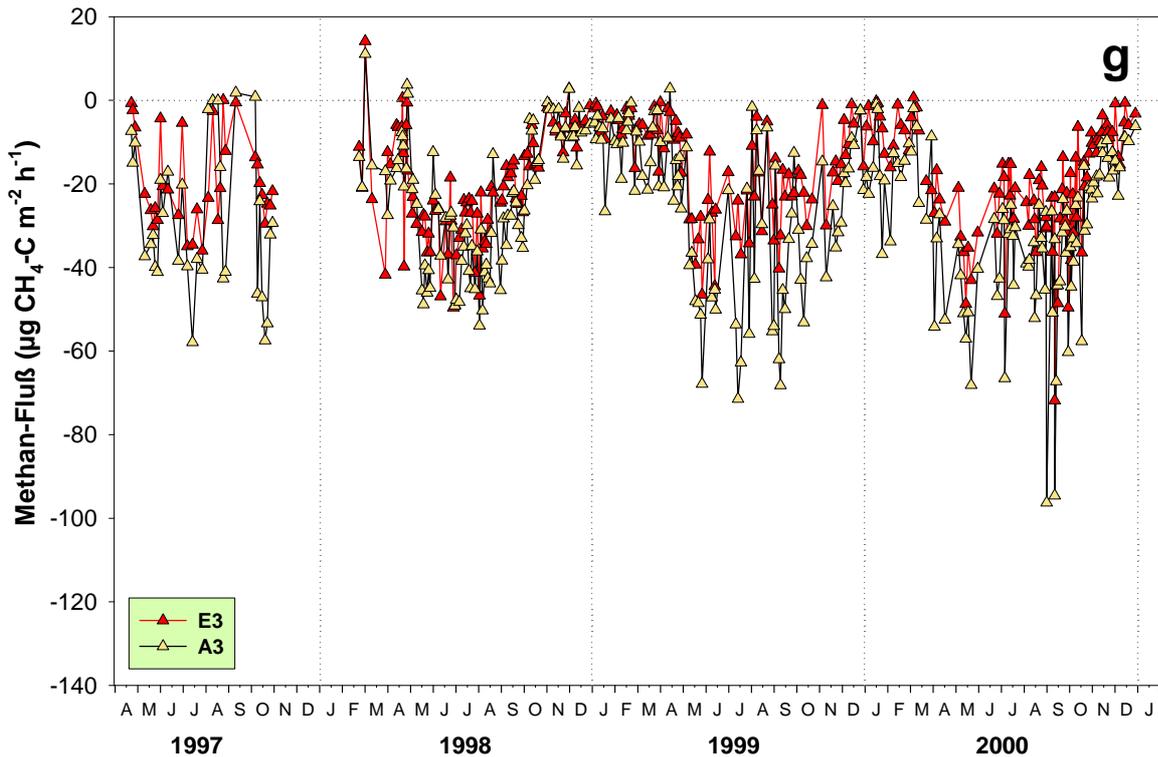


Abbildung 3.7-B: g) Verlauf der Methanflußraten des Ringpaars 3. Jeder Datenpunkt: $n = 3$. Zugunsten einer größeren Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Standardfehler-Balken verzichtet. Über die gesamte Meßperiode gemittelt, betrug der Standardfehler für E3 und A3 $4,0$ und $3,9 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

Vergleicht man die Abb. 3.7-A (mittlere Bodenwassergehalte) und 3.7-B (a; E- und A- CH_4 -Flußraten), so fällt auf, daß sich Methanoxidationsraten und Bodenwassergehalte im großen und ganzen invers bewegen (d.h. die Kurven verlaufen parallel, durch die negativen CH_4 -Flußraten). Dabei spiegelten die CH_4 -Flußraten im Jahresverlauf häufig sogar die "Ausschläge" der Bodenfeuchtekurve wider. Wie in der Vorversuchsreihe gingen sie im August/September 1997 aufgrund der großen Trockenheit auf sehr geringe Werte zurück und stiegen im Oktober nach den ersten Regenfällen, die die Trockenheit beendeten, wieder auf Sommerniveau.

Im Winter waren die CH_4 -Flußraten stets sehr gering und lagen im Mittel bei etwa $-10 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Dabei waren sie in dem sehr regenreichen Herbst/Winter 1998/1999 niedriger als im folgenden Herbst/Winter 1999/2000. So wie im Frühjahr der Bodenwassergehalt durch die austreibende Vegetation zu sinken begann, stieg die CH_4 -Oxidation nach ihrem "Wintertief" steil an. Dies erfolgte beispielsweise 1998 hauptsächlich im Mai, 1999 hingegen fand der "große Sprung" bereits Ende April statt (sowohl der der CH_4 -Flußraten als auch der der Bodenfeuchte, Abb. 3.7-A, b; und 3.7-B, a). Im Herbst verminderte sich mit steigender Bodenfeuchte die Methanoxidationsrate wieder. Im Jahr 1998 stieg die Bodenfeuchte im September nach der zweiten Ernte sehr rasch, zum einen durch die fehlende transpirierende Biomasse, aber vor allem aber wegen der hohen Niederschläge (vgl. 2.1). Zeitgleich sank auch die CH_4 -Oxidationsrate rasch, während sie im weniger regenreichen September 1999 noch auf "Sommerniveau" verblieb und erst sehr viel später im Herbst – und weniger rasch – auf "Winterniveau"

zurückging. Zur Korrelation von Bodenfeuchte und Bodentemperatur mit der Methanoxidation siehe Abschnitt 3.7.3 weiter unten.

Das CH₄-Emissionsereignis fiel, wie Abb. 3.7-A und 3.7-B zeigen, genau mit der zweiten Ernte 2000 zusammen; allerdings waren ihm schon einige Tage mit sehr seltsamen Meßbeobachtungen voraus gegangen: Die CH₄-Konzentration stieg sofort nach Kammerbedeckung auf über-atmosphärische Werte an und verharrte dort, oder sie nahm während der Kammerbedeckung wieder leicht ab. Es ergab sich also ein zu schlechtes R² zur korrekten Flußberechnung, weshalb die halbe Nachweisgrenze (in ppb) zur Flußberechnung eingesetzt wurde, wie beschrieben. Wahrscheinlich wurde bereits CH₄ emittiert, was aber mit der *closed-chamber*-Methode, die das CH₄ über der Fläche "festhält", nicht gemessen werden konnte (vgl. hierzu Anhang 4). Wenn sich eine punktförmige Quelle nahe der Erdoberfläche befindet, könnte sich unter der Haube eventuell ein Gleichgewicht zwischen CH₄-Abgabe und CH₄-Oxidation der umliegenden Fläche eingestellt haben. Als die CH₄-Abgabe am Tage der Ernte gemessen wurde, war ein ähnlicher Anstiegsverlauf zu beobachten: Anfangs sehr rasch (und höher als je zuvor), danach langsamer, aber mit ausreichendem R².

3.7.2 Methanflüsse unter erhöhtem CO₂

Im Mittel hat die Methanaufnahme in den Boden unter erhöhtem CO₂ abgenommen (Tab. 3.7-B; Abb. 3.7-C und -D). So betrug die E-Rate 1997 bzw. in der Phase vor Beginn der Anreicherung noch über 100 % der A-Rate; aber schon für das zweite Jahr der laufenden CO₂-Anreicherung (1999) betrug sie nur noch 89 %, und im dritten Jahr (2000) waren es nur noch knapp 79,8 %, d.h. die E-Flächen oxidierten ein Fünftel weniger Methan als die Kontrollflächen (Tab. 3.7-B).

Im Mittel gesehen ist dieser Unterschied nicht signifikant; allerdings ist der p-Wert bis zum Jahr 2000 rückläufig. Während zu Beginn und im ersten Jahr der CO₂-Anreicherung der E1-Ring noch hochsignifikant größere Raten als der A1-Ring aufwies, ist der Unterschied seit 1999 nicht mehr signifikant (p-Wert steigend). Zwischen E3 und A3 war er in der Vor-Anreicherungsphase nicht signifikant (A3 > E3), wohl aber seit 1999.

Um Trends klarer und übersichtlicher hervortreten zu lassen, wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum Monatsmittelwerte gebildet (Abb. 3.7-C, **a** bis **d**). Generell folgten die Methanflüsse in jedem Jahr und in jedem Ring einem ähnlichen Verlauf, wie bereits dargelegt. Interessant ist eine immer wiederkehrende "Sommerdepression", die 1997 und 1998 im Monat Juni lag, 1999 im Monat August, und 2000 im Monat Juli. Das Maximum der Methanoxidation wurde 1997 und 1998 mit dem zweiten "Sommergipfel" erreicht (Juli und August) und 1999 und 2000 mit dem ersten "Sommergipfel" (Juli bzw. Mai). Der Rückgang der CH₄-Oxidation ("Sommerdepression") scheint auf den E-Flächen häufiger weniger stark ausgeprägt gewesen zu sein als auf den A-Flächen (Abb. 3.7-C, **a** bis **d**).

Tabelle 3.7-B: Methanflußraten in $\mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ vor ("Pre") und nach ("Post") Beginn der CO_2 -Anreicherung (am 01.05.98) sowie jährlich.

Da im Jahr 1997 die Winterperiode fehlt (Januar bis April, November- und Dezember), sind die Mittel höher als in den anderen Jahren (Fehlende Daten: siehe 2.1).

Mittelwert fett, Median kursiv, E-Mittel in % des A-Mittels blau, P-Wert U-Test: rot=Signifikanz Unter den A-Werten: P-Wert des T-Tests (T) oder Man-Whitney-Tests (U).

Zeit	n	E1	A1	E2	A2	E3	A3	E (Mw)	A (Mw)
1997	32	-39,7 -39,5 <i>133,8</i>	-29,7 -29,8 <i>P=0,001(T)</i>	-20,7 -20,2 <i>97,0</i>	-21,3 -21,1 <i>P=0,846(T)</i>	-19,2 -22,1 <i>68,0</i>	-28,3 -32,2 <i>P=0,024(U)</i>	-26,5 -25,5 <i>100,1</i>	-26,5 -28,1 <i>P=0,994(T)</i>
Pre	48	-32,2 -31,2 <i>134,0</i>	-24,0 -25,0 <i>P=0,007(T)</i>	-16,3 -13,9 <i>104,1</i>	-15,7 -11,7 <i>P=0,750(U)</i>	-17,1 -20,2 <i>74,8</i>	-22,9 -19,7 <i>P=0,161(U)</i>	-21,8 -21,2 <i>104,6</i>	-20,9 -19,1 <i>P=0,689(T)</i>
1998	92	-27,6 -27,2 <i>128,5</i>	-21,5 -21,9 <i>P=0,004(U)</i>	-13,7 -13,7 <i>100,5</i>	-13,6 -10,1 <i>P=0,277(U)</i>	-20,2 -21,5 <i>84,6</i>	-23,8 -23,6 <i>P=0,099(U)</i>	-20,5 -21,7 <i>104,2</i>	-19,7 -17,7 <i>P=0,506(U)</i>
1999	89	-21,6 -14,5 <i>118,9</i>	-18,2 -13,0 <i>P=0,122(U)</i>	-15,1 -9,8 <i>100,2</i>	-15,0 -7,8 <i>P=0,293(U)</i>	-15,1 -12,3 <i>60,5</i>	-25,0 -20,6 <i>P<0,001(U)</i>	-17,3 -12,0 <i>89,0</i>	-19,4 -14,0 <i>P=0,494(U)</i>
2000	101	-15,5 -17,9 <i>83,5</i>	-18,6 -16,0 <i>P=0,369(U)</i>	-16,2 -14,0 <i>108,0</i>	-15,0 -11,9 <i>P=0,381(U)</i>	-19,6 -18,2 <i>64,3</i>	-30,4 -28,5 <i>P<0,001(U)</i>	-17,0 -16,5 <i>79,8</i>	-21,3 -19,1 <i>P=0,098(U)</i>
Post	266	-21,6 -20,6 <i>109,3</i>	-19,8 -17,7 <i>P=0,008(U)</i>	-15,5 -13,9 <i>101,9</i>	-15,2 -10,5 <i>P=0,181(U)</i>	-18,7 -17,3 <i>68,1</i>	-27,4 -26,1 <i>P<0,001(U)</i>	-18,6 -18,0 <i>89,3</i>	-20,8 -18,6 <i>P=0,215(U)</i>

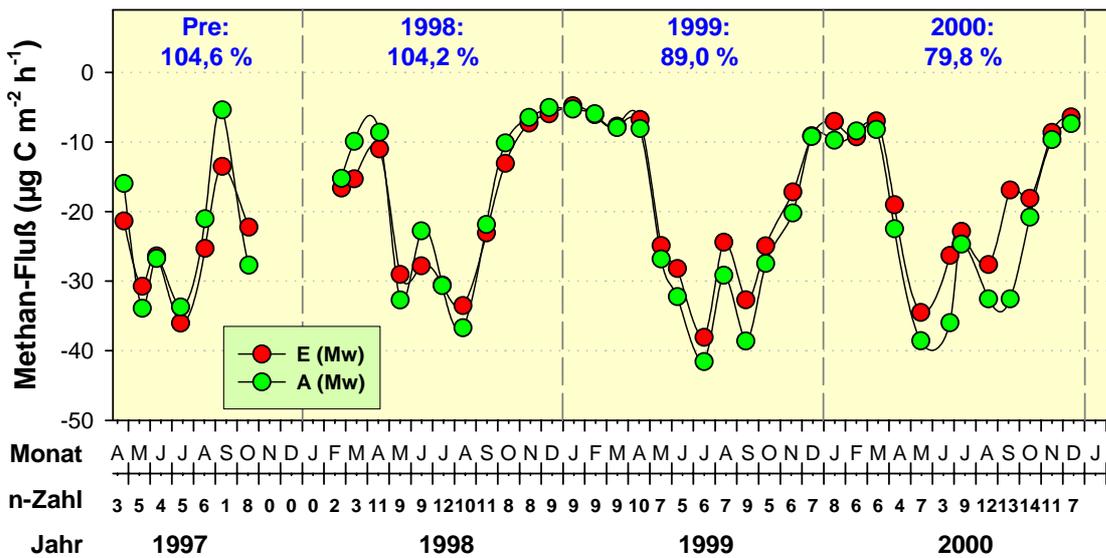


Abb. 3.7-C: Monatsmittel der CH_4 -Flüsse der mittleren Raten der E- und A-Flächen. Da die Standardabweichung (zeitliche Variabilität) bei CH_4 sehr hoch war, wird sie der Übersichtlichkeit halber nicht gezeigt. September 1997: Nur ein Wert (Messung während Dürreperiode, vgl. Vorversuche). Blaue Werte: E in Prozent des A-Werts im betreffenden Zeitraum (Pre = vor Beginn der CO_2 -Anreicherung).

Abbildung 3.7-C zeigt im Mittel einen deutlichen langfristigen CO_2 -Trend: Vor Beginn des CO_2 -Experiments, im Jahr 1997, war der Verlauf und die absolute Höhe der mittleren E- und A-Raten nahezu identisch. So betrug die mittlere CH_4 -Oxidationsrate der A-Flächen $26,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ und die der E-Flächen $26,5 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (= 100,1 % von A, vgl. Tab. 3.7-B). Nach Beginn der CO_2 -Anreicherung im Mai 1998 begannen sich die Raten auseinander zu entwickeln, am deutlichsten sichtbar während der Vegetationsperiode (Abb. 3.7-C).

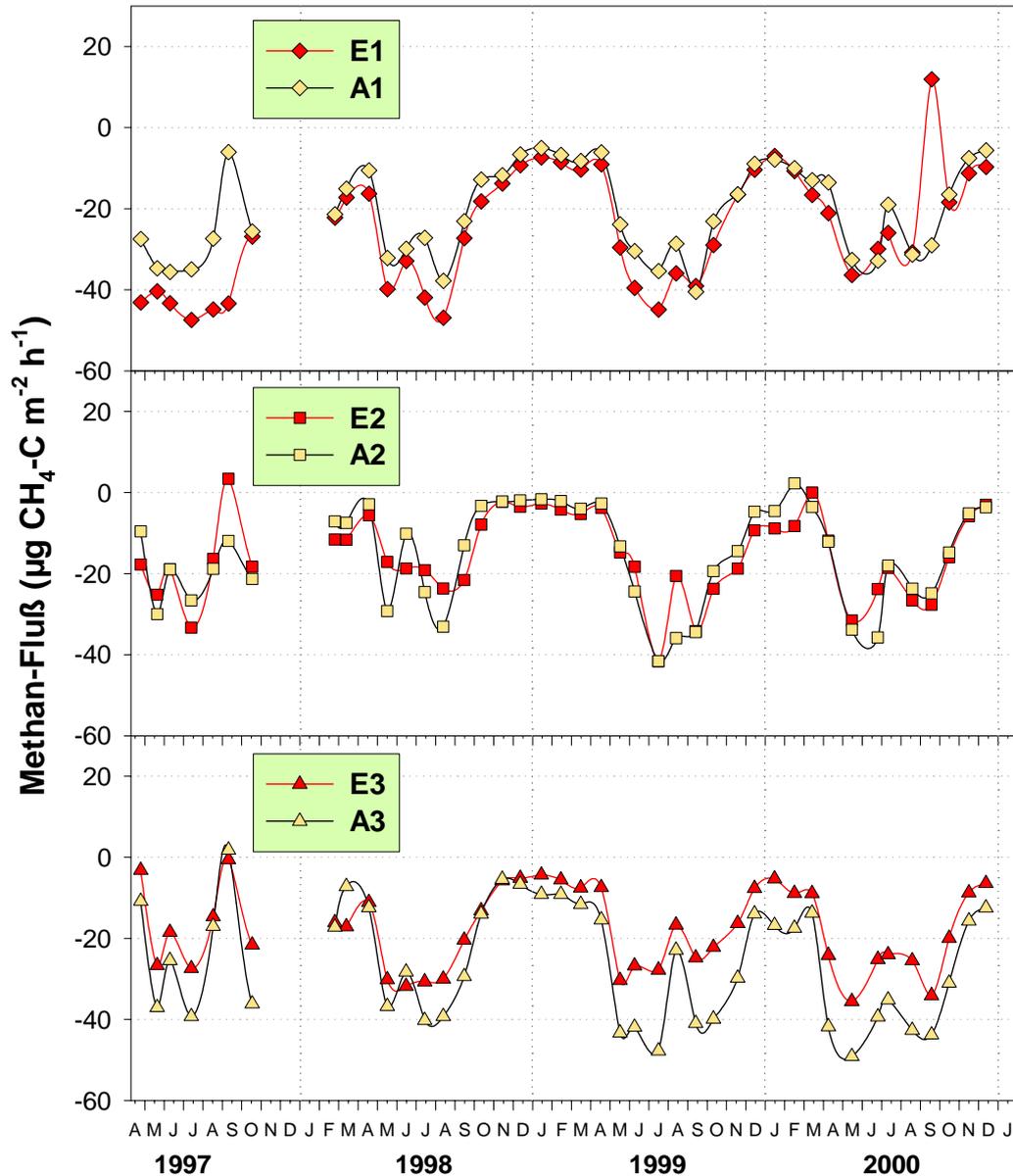


Abb. 3.7-D: Monatsmittelwerte der E- und A-CH₄-Flußraten der einzelnen Ringpaare im Verlauf des Untersuchungszeitraums. Meßtage pro Monatsmittel: siehe Abb. 3.7-C.

Die einzelnen Ringpaare waren unterschiedlich stark an diesem Trend beteiligt: Während sich die Ringpaare 1 und 3 deutlich auseinander entwickeln, existierte bei Ringpaar 2 kein so klarer Trend (Abb. 3.7-D). Ringpaar 1 war zu Beginn der Messungen am stärksten voneinander verschieden (E1-Raten > A1-Raten). Im Verlauf des Experiments ging die E1-Rate kontinuierlich zurück, so daß beide Raten (mit Ausnahme des Emissionsereignisses in E1) im Jahr 2000 nahezu identisch verlaufen (Abb. 3.7-D). Bei Ringpaar 2 lag die Sommerrate von E2 i.d.R. etwas unter der von A2 (aufgrund der Feuchteverhältnisse, $A_2 > E_2$, sollte es eigentlich umgekehrt sein); im Winter dagegen war die E2-Rate höher als die A2-Rate (v.a. im Winter 1999/2000). Insgesamt führt dies sogar zu einem leichten Anstieg der E-Raten bezogen auf die A-

Rate (von 97,0 % 1997 über 100,5 und 100,2 % 1998 und 1999 auf 108,0 % im Jahr 2000). Hieraus läßt sich noch kein klarer Trend ableiten. Bei Ringpaar 3 war die Oxidationsrate schon vor Beginn der CO₂-Anreicherung im E3-Ring stets geringer als die im A3-Ring. Wie aber Abb. 3.7-D zeigt, verstärkte sich dieser Unterschied vor allem von 1998 zum Jahr 1999 und blieb im Jahr 2000 auf dem 1999 erreichten Niveau. Vor Beginn der CO₂-Anreicherung betrug die E3-Rate 74,8 % der A3-Rate, während sie für die Dauer der laufenden CO₂-Anreicherung (1998 bis 2000) 68,1 % betrug (Tab. 3.7-B).

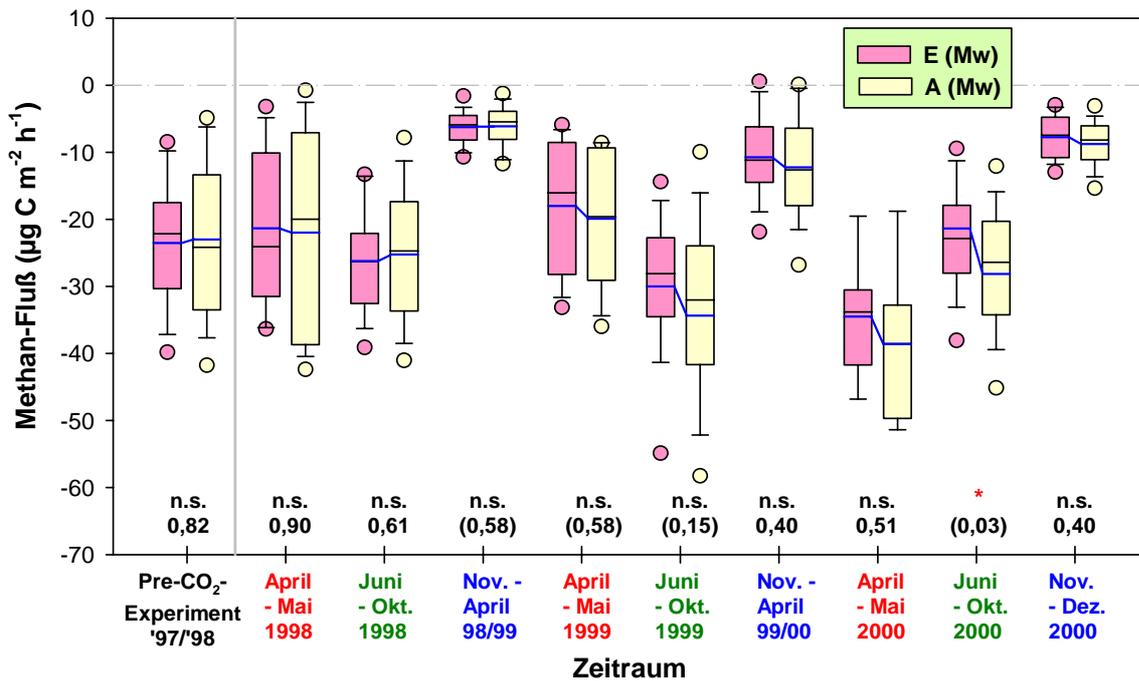


Abb. 3.7-E: Boxplots der mittleren E- und A-Raten verschiedener Meßzeiträume. Median: schwarze Linie; Mittelwert: blaue Linie. Gleiche Zeiträume sind in gleichen Farben beschriftet. Oberhalb der Zeitraum-Beschriftung: Signifikanzen; darunter p-Wert T-test. p-Wert in Klammern: Mann-Whitney-Test.

Abbildung 3.7-E zeigt, daß sich vor allem während der Vegetationsperiode (grüne Labels) ein immer größer werdender Unterschied zwischen den Behandlungen auftrat, bis hin zur Signifikanz im Sommer 2000 (P-Werte): Während vor Beginn der CO₂-Anreicherung und auch noch im Sommer 1998 die E-Flächen etwas höhere mittlere Oxidationsraten aufwiesen als die A-Flächen, verringerten sich die E-Raten gegenüber den A-Raten von 100,6 % (Vegetationsperiode 1997), 101,3 % (1998) und 87,1 % (1999) auf 75,9 % in der Vegetationsperiode 2000 (Prozentwerte nicht in Abb. 3.7-E dargestellt), also fast um ein Viertel. Die Nach-Dünge-Periode sowie die Winterperiode zeigen eine ähnliche Entwicklung; allerdings fehlen hier Daten (Winter 1997/1998; Nach-der-Düngung 2000; Winter 2000/2001). Zudem ist der Trend im Winter weniger deutlich ausgeprägt als während der Vegetationsperiode.

3.7.3 Korrelation zwischen Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Methanfluß

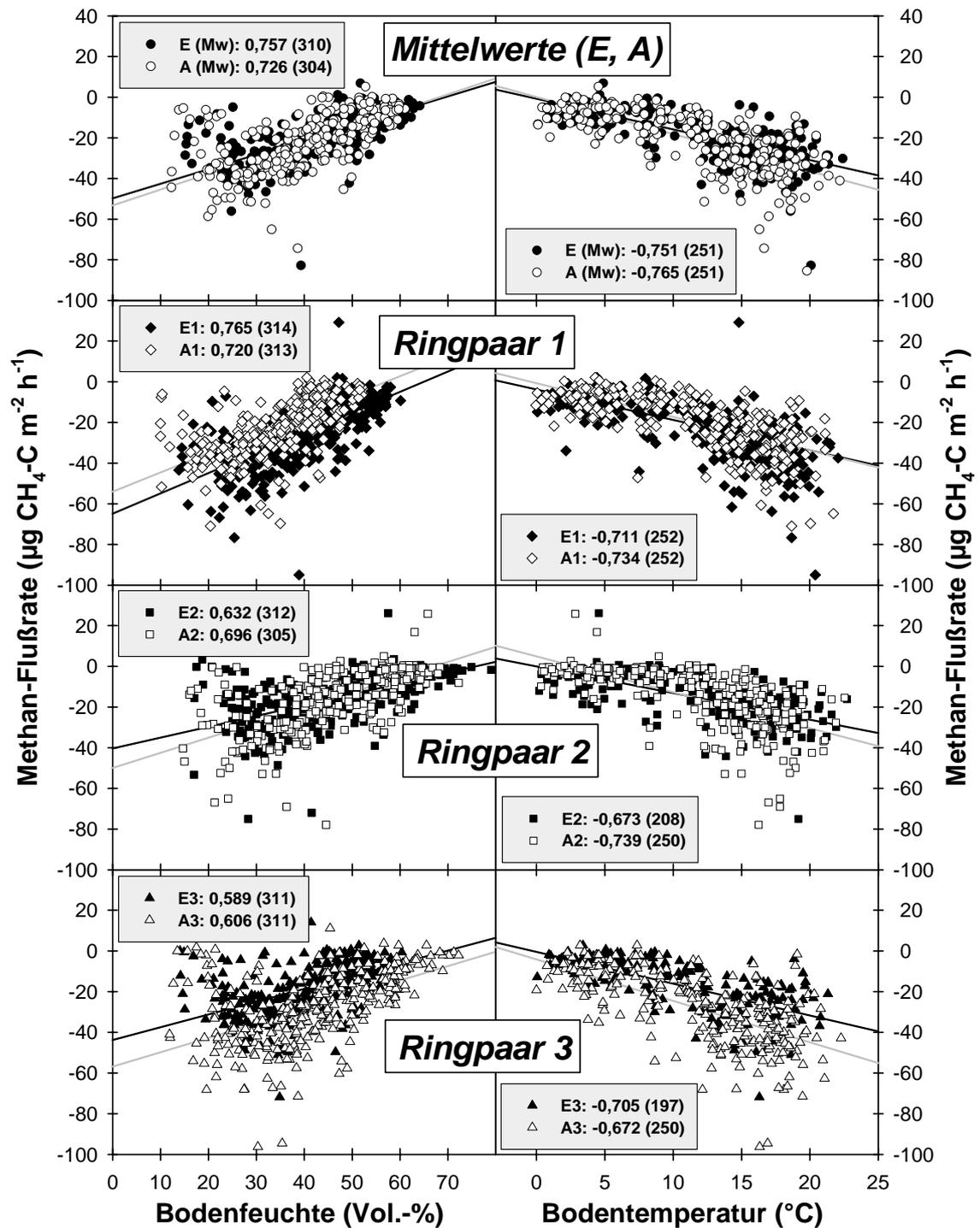


Abbildung 3.7-F: Korrelation der CH_4 -Flußraten der E- und A-Mittelwerte sowie der einzelnen Ringe mit der Bodenfeuchte (linke Spalte) und der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (rechte Spalte). Einzelne sehr hohe Flußraten wurden zugunsten einer in allen Abbildungen gleichen Ordinatenskalierung nicht dargestellt.

Legenden: Spearman-Rang-Korrelationskoeffizient r (in Klammern: n -Zahl).

Bodentemperatur-Messungen: ab 5. Mai 1998; daher weniger Datensätze (1997 fehlt).

Die Korrelation der Bodenfeuchte mit den Methanoxidationsraten war über die gesamte Untersuchungsperiode in allen Ringen relativ gut und kann nach ZÖFEL (1992) als mittlere (r zwischen 0,5 und 0,7) bis hohe Korrelation (r zwischen 0,7 und 0,9) bezeichnet werden. Die r -Koeffizienten sind alle positiv, was in diesem Falle eine negative Korrelation bedeutet, nämlich die Abnahme der Methanoxidationsraten mit steigender Bodenfeuchte. Die Korrelation mit der Bodentemperatur ist ebenfalls gut: Hier weisen nur zwei Datensätze eine mittlere Korrelation auf, einer davon der des E2, der aufgrund eines häufigeren Ausfalls der Temperaturfühler weniger Datensätze besaß. Da die Korrelation von Bodenfeuchte und Bodentemperatur miteinander ebenfalls sehr gut war, läßt sich aus dieser Korrelationsanalyse nicht ableiten, welcher Faktor ursächlich die CH_4 -Flußraten bestimmte. Trennt man die Datensätze auf, z.B. nach Bodenfeuchte-Werten über 40 oder über 50 Vol.-% und unter diesen Feuchten, so ergibt sich für beide Gruppen eine schlechtere Korrelation (keine Abbildung).

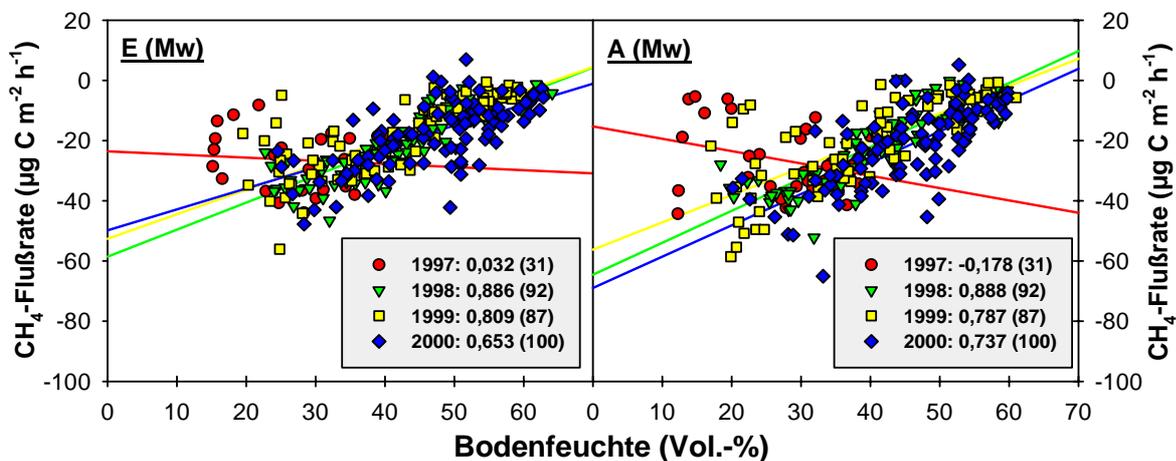


Abbildung 3.7-F: Korrelation der Methanflußraten mit der **Bodenfeuchte**, dargestellt für die einzelnen Jahre des Untersuchungszeitraums. Legende: r -Wert des Spearman-Korrelationstests, dahinter in Klammern die n -Zahlen. E-Korrelation ohne CH_4 -Emissionsereignis im Jahr 2000: $r = 0,711$ (97).

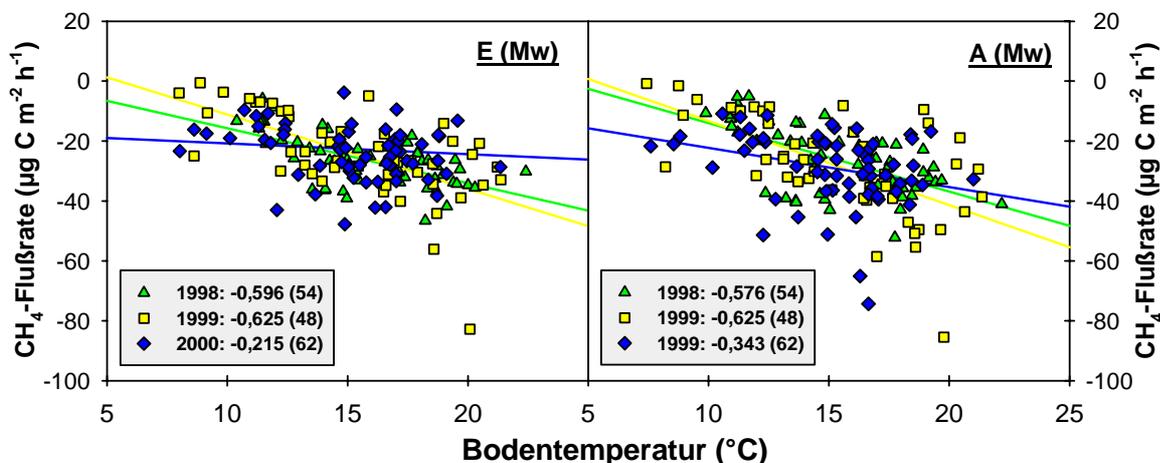


Abbildung 3.7-G: Korrelation der CH_4 -Flüsse mit der Bodentemperatur, dargestellt für die Vegetationsperioden (April bis Oktober) 1998 bis 2000. In der Legende hinter der Jahreszahl: r -Wert des Spearman-Korrelationstests, dahinter in Klammern n -Zahl der Wertepaare. E-Korrelation ohne CH_4 -Emissionsereignis im Jahr 2000: $r = -0,285$ (45).

Werden die Bodenfeuchte- und Methanflußraten nach Jahren getrennt aufgetragen (Abb. 3.7-G), besteht wie in der Vorversuchsreihe für das Jahr 1997 fast keine Korrelation zwischen beiden. In den darauf folgenden feuchteren Jahren hingegen lag sie stets im Bereich "hohe Korrelation", für 1998 (aufgerundet) sogar im Bereich "sehr hohe Korrelation". Wie Abb. 3.7-G zeigt, verbesserte sich die Korrelation der CH_4 -Flußraten mit der Bodentemperatur nicht durch Separieren der "Vegetationsperioden" (Werte von April bis Oktober) wie bei der Korrelation der N_2O -Emissionen mit der Bodentemperatur. Weiterhin ist die Korrelation der Werte des Jahres 2000 wesentlich schlechter als die der anderen beiden Sommer; der Grund hierfür ist nicht erkennbar. Dies könnte als Hinweis darauf gewertet werden, daß die Bodenfeuchte nicht der primäre Einflußfaktor für die Methanoxidation war, zumal beide CO_2 -Behandlungen die gleichen Tendenzen aufweisen, und das Emissionsereignis 2000 in E1 nicht für die schlechte Temperaturkorrelation verantwortlich war.

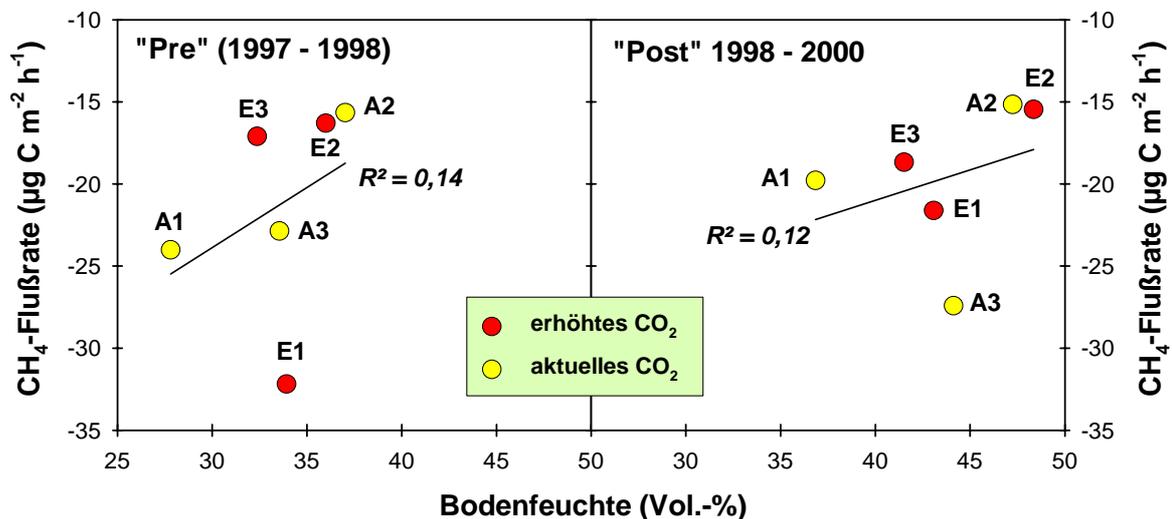


Abbildung 3.7-H: Korrelation der mittleren CH_4 -Flußraten der einzelnen Ringe mit der mittleren Bodenfeuchte des entsprechenden Zeitraums. Links: Zeitraum vor Beginn der CO_2 -Anreicherung ("Pre"); Rechts: Zeitraum nach Beginn der CO_2 -Anreicherung ("Post"). (Beide Abszissen und Ordinaten gleiche Skalierung; Bestimmtheitsmaß der Regressionslinie in jeder Abbildung.)

Über die gesamte Untersuchungsperiode gesehen wies Ring A3 im Mittel die höchste mittlere CH_4 -Oxidationsrate auf (nicht gezeigt). Zu Beginn war dies stets E1 (Abb. 3.7-H; vgl. Tab. 3.7-B), der jedoch durch den Rückgang der Oxidationsraten im Laufe der Untersuchungszeit seinen Platz an A3 abgab (Abb. 3.7-H). Die dritthöchsten Raten wurden i.d.R. im "trockensten" Ring A1 gemessen, gefolgt von E3. Die geringsten Raten wies das Ringpaar 2 mit der höchsten Bodenfeuchte auf, wobei die Raten in der Regel fast identisch waren (Tab. 3.7-B). Anders als im Vorversuch bestand im CO_2 -Experiment keine sehr strikte Beziehung zwischen dem mittleren Bodenwassergehalt und den Methanoxidationsraten (vgl. R^2 in Abb. 3.7-H). Nur tendenziell wiesen die feuchtesten Flächen die geringsten und die vier "trockeneren" die höheren Raten auf.

Die Methanoxidation auf den Untersuchungsflächen entwickelte sich, wie in den Abschnitten zuvor gezeigt, im Laufe des CO₂-Experiments auseinander – ohne daß die Wassergehalts-Entwicklung dies wiedergespiegelt hätte: Es existierte keine deutlich oder kontinuierlich gestiegene Bodenfeuchte auf den E-Flächen (vgl. 3.1, Bodenparameter), die für den Rückgang der E-CH₄-Oxidationsraten verantwortlich gemacht werden könnte. Da hier im Hauptversuch die Korrelation der einzelnen Methanflußraten mit der täglichen Bodenfeuchte (im Gegensatz zum Vorversuch) sehr gut war, muß es eine andere Erklärung für die CO₂-Wirkung auf die Methanoxidationsraten geben.

3.8 Nitrifikations- und Denitrifikationsanteil am N_2O -Fluß (AIT)

Zur Unterscheidung der relativen Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation an den Gesamt- N_2O -Emissionen wurden Messungen mit der Acetylen-Inhibierungs-Technik (AIT, modifiziert nach MÜLLER *et al.* 1998) von April 1998 bis Juli 1999 durchgeführt. Hierbei wurden die Ecken der Felder A1 bis A3 beprobt (ab 30.4.1998), ab Juni 1998 auch die Innenfläche des E4-Rings (destruktive Probenahmen möglich). Dargestellt sind im folgenden die Mittelwerte der Flächen A1 bis A3 gegenüber dem E4-Wert, um durch erhöhtes CO_2 möglicherweise verursachte Tendenzen erkennen zu können. Da für die relativen Anteile der N_2O -Emissionen aus beiden Prozessen Parameter wie der Wassergehalt des Bodens, der Nitrat- und Ammonium-Gehalt sowie die O_2 -Versorgung (Bodenporenvolumen, Lagerungsdichte) sehr wichtig sind, wird der Wassergehalt vor den Inkubationsergebnissen dargestellt (zum Nitrat- und Ammonium-Gehalt siehe Abschnitt 3.2).

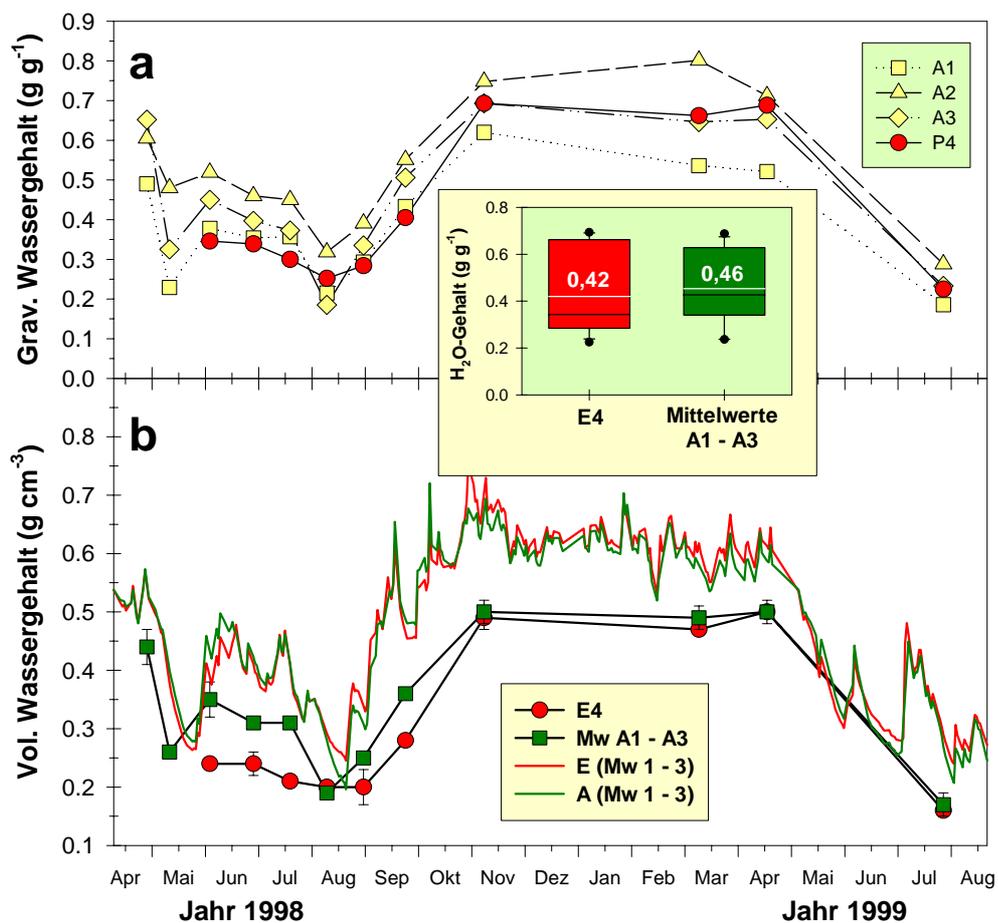


Abbildung 3.8-A: Wassergehalte der zur Inkubation entnommenen Bodensäulen.

- Gravimetrischer Wassergehalt aller untersuchten Flächen (A1 – A3, E4),
- theoretischer volumetrischer Wassergehalt der gemittelten A-Proben und der E4-Proben im Vergleich mit den täglichen TDR-Sonden-Werten,
- Boxplot-Abbildung der Wassergehalte der Inkubationsproben des in **a** und **b** gezeigten Meßzeitraums. Helle Linie und Zahlen: Mittelwerte, schwarze Linie: Mediane. Unterschiede nicht signifikant.

Abbildung 3.8-A zeigt die **Wassergehalte** der zur Inkubation entnommenen Bodensäulen. In den volumetrischen Wassergehalt über die "Lagerungsdichte" (Trockengewicht der insgesamt 135,7 cm³ Bodensäulen pro Glas) umgerechnet, folgte der zeitliche Wassergehalts-Verlauf auf etwas niedrigerem Niveau den mit TDR-Sonden gemessenen mittleren Wassergehalten der E- und A-Flächen. So wie sich diese nicht signifikant voneinander unterscheiden (siehe 3.1.2), unterscheiden sich auch die E4-Wassergehalte nicht von den gemittelten A-Wassergehalten im Inkubationsexperiment (Abb. 3.8-A, c; Tab. 3.8-A). Es gibt allenfalls eine Tendenz hin zu steigenden Wassergehalten beim E4-Ring im Vergleich mit dem A1-Ring (Abb. 3.8-A, a). (Unterschied zwischen TDR-Sonden-Werten und errechneter Feuchte der Bodensäulen in Abb. 3.8-A, b: entsteht durch die nicht korrekt bestimmte "Lagerungsdichte").

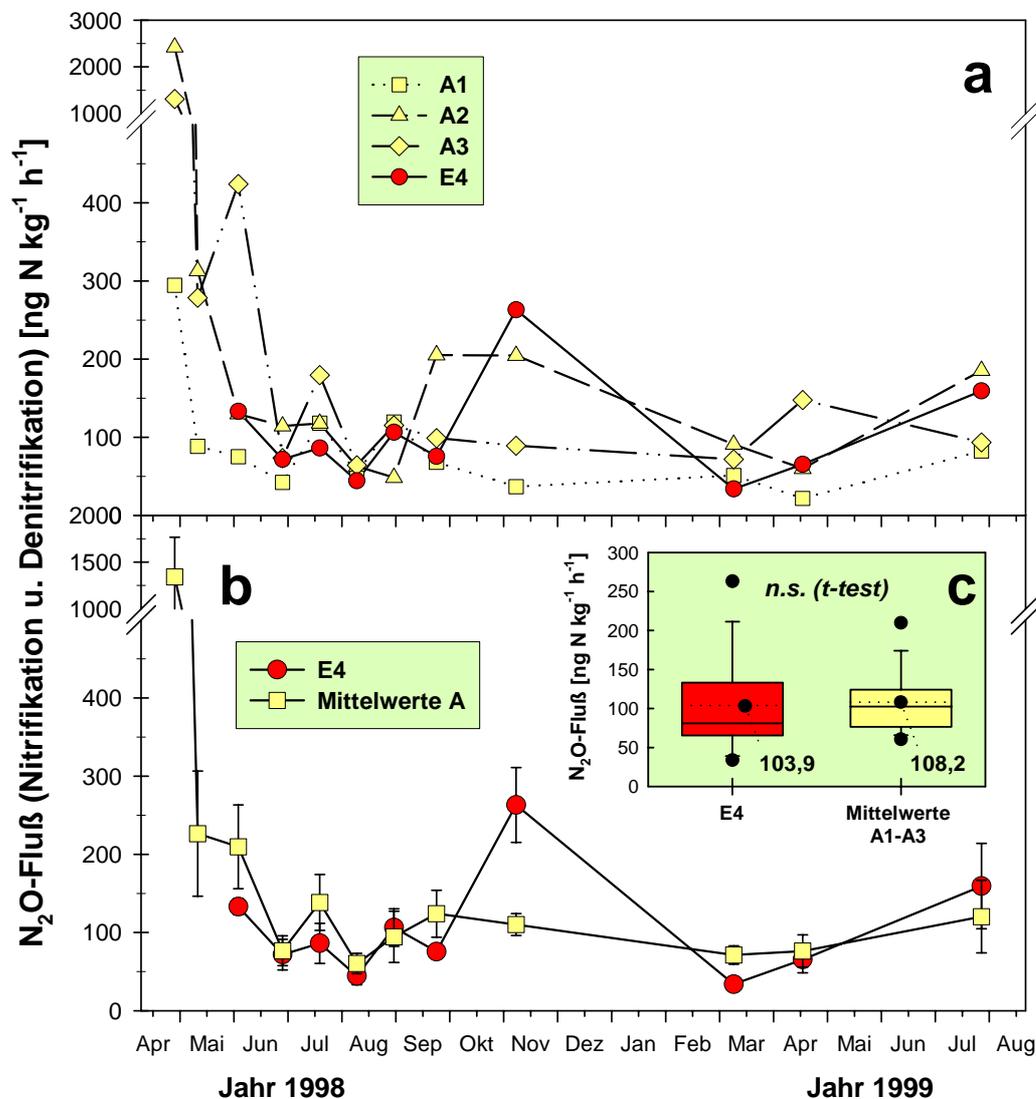


Abbildung 3.8-B: Absolute N₂O-Flußraten (aus Nitrifikation und Denitrifikation) der inkubierten Bodensäulen. a) Raten der Flächen A1 – A3 und P4, b) mittlere A- und E4-Rate(n) mit Standardfehler, c) Boxplot der während der in a und b dargestellten Zeitperiode gemessenen E4- und A-Raten. Gepunktete Linien: Mittelwerte, durchgezogene Linien: Medianwerte.

In der "**Lagerungsdichte**" unterscheidet sich jedoch die E4- von der gemittelten A-Fläche und auch von jeder einzelnen A-Fläche: Sie war signifikant geringer ($0,72$ gegenüber $0,74 \text{ g cm}^{-3}$, vgl. Tab. 3.8-A). Da die Fläche E4 in der gleichen Bodeneinheit liegt wie die umgebenden A-Flächen (Grünhage et al. 1996), muß das Porenvolumen des E4 etwas größer gewesen sein. Gegen Ende der Inkubationsversuche stieg der E4-Lagerungsdichte-Wert beständig und näherte sich dem mittleren A-Wert an (nicht gezeigt).

Generell zeigen auch die mit der Inkubationstechnik gemessenen **N₂O-Flußraten** die gleichen Charakteristika wie die mit der Haubentechnik gemessenen Raten (Abb. 3.8-B, **a, b**): Sie waren kurz nach erfolgter Düngung (April 1998) sehr hoch und sanken im Mai/Juni rasch auf "Hintergrund"-Niveau. Mit den einsetzenden Herbstniederschlägen stiegen sie 1998 wieder etwas an, vor allem auf der feuchten A2-Fläche. Bei großer Trockenheit wie im August 1998 waren die N₂O-Emissionsraten stets sehr niedrig und lagen häufig unter der Nachweisgrenze der AIT-Methode. Bezüglich der absoluten N₂O-Flußraten gab es im Gegensatz zu den Haubenmessungen während der Vegetationsperiode keinerlei signifikanten Unterschied zwischen der Behandlung mit erhöhtem CO₂ (E4) und dem Mittelwert der Kontrollflächen A1 bis A3 (Abb. 3.8-B, **c**), auch gab es keinen Trend hin zu steigenden oder sinkenden N₂O-Emissionsraten (Abb. 3.8-B, **b**). Wenn statt des Mittelwerts der Flächen A1 bis A3 die Einzelwerte mit E4 verglichen werden (Abb. 3.8-B, **a**; Tab: 3.8-B) ändert sich nichts Wesentliches an diesen Ergebnissen: Die Fläche E4 liegt in ihrer Bodenfeuchte zwischen den Flächen A1 und A3 und auch die N₂O-Emissionsrate des Mittelwerts aus A1 und A3 (101,4) ist mit der E4-Rate fast identisch (103,9).

Auch die **Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation** an den Gesamt-N₂O-Emissionen sind nicht signifikant voneinander verschieden (A1- bis A3-Mittelwert gegenüber E4-Wert, Tab. 3.8-B). Dennoch ist der Anteil der Nitrifikation auf den A-Flächen im Schnitt etwas höher als auf der E4-Fläche (und der der Denitrifikation somit etwas niedriger als bei E4), siehe Tab. 3.8-B. Der zeitliche Verlauf der Anteils-Entwicklung ist auf allen Flächen sehr ähnlich (Abb. 3.8-C, **c, d**; A-Flächen nur als Mittelwerte dargestellt). Beim Vergleich der Abb. 3.8-C, **b**, mit **c** und **d** fällt eine gewisse Beziehung der Anteile beider Prozesse zum Wassergehalt des Bodens auf. Trägt man jedoch einen der Prozeßanteile (hier: Denitrifikation) gegen den Wassergehalt (hier: gravimetrischer Wassergehalt) auf, ergibt sich keine gute Korrelation (Abb. 3.8-D, **a**). Wenn jedoch die unsicherheits-behafteten Werte mit den niedrigsten N₂O-Emissionsraten sowie die Dünger-beeinflußten N₂O-Emissionsraten eliminiert werden (blaue **X** in Abb. 3.8-D, **a**), so wird die Korrelation wesentlich besser (vgl. auch Tab. 3.8-A): Mit steigendem Wassergehalt steigt der prozentuale Anteil der Denitrifikation an den N₂O-Emissionen, bei großer Trockenheit hingegen kann die Nitrifikation um die 90 % zu den (geringen) N₂O-Emissionen beitragen.

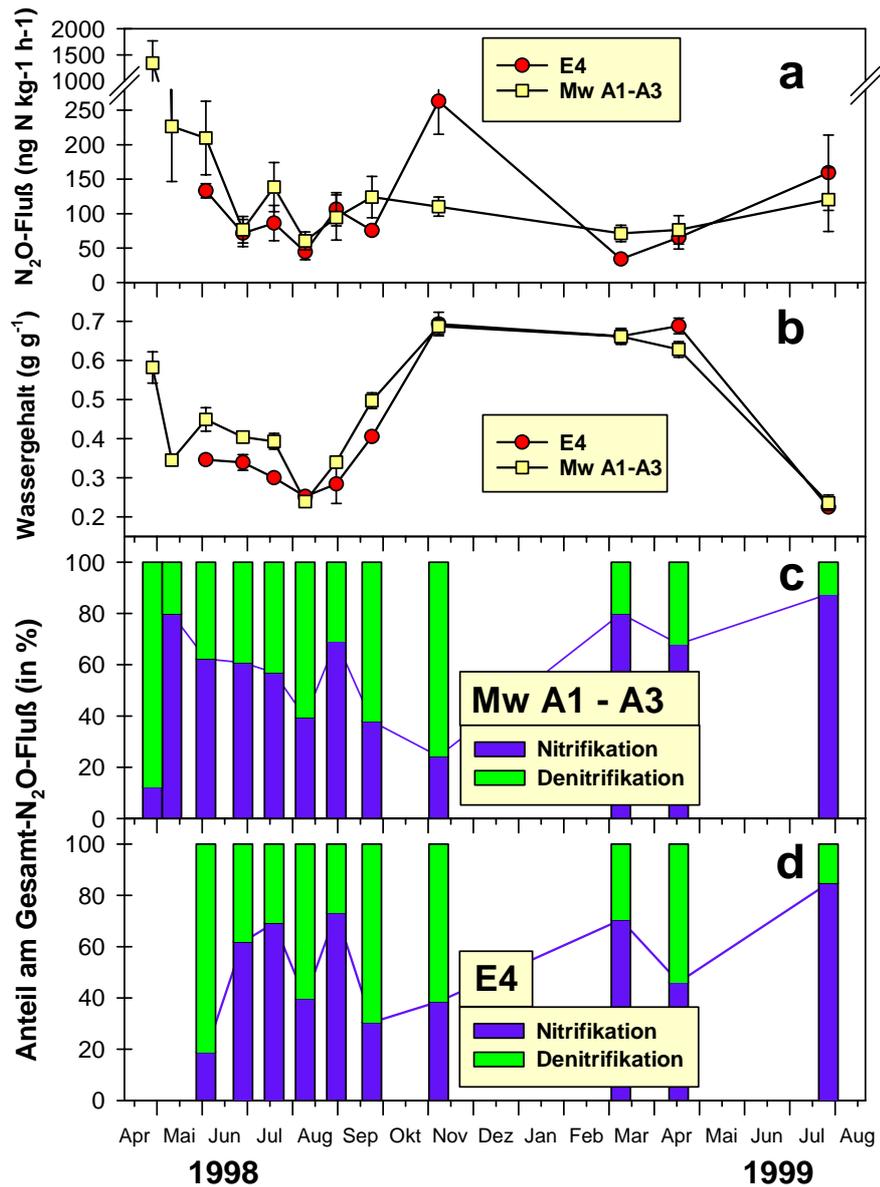


Abbildung 3.8-C: Gesamt- N_2O -Emissionen (a), Wassergehalt (b), und (c) prozentuale Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation bei den A-Flächen (Mittelwerte von A1 bis A3), und der E4-Fläche (d).

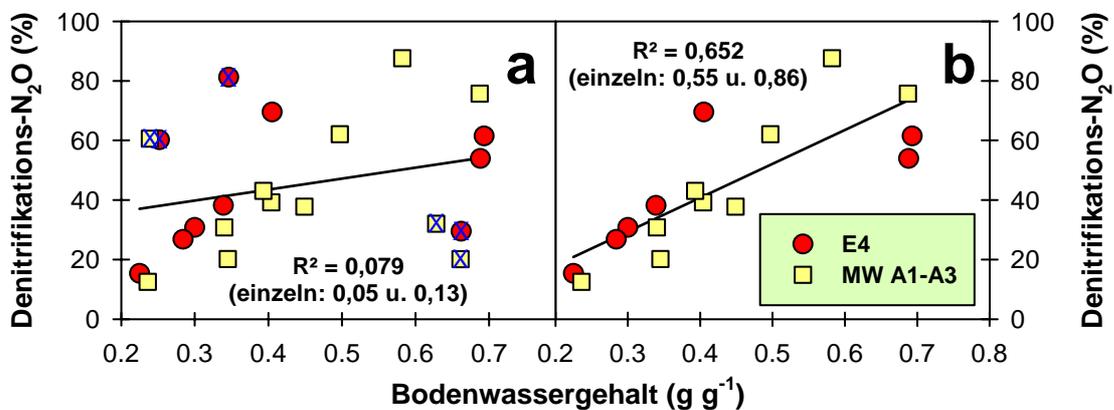


Abbildung 3.8-D: Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Denitrifikations-Anteil an den Gesamt- N_2O -Emissionen, a) alle Werte (Legende siehe b) mit blauem X sind die Werte mit sehr geringer absoluter N_2O -Flußrate, bzw. Düngungsbeeinflusste Raten gekennzeichnet, die in b) weggelassen wurden.

Tabelle 3.8-A: Ergebnisse der Acetylen-Inhibierungs-Technik (AIT) mit 5 Pa C₂H₂: Mittelwerte verschiedener Parameter (Bodenparameter, Inhibierung der Methanoxidation, N₂O-Flüsse aus Nitrifikation und Denitrifikation absolut und prozentual u.a.) ± Standardabweichung der Werte während des Meßzeitraums^e.

Parameter (MW=Mittelwerte)	A- und T-MW (1997 – 1999) ^{II}	A-Mittelwerte (1998 – 1999) ^I	E4-Werte (1998 – 1999) ^I	t-test ^I
Gravimetrischer Wassergehalt (g g ⁻¹ Boden)	0,44 ± 0,16	0,46 ± 0,17	0,42 ± 0,19	n.s.
Lagerungsdichte der Bodensäulen (g cm ⁻³)	0,75 ± 0,06	0,74 ± 0,05	0,72 ± 0,03	P=0,003
Methanoxidation (<i>dt1</i> , n=6, ng C kg ⁻¹ h ⁻¹) ^a	-174,5 ± 72,3	-163,4 ± 76,9	-218,7 ± 112,9	n.s.
CH ₄ -Ox.-Inhibierung mit C ₂ H ₂ (% <i>dt1</i> -Rate) ^b	105,2 ± 19,2	109,6 ± 8,4	107,0 ± 6,8	
N ₂ O-Emissionsrate (<i>dt2</i> , n=6, ng N kg ⁻¹ h ⁻¹) ^a	241,1 ± 351,6	108,2 ± 44,1	103,9 ± 67,8	n.s.
Mittlerer Standardfehler (N ₂ O-Emiss. <i>dt2</i>) ^c	58,3	27,7	21,6	
Nitrifikations-N ₂ O (in %)	50,8 ± 26,2	58,6 ± 19,7	53,3 ± 22,5	n.s.
Denitrifikations-N ₂ O (in %)	49,2 ± 26,2	41,4 ± 19,7	46,7 ± 22,5	n.s.
Faktor <i>dt1/dt2</i> (n=3, Gläser ohne C ₂ H ₂) ^d	1,010 ± 0,681	1,021 ± 0,695	0,850 ± 0,459	

Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Versuchsfeldboden (5 cm Tiefe) und den Bodensäulen in den Inkubationsgläsern während der Inkubationszeit: 2,03 ± 1,42 °C

^I Meßzeitpunkte: 5.6.98, 30.6.98, 21.7.98, 11.8.98, 1.9.98, 25.9.98, 9.11.98, 12.3.99, 20.4.99, 30.7.99; **t-test:** A-Mittelwerte versus E4-Werte dieser Zeitpunkte

^{II} Meßzeitpunkte zusätzlich zu **I**: 3.9.97, 21.10.97 (ohne N₂O), 30.4.98, 13.5.98;

^a Mittelwert aller 6 Gläsern pro Behandlung, zweite Inkubationsperiode (*dt2*, bei Acetylenzugabe, potentielle Rate, vgl. 2.11)

^b bezogen auf die *dt1*-Rate (=100%) der mit C₂H₂ inhibierten 3 Gläser

^c mittlerer Standardfehler: Maß für die mittlere räumliche Variabilität; Tabelle 3.8-A: zeitliche Variabilität (siehe **e**)

^d Faktor zur Berechnung der prozentualen Nitrifikations- und Denitrifikations-Anteile an der Gesamt-N₂O-Emission, siehe 2.11; (zudem Maß für zeitliche Variabilität)

^e gemeint ist hier die aus den Mittelwerten des Meßzeitraums gebildete Standardabweichung (zeitliche Variabilität) – *nicht* die mittlere Standardabweichung der 6 Gläser pro Termin (räumliche Variabilität)

Tabelle 3.8-B: Ergebnisse der N₂O-Emissionen der Ringe A1 bis A3 und E4 (Absolutwerte, Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation) für den Zeitraum der E4-Messungen (vgl. Abb. 3.8-A bis -C) (WG = Wassergehalt).

Parameter	A1	A2	A3	Mw A	E4
N ₂ O-Emissionsrate (<i>dt2</i> , n=6, ng N kg ⁻¹ h ⁻¹)	67,0	121,9	135,7	108,2	103,9
Nitrifikations-N ₂ O (in %)	57,6	56,1	62,1	58,6	53,3
Denitrifikations-N ₂ O (in %)	42,4	43,9	37,9	41,4	46,7
Gravimetrischer Wassergehalt (g g ⁻¹)	0,39	0,52	0,45	0,46	0,42
Korrelation zw. %Denitrifikation u. WG (g g ⁻¹): R ² für alle Werte des Meßzeitraums	0,34	<0,001	0,17	0,13	0,05
Korrelation zw. %Denitrifikation u. WG (g g ⁻¹): R ² ohne geringe N ₂ O-Flußraten	0,79	0,09	0,48	0,86	0,55

Die zur Inkubation benutzte Acetylenkonzentration von 5 bis 10 Pa hemmte auch die Oxidation von CH_4 : In Abb. 3.8-E sind die mittleren Oxidationsraten der E4- und der A-Bodensäulen im ersten und zweiten Inkubationszeitraum ($dt1$, 30 min und $dt2$, 5 h) dargestellt. Während des ersten Zeitraums $dt1$ fand – ohne Acetylen – stets CH_4 -Oxidation statt. Im zweiten Zeitraum wurde CH_4 hingegen nur in den Gläsern ohne C_2H_2 mit annähernd gleicher Rate wie im ersten Zeitraum oxidiert. In den Gläsern mit Acetylen war dagegen keine CH_4 -Oxidation und bisweilen sogar ein leichter Konzentrationsanstieg von CH_4 zu verzeichnen (Inhibierungsraten über 100 %, siehe Tab. 3.8-A). Die Inhibierung war stets so vollständig, daß hieran erkannt werden konnte, ob die Versuchsdurchführung korrekt erfolgt war: In einem Fall sank in einem C_2H_2 -Glas die CH_4 -Konzentration genauso wie in den nicht-inhibierten Gläsern, so daß bei Zugabe des C_2H_2 vermutlich eine falsche Spritze (ohne C_2H_2) verwendet worden war. Darauf hin wurden auch die N_2O -Werte dieses Glases von der Berechnung der Anteile von Nitrifikation und Denitrifikation ausgeschlossen.

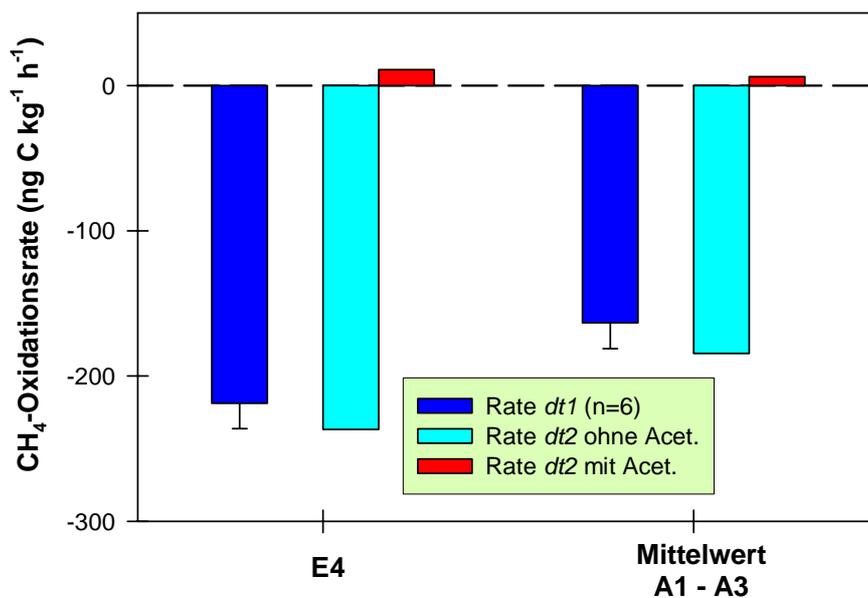


Abbildung 3.8-E: Inhibierung der CH_4 -Oxidation durch die Zugabe von 5 bis 10 Pa C_2H_2 . Dargestellt sind die mittleren CH_4 -Oxidationsraten der Bodensäulen der E4- und der A-Flächen im E4-Meßzeitraum (vgl. Abb. 3.8-A bis -C). Für den ersten Inkubationszeitraum ($dt1$, 30 min.) ist der mittlere Standardfehler der 6 Inkubationsgläser dargestellt. Die Inhibierung wird im $dt2$ -Zeitraum sichtbar (je 3 Gläser mit und ohne Acetylen, 300 min).

3.9 Denitrifikations-Enzym-Aktivität (DEA)

Die Umsetzung von Nitrat zu N_2 unter optimalen Denitrifikationsbedingungen diente dazu, Menge und Aktivität der aktuell im Boden vorhandenen Denitrifikationsenzyme zwischen den einzelnen Ringflächen und CO_2 -Behandlungen vergleichbar zu machen. Die DEA-Untersuchung wurde in der Vegetationsperiode 1998 in Abständen von etwa 3 Wochen wiederholt (vgl. 2.10).

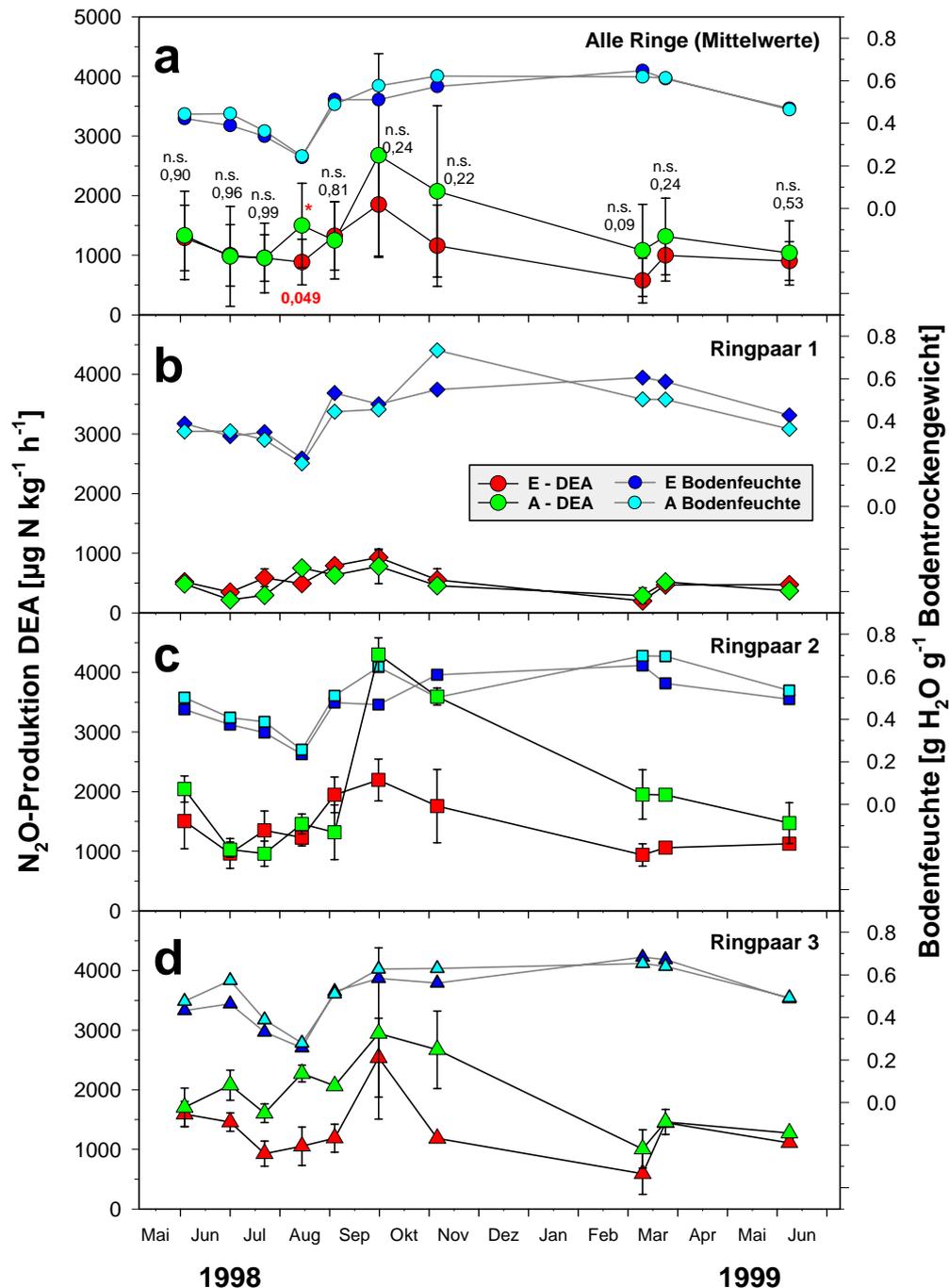


Abbildung 3.9-A: Verlauf der Denitrifikations-Enzym-Aktivität (DEA) und des gravimetrischen Wassergehalts auf den einzelnen Ringflächen (**b** bis **d**) sowie gemittelt in der E- und A-Behandlung (**a**). DEA-Kurven (linke Ordinate): Schwarzweiß; Wassergehalt (rechte Ordinate): Grautöne. Fehlerbalken: Standardabweichung (**a**: n=9; **b** bis **d**: n=3).

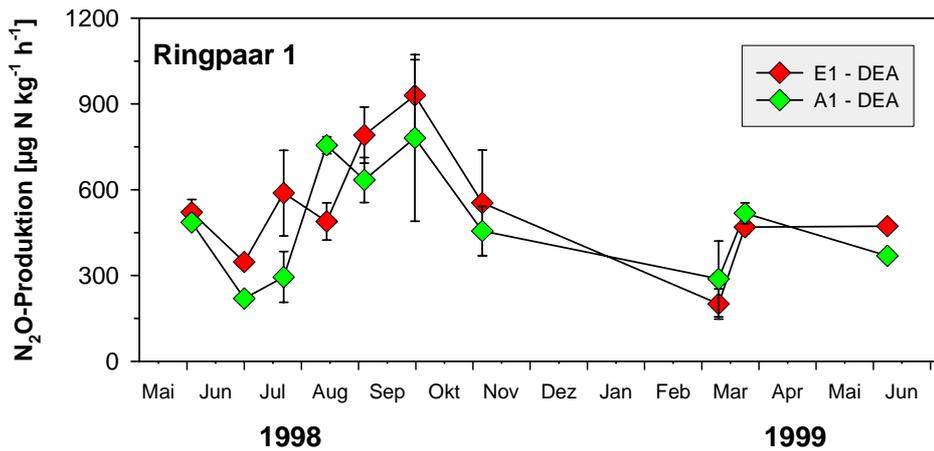


Abbildung 3.9-A, b: Vergrößerte Darstellung der Denitrifikations-Enzym-Aktivität des Ringpaars 1 aus der vorherigen Abbildung, mit veränderter Ordinatenkalierung. (Hier ohne Wassergehalte). Fehlerbalken: Standardabweichung, $n=3$.

Die höchsten Werte (Menge und Aktivität) der Denitrifikationsenzyme (im folgenden mit "DEA-Werte" bezeichnet) traten in jedem einzelnen CO₂-Ring Ende September 1998 auf (Abb. 3.9-A). Zu diesem Zeitpunkt hatten die starken Herbst-Niederschläge des Jahres 1998 für eine sehr hohe Bodenfeuchte bei (noch) relativ hohen Bodentemperaturen gesorgt – bis auf das stets knappe Nitrat waren dies gute, denitrifikationsförderliche Bedingungen. Geringe DEA-Werte wurden Anfang Juli 1998 gemessen; ähnlich niedrige oder sogar noch etwas geringere Werte traten Anfang März 1999 in den einzelnen E-Ringen sowie in A1 und A3 auf. Im sehr feuchten Ring A2 hingegen wurden im "nassen" Herbst 1998 Werte erreicht, die mehr als doppelt so hoch waren als die durchschnittlichen Sommerwerte zuvor; dieses hohe Niveau ging nur langsam wieder auf den vorherigen Level zurück (Abb. 3.9-A, c).

Die Korrelation der DEA-Werte eines Rings mit seiner Bodenfeuchte war überraschend schlecht: Das Bestimmtheitsmaß (R^2) war für keine der dargestellten Regressionen besser als 0,2 (= E2-Werte; Abb. 3.9-B). Vielmehr scheint ein (von mehr als nur einem Faktor) bestimmter jahreszeitlicher Verlauf mit einem Maximum im Spätsommer bzw. Herbst vorzuliegen. Die Datengrundlage ist jedoch nicht ausreichend, um diesen Jahresgang eingehender nach verschiedenen Einflußgrößen charakterisieren zu können; vor allem aus der Frühjahrs- und Düngeperiode müßten mehr Messungen vorliegen.

Wie Abb. 3.9-A und Abb. 3.9-C zeigen, war die Aktivität und Menge der Denitrifikations-Enzyme nach Beginn der CO₂-Anreicherung im Mittel in den Kontrollringen höher als in den Anreicherungsringen, über alle Datensätze betrachtet allerdings nicht (ganz) signifikant (Abb. 3.9-C, b). Der gravimetrische Wassergehalt hingegen war über alle Messungen gemittelt fast identisch (Abb. 3.9-C, a). Werden die E- und A-Messungen für jeden Meßzeitpunkt miteinander verglichen (je $n = 9$, t-Test), so waren sie nur zum Zeitpunkt der geringsten Bodenfeuchte, Mitte August 1998, signifikant voneinander verschieden (Abb. 3.9-A, a). Generell zeigten E1 und A1 wesentlich geringere DEA-Werte als die anderen vier Ringe (Abb. 3.9-A; Abb. 3.9-D).

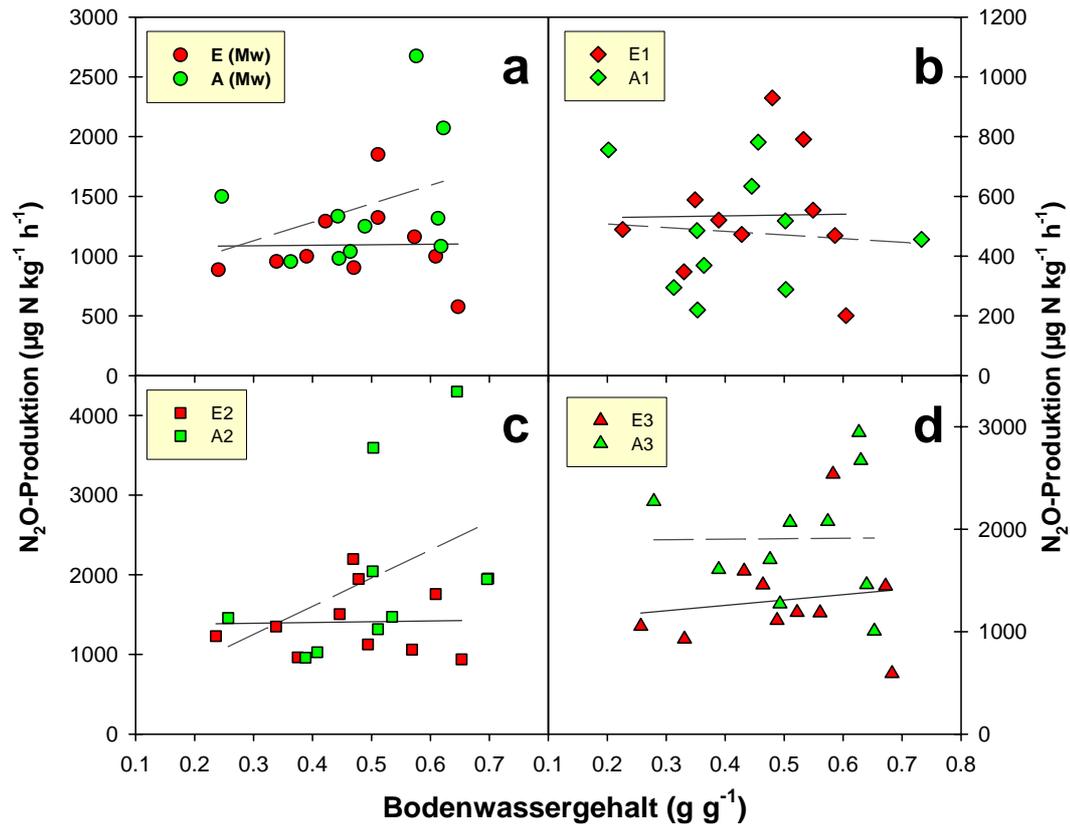


Abbildung 3.9-B: Korrelation der DEA-Werte mit der gravimetrischen Bodenfeuchte zum Untersuchungszeitpunkt. **a)** E- und A-Mittelwerte; **b)** Ringpaar 1; **c)** Ringpaar 2; **d)** Ringpaar 3. Schwarz durchgezogen: Regressionsgerade E-Werte, Grau gestrichelt: Regressionsgerade A-Werte.

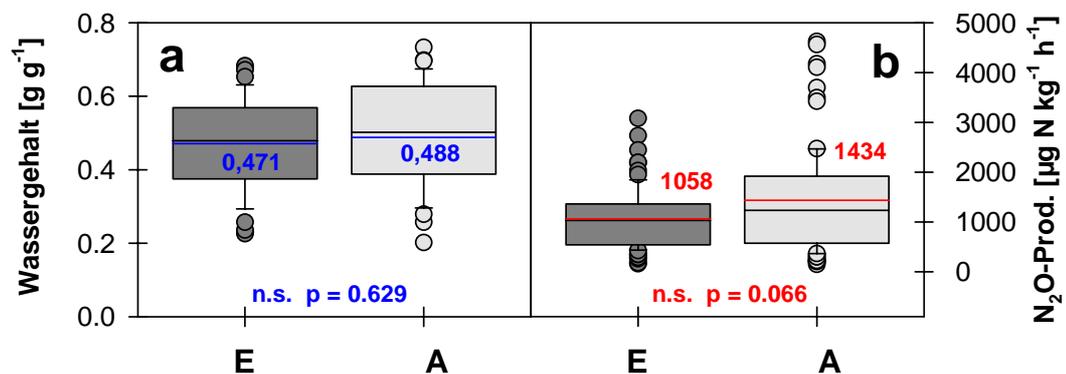


Abbildung 3.9-C: Mittlerer gravimetrischer Wassergehalt (**a**) und DEA- N_2O -Produktion (**b**) aller E- und A-Untersuchungen im in Abb. 3.9-A dargestellten Zeitraum. Zahlen in bzw. über den Boxen und Linien in gleicher Farbe: Mittelwerte; darunter: Ergebnis des t-Tests.

Im Gegensatz zu der kaum vorhandenen Korrelation der einzelnen DEA-Messungen mit der Bodenfeuchte des jeweiligen Rings bestand eine relativ gute Korrelation der über alle Meßtage gemittelten DEA-Werte der sechs CO_2 -Ringe mit der gravimetrischen Bodenfeuchte (Abb. 3.9-D, **a**). Darstellung **a** legt die Vermutung nahe, daß sich auf einer Fläche mittel- bis langfristig Denitrifizierer-Populationen einstellen, die dem

mittleren Bodenfeuchte-Level entspricht. Diese scheinen aber in ihrer Reaktion auf sich kurzfristig ändernde Umweltparameter nicht primär (oder zumindest nicht linear) von der Bodenfeuchte abhängig zu sein (Abb. 3.9-B). Da aber diese Beziehung – mittlere DEA-Werte versus mittlerer gravimetrischer Wassergehalt – so ausgeprägt linear ist (ein Polynom 2. oder 3. Grades erbrachte keine wesentlich bessere Anpassung als $R^2 = 0,86$), können die Mittelwerte des Wassergehalts und der DEA (Abb. 3.9-C) miteinander verglichen werden. Wären dabei die DEA-Werte signifikant verschieden und die Wassergehalte nicht, dürfte man aufgrund dieser linearen Beziehung einen CO_2 -Effekt annehmen.

Die TDR-Sonden-Messungen über mehrere Jahre sollten die langfristigen Feuchtigkeitsverhältnisse in den Ringen genauer widerspiegeln als die punktuell und ungleichmäßig über das Jahr verteilt gemessenen gravimetrischen Feuchtwerte. Daher wurden die pro Ring gemittelten DEA-Werte gegen die langfristige volumetrische Bodenfeuchte (Daten 1997 bis 2000) aufgetragen (Abb. 3.9-D, **b**). Durch diese Art der Betrachtung ergibt sich ein neues (möglicherweise realistischeres) Bild: danach zeigten der langfristig trockenste und der feuchteste Ring, A1 und A2, das niedrigste und das höchste DEA-Niveau.

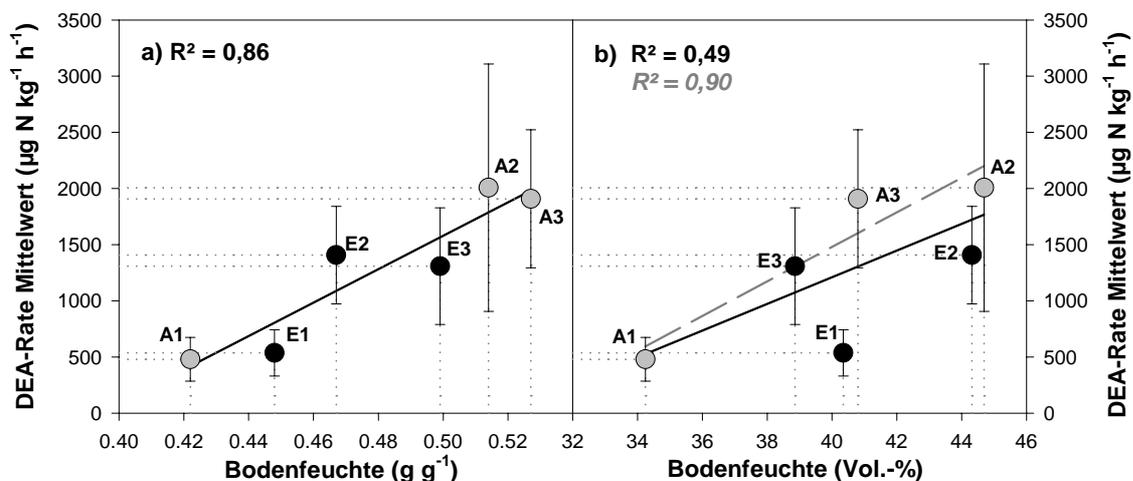


Abbildung 3.9-D: Mittlere DEA-Rate jedes einzelnen Rings \pm Standardabweichung ($n=10$ Messungen) in Abhängigkeit von **a**) der gravimetrischen Bodenfeuchte (Bestimmung aus der DEA-Mischprobe) und **b**) dem mittleren volumetrischen Wassergehalt der einzelnen Ringflächen (Messungen 1997 – 2000). Schwarze durchgezogene Linien: lineare Regression aller sechs Ringe; graue gestrichelte Linie: lineare Regression der Kontrollringe (R^2 kursiv).

Beide Darstellungen (**a** und **b** in Abb. 3.9-D) zeigen einen gemeinsamen Unterschied zwischen der A- und der E-Behandlung: Die E-DEA-Werte liegen im Schnitt eher unter, die A-Werte eher über der gemeinsam gebildeten Regressionslinie. In (**a**) sind dies die Ringe E1 und E3, bei der Betrachtung der langfristigen Feuchteverhältnisse (**b**) sind es die Ringe E1 und E2. Legt man eine Regressionsgerade durch die A-Werte, liegt keiner der E-Ringe mehr über dieser Linie.

Insgesamt betrachtet, ist ein langfristiger und auf allen Ringpaaren gleichgerichtet verlaufender, signifikanter CO_2 -Trend nicht nachweisbar. Die geschilderten Befunde deuten jedoch auf eine Verringerung des Denitrifikations-Enzym-Levelns unter erhöhtem CO_2 hin.

3.10 Netto-Nitrifikationsraten in den FACE-Ringen

Zunächst eine kurze Anmerkung zu den Netto-Nitrifikationsmessungen: Pro Ring wurde eine Mischprobe auf sechs Inkubationsflaschen aufgeteilt, von denen drei sofort (Frischprobe, t_0) und drei nach 3 Tagen Inkubation im Sandbeet (Bebrütungsproben, t_1) auf ihren Nitratgehalt hin analysiert wurden (vgl. 2.11). Da es sich um 6 verschiedene Einwaagen handelte, konnte pro Ring nur ein Mittelwert des t_0 - und ein Mittelwert des t_1 -Zeitpunkts gebildet werden, aus welchen dann durch Subtraktion und Bezug auf den Inkubationszeitraum die gebildete Nitratmenge berechnet wurde. Daher können in Abb. 3.10-B für die einzelnen Ringe keine Standardabweichungen angegeben werden. Um aber einen Eindruck von der Streuung der Einzelmessungen zu vermitteln, wurden für den 01.07.1998 die Meßwerte der Zeitpunkte t_0 und t_1 mit Standardabweichungen beispielhaft dargestellt (Abb. 3.10-A).

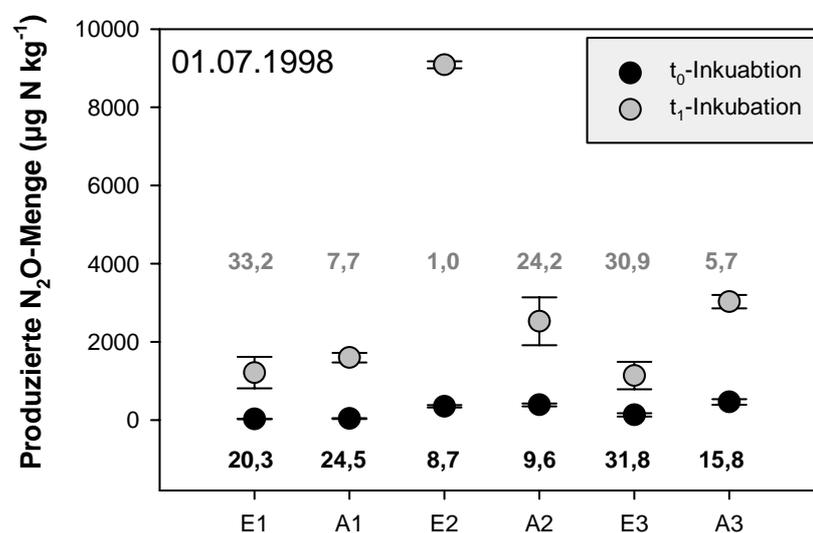


Abbildung 3.10-A: Standardabweichungen der einzelnen Inkubationen beispielhaft an einem Untersuchungstag mit hohen Werten (01.07.1998): 3 Proben pro Ring und Inkubationszeitpunkt. t_0 = Frischprobe; t_1 = Bebrütungsprobe. Schwarze bzw. graue Werte: Standardabweichung in Prozent des Mittelwerts. Mittlere Standardabweichung aller Frischproben 18,4 %; Bebrütungsproben 17,1 %.

Über alle Meßtage und Ringe gemittelt, betrug die t_0 -Standardabweichung 19,2 % und die t_1 -Standardabweichung 24,0 % (bezogen auf den jeweiligen Ringmittelwert wie in Abb. 3.10-A dargestellt, d.h. gemittelt aus 8 Meßtagen x 6 Ringen).

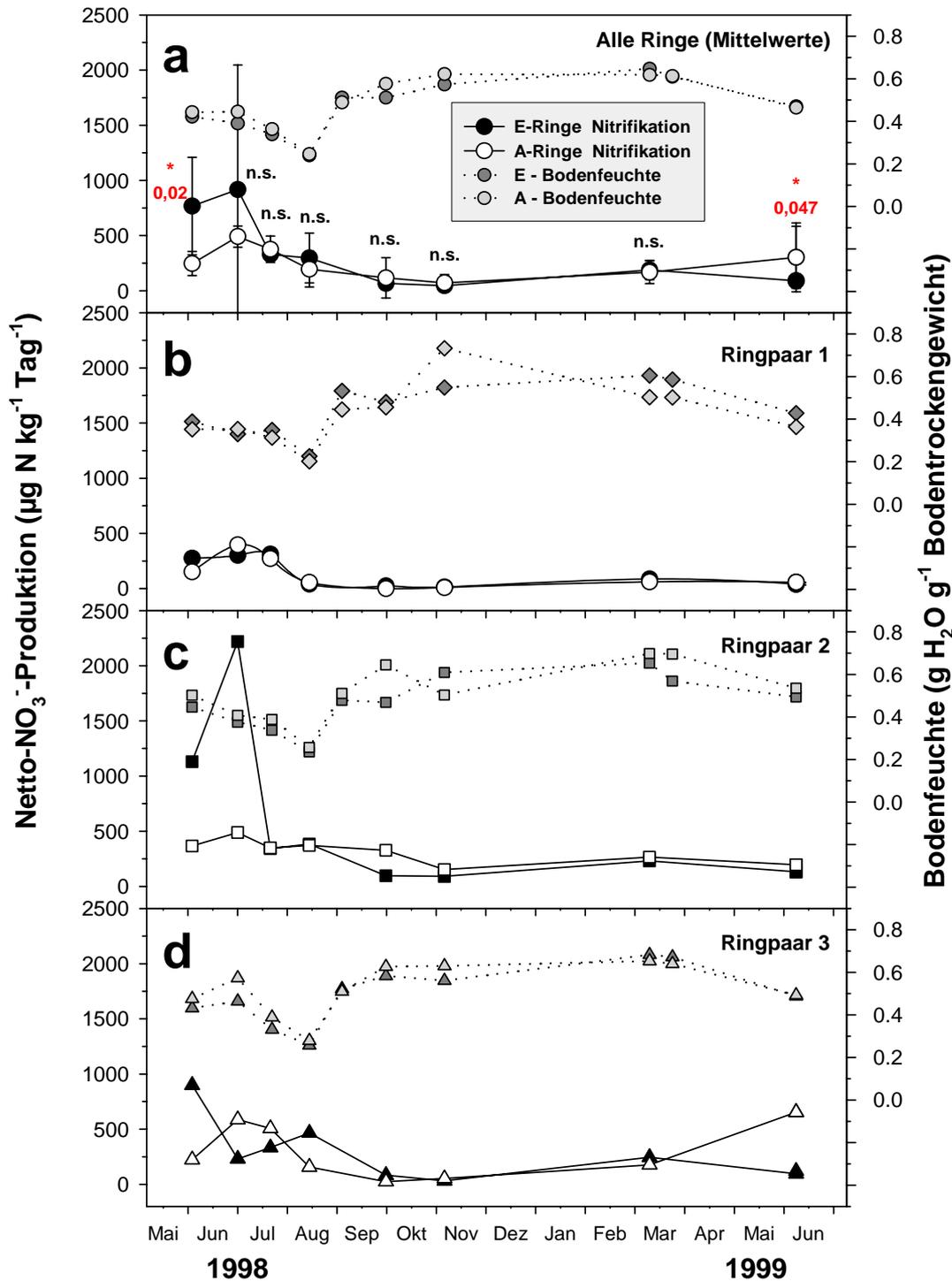


Abbildung 3.10-B: Netto-Nitrifikationsraten im Zeitraum Juni 1998 bis Juni 1999, gemittelt über die E- und A-Behandlung (a) und in den einzelnen Ringpaaren (b bis d), jeweils linke Ordinate. Graue Kurven darüber: gravimetrischer Wassergehalt (entspricht den Kurven in Abb. 3.9-A, da DEA und Nit. aus den gleichen Mischproben bestimmt wurden). Stabw. in a: n=3 (d.h. die Ring-Werte aus b bis d).

Während die Netto-Nitrifikationsraten der Kontrollringe kurz nach Beginn der CO₂-Anreicherung maximal um die 700 µg NO₃-N kg⁻¹ Tag⁻¹ betragen (A3), waren sie auf allen E-Flächen deutlich höher als auf der jeweiligen A-Partner-Fläche – in den

feuchteren Ringen E2 und E3 sogar mehr als doppelt so hoch. Insgesamt war der Unterschied ($E > A$) zu Beginn signifikant (Abb. 3.10-B, **a**). Bei der zweiten Netto-Nitrifikationsmessung Anfang Juli 1998 waren die E1- und E3-Rate bereits unter die jeweilige A-Rate gesunken. Der Ring E2 hingegen wies zu diesem Zeitpunkt den höchsten je gemessenen Wert auf, wobei die Standardabweichung der einzelnen E2-Proben sehr gering war (Abb. 3.10-A). Im Juni 1999 waren dagegen die A-Nitrifikationsraten signifikant höher als die E-Raten.

Ein weiterer Beleg für die Vermutung, es zeige sich ein CO_2 -Anfangs-Effekt während der ersten beiden Messungen, kann Abb. 3.10-C entnommen werden: Die mittleren Nitrifikationsraten der einzelnen Ringflächen zeigten (überraschenderweise) eine sehr gute positive Korrelation mit der herrschenden Bodenfeuchte (Abb. 3.10-C, **b**); dies galt aber nur, wenn die ersten beiden Messungen nicht mit in den Ring-Mittelwert einbezogen wurden (Abb. 3.10-C, **a**). Der "Anfangseffekt" der CO_2 -Anreicherung auf die Netto-Nitrifikationsraten schien um so stärker zu sein, je feuchter die E-Fläche im langfristigen Mittel war. Wie aus Abb. 3.10-B hervorgeht, zeigte der feuchteste der E-Ringe (vgl. Abb. 3.1-A), E2, die stärkste Erhöhung, danach der mittelfeuchte Ring E3 und E1 die geringste Erhöhung. Die Datengrundlage ist jedoch nicht groß genug, um diese Vermutung eindeutig belegen zu können.

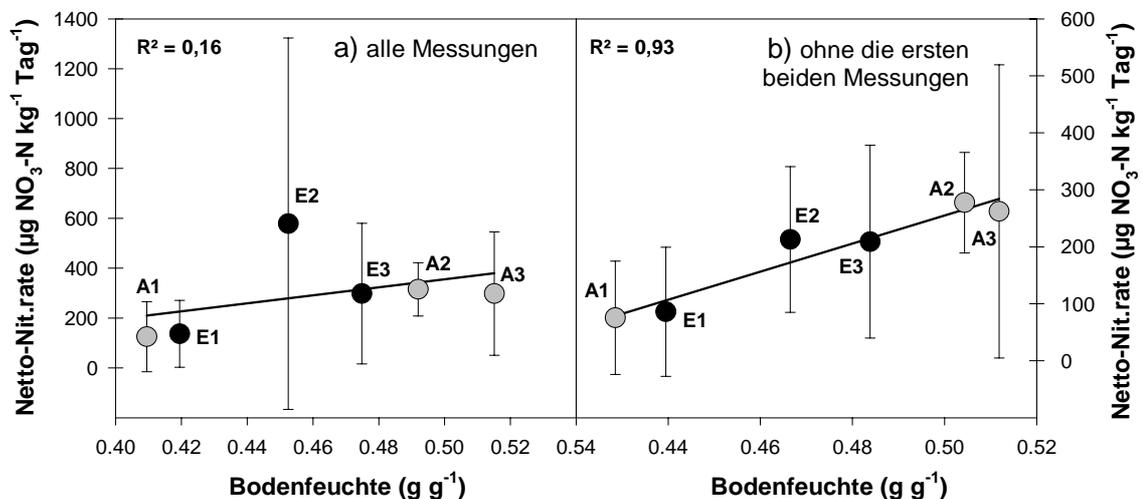


Abbildung 3.10-C: Pro Ringfläche gemittelte Netto-Nitrifikationsraten, aufgetragen gegen die zum Untersuchungszeitpunkt herrschende Bodenfeuchte (gravimetrisch; direkt aus der Probe bestimmt). **a**) alle 8 Meßzeitpunkte; **b**) ohne die ersten beiden Meßzeitpunkte (d.h. ohne den möglichen "Anfangseffekt" der CO_2 -Anreicherung). Linke obere Ecke: R^2 der jeweils dargestellten linearen Regression.

Insgesamt läßt sich festhalten, daß die Netto-Nitrifikationsraten anfänglich durch das erhöhte CO_2 signifikant erhöht waren, und daß am Ende der Meßreihe, nach einem Jahr der CO_2 -Anreicherung, die E-Nitrifikationsraten signifikant niedriger geworden waren.

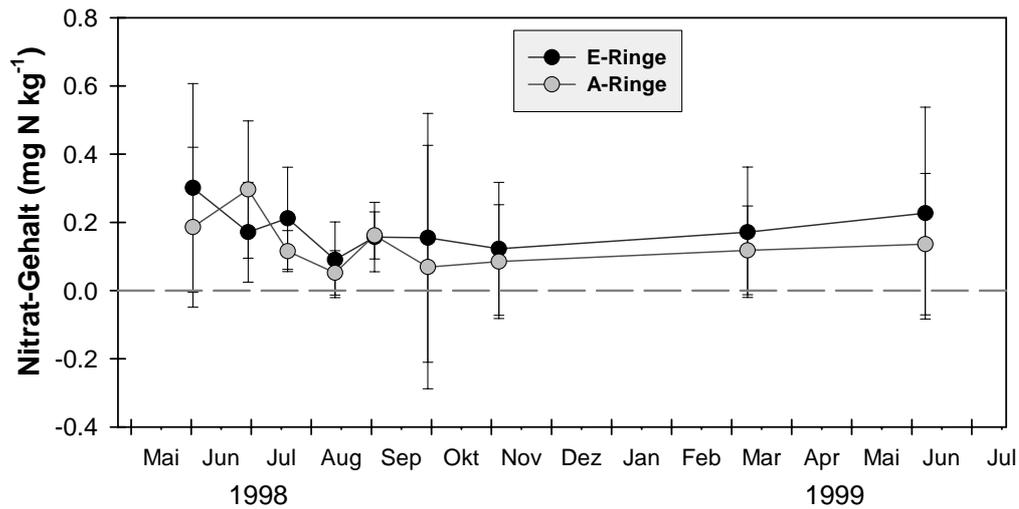


Abbildung 3.10-D: Nitratgehalte (t_0 -Proben) der E- und A-Ringe (gemittelt pro Meßzeitpunkt, n=9)

Die t_0 -Bodenproben bestätigen, was bereits die N_{\min} -Analysen erbrachten (Abb. 3.10-D): Der Nitratgehalt des Grünlandbodens war stets sehr gering (hier: unter 0,5 ppm), und zwischen den CO_2 -Behandlungen bestand zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied. Während am Ende der Untersuchungen die Netto-Nitrifikationsrate der E-Flächen signifikant erniedrigt war, waren die Nitrat-Gehalte der E-Flächen sogar geringfügig höher. Somit besitzt die "statische" Poolgröße 'Nitratgehalt' im Lindener Grünland keine große Aussagekraft bezüglich der Nitratverfügbarkeit (durch Nachlieferung aus den Nitrifikationsprozessen).