

Boden- und vegetationskundliche Untersuchungen
zur
Charakterisierung der Ausgasungs- und Vegetationsdynamik
zweier trockener Mofetten
im west-tschechischen Plesnátal

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
Dr. rer. nat.

der Fakultät für
Biologie
an der

Universität Duisburg-Essen

vorgelegt von
Annika Thomalla

aus Essen
April 2015

Die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Experimente wurden am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie der Universität Duisburg-Essen durchgeführt.

1. Gutachter: Professor Dr. Hardy Pfanz

2. Gutachter: Professor Dr. Dominik Vodnik, Universität Ljubljana, Slowenien

Vorsitzender des Prüfungsausschusses: Professor Dr. Ulrich Schreiber

Tag der mündlichen Prüfung: 18.6.2015



DuEPublico
Duisburg-Essen Publications online



UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN
Offen im Denken



ub | universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/38913
URN: urn:nbn:de:hbz:465-20221017-142754-7

Alle Rechte vorbehalten.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	HISTORIE UND ORTE DER MOFETTENFORSCHUNG	1
1.2	KENNTNISSTAND UND THEORETISCHE HINTERGRÜNDE DER UNTERSUCHUNGEN	3
1.2.1	Was sind Mofetten?- Abgrenzung des Mofettenbegriffes von anderen rezenten- und postvulkanischen Erscheinungen	3
1.2.2	Vergleich von Mofettenböden und nicht CO ₂ -führenden Böden	5
1.2.3	Die bodennahe Luftschicht über Mofetten	11
1.2.4	Artenzusammensetzung von Pflanzenbeständen und Pflanzenwachstum in Mofetten	12
1.3	ZIELSETZUNGEN DER ARBEIT	16
2	MATERIAL UND METHODEN	17
2.1	DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET IM WEST-TSCHECHISCHEN PLESNÁTAL	17
2.1.1	Topographische und klimatische Beschreibung des Untersuchungsgebietes	17
2.1.2	Geologie	18
2.1.3	Böden des Untersuchungsgebietes	25
2.1.4	Vegetation	29
2.2	DIE UNTERSUCHUNGSFLÄCHEN	31
2.2.1	Die Birnenmofette	33
2.2.2	Die Moosmofette	34
2.2.3	Das Espenwäldchen	34
2.3	FREILANDMESSUNGEN	35
2.3.1	Messung der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen im Bodengas	35
2.3.2	Vegetationsaufnahmen	36
2.3.3	Verfahren der Bodenprobenentnahme	39
2.3.4	Gasfluss-Messungen	40
2.3.5	Untersuchung der Penetrationswiderstände der Böden	41
2.3.6	Entnahme der Baum-Bohrkerne	42
2.3.7	Messung der Strahlungsintensität	42
2.3.8	Messung der Stammdurchmesser	42
2.3.9	Messung der Baumhöhen	43
2.3.10	Aufnahme der Lentizellen	43
2.4	LABORUNTERSUCHUNGEN	43
2.4.1	Bestimmung des Trockengewichtes der Bodenproben	44
2.4.2	Messung des pH-Wertes und der elektronischen Leitfähigkeit der Böden	44
2.4.3	Untersuchung des organischen Anteils an den festen Bodenbestandteilen	45

2.4.4	Fractometrische und dendrochronologische Untersuchungen	45
2.4.5	Bestimmung der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte	48
2.5	DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK	48
2.5.1	Datenverarbeitung	48
2.5.1.1	Anfertigen von Abbildungen der flächig gemessenen Bodenparameter	48
2.5.1.2	Erstellung der berechneten Erdoberflächen-Abbildungen der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen	52
2.5.2	Statistik	53
2.5.2.1	Statistische Auswertungen mit Excel 2007	53
2.5.2.2	Statistische Auswertungen mit CANOCO 4.5	53
3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	58
3.1	DIE BIRNENMOFETTE	59
3.1.1	Die Pedosphäre in der Birnenmofette	60
3.1.1.1	Bodengase	60
3.1.1.2	Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen an der Erdoberfläche	67
3.1.1.3	Gasfluss-Messungen	68
3.1.1.4	Bodenwasser	73
3.1.1.5	Anteile der organischen Bodenbestandteile an der Festphase	78
3.1.1.6	pH-Werte des Bodens	83
3.1.1.7	Stickstoffgehalte	86
3.1.1.8	Penetrationswiderstände des Bodens	89
3.1.2	Temporäre Veränderungen des Kohlendioxids	93
3.1.2.1	Jährliche Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen	93
3.1.2.2	Vierteljährliche Veränderungen der CO ₂ -Konzentrationen	115
3.1.3	Die Vegetation in der Birnenmofette	135
3.1.3.1	Artenvielfalt und Stärke des pflanzlichen Bewuchses	135
3.1.3.2	Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Zeigergruppe, sowie der Gruppe der mofettovagen Arten in der Birnenmofette	138
3.1.3.3	Das ökologische Verhalten der positiven Mofettenzeiger	146
3.1.3.4	Das ökologische Verhalten negativer Mofettenzeiger	156
3.1.3.5	Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettovager Arten	162
3.1.4	Auswertung der Vegetation mit dem Verfahren der kanonischen Korrespondenzanalyse	169
3.1.4.1	Auftrennung der dikotylen und monokotylen Arten entlang der Gradienten verschiedener Bodeneigenschaften	169
3.1.4.2	Dispersion unterschiedlich tief wurzelnder Arten entlang der Bodenparameter- Gradienten	178
3.1.5	Jährliche Veränderungen im Pflanzenbestand der Birnenmofette	180

3.2 DIE MOOSMOFETTE	188
3.2.1 Die Pedosphäre in der Moosmofette	188
3.2.1.1 Bodengasuntersuchungen	189
3.2.1.2 Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen an der Erdoberfläche	194
3.2.1.3 Gasfluss	195
3.2.1.4 Bodenwasser	197
3.2.1.5 Organische Mengenanteile an der Festphase	198
3.2.1.6 pH-Werte	201
3.2.1.7 Bodendichte	202
3.2.2 Zeitliche Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen in der Moosmofette	204
3.2.2.1 Jährliche Veränderungen der CO ₂ -Ausgasungen	205
3.2.2.2 Jahreszeitliche Veränderungen der Kohlendioxidexhalationen	218
3.2.3 Die vegetationskundlichen Untersuchungen in der Moosmofette	236
3.2.3.1 Artenvielfalt und Gesamtdeckungsgrad in der Moosmofette	236
3.2.3.2 Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Mofettenzeiger sowie der mofettovagen Arten in der Moosmofette	238
3.2.3.3 Das ökologische Verhalten ausgesuchter positiver Mofettenzeiger	242
3.2.3.4 Das ökologische Verhalten negativer Mofettenzeiger	245
3.2.3.5 Das ökologische Verhalten ausgesuchter mofettovager Arten	246
3.2.4 Bewertung der Moosmofetten-Vegetation mithilfe kanonischer Korrespondenzanalysen	247
3.2.5. Jährliche Veränderungen im Pflanzenbestand der Moosmofette	249
3.3 UNTERSUCHUNGEN IN EINEM ESPENWÄLDCHEN	255
3.3.1 Abiotische Beschreibung der Fläche	256
3.3.1.1 Bodengasmessungen	256
3.3.1.2 pH-Werte, Bodenwasser und organische Mengenanteile an der Festphase	258
3.3.1.3 PAR-Messungen	260
3.3.2 Floristische Beschreibung der Kraut- und Baumschicht der Fläche	261
3.3.2.1 Artenvielfalt und Gesamtdeckungsgrad	261
3.3.2.2 Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Mofettenzeiger sowie der mofettovagen Arten der Krautschicht	263
3.3.2.3 Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettophiler Arten der Krautschicht	264
3.3.2.4 Das ökologische Verhalten ausgesuchter mofettophober Arten der Krautschicht	266
3.3.2.5 Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettovager Arten der Krautschicht	267
3.3.2.6 Charakterisierungen der Baumschicht	268

3.3.3 Ökophysiologische, physikalische und dendrochronologische Untersuchungen an <i>Populus tremula</i> im CO ₂ -Gradienten.....	271
3.3.3.1 Baumhöhen und Längenwachstum	272
3.3.3.2 Stammdurchmesser und Ringzuwachs.....	276
3.3.3.3 Lentizellen.....	278
3.3.3.4 Physikalische Holzuntersuchungen (Fractometrie).....	281
4 ZUSAMMENFASSUNG	283
5 AUSBLICK.....	287
6 LITERATUR.....	290
7 ANHANG	303
7.1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	303
7.2 TABELLENVERZEICHNIS	311
7.3 ABKÜRZUNGSVERZEICHNISSE	314
7.3.1 Abkürzungsverzeichnis I	314
7.3.2 Abkürzungsverzeichnis II	316
DANKSAGUNG.....	318
LEBENS LAUF.....	319
ERKLÄRUNGEN.....	321

1 Einleitung

1.1 Historie und Orte der Mofettenforschung

Bereits seit mehr als 200 Jahren finden Mofetten oder deren Ausgasungen in der Literatur unterschiedlicher Gattungen Erwähnung. Auch die Eigenschaften des Gases sowie sein Nutzen werden schon lange in verschiedenen Wissenschaften untersucht. In vielen Bereichen menschlichen Lebens werden die gewonnenen Erkenntnisse angewendet, sei es in der Medizin oder in der Industrie (Pfanz 2008a).

Unter Berücksichtigung der aktuellen Einschätzungen über die Entwicklung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen (aus Internetquelle 6), wurden Studien über die Auswirkungen des Gases auf die verschiedenen Ökosysteme durchgeführt. Insbesondere lag das Interesse auf Untersuchungen an Pflanzen. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich eine Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf die Photosynthese der Pflanzen auswirkt. Jedoch basierten diese Untersuchungen auf Kurzzeiteexpositionen von Kohlendioxid auf Pflanzen. Folglich konnten nur Kurzeffekte unter Laborbedingungen dokumentiert werden (Raschi et al. 1997).

In den 1990er Jahren stellten mehrere Wissenschaftler fest, dass natürliche CO₂-Quellen, Langzeituntersuchungen an Pflanzen die unter erhöhten CO₂-Gehalten in der Atmosphäre wachsen, ermöglichen (Miglietta et al. 1993). Es folgten mehrere Forschungsprojekte die sich vor allem in Italien konzentrierten, aber auch in Nordamerika und Afrika stattfanden (Farrar et al. 1995; van Gardingen und Grace 1997; Raschi et al. 1997; Gerlach et al. 1998). Die Untersuchungen der beginnenden Mofettenforschung bezogen sich auf mehrere Forschungsfelder. 1) Aufgrund der Auswirkungen des CO₂ auf die Biosphäre sollte der Kenntnisstand über den Transport des Kohlendioxids im Untergrund bis in die Pedosphäre und ins Grundwasser erweitert werden. Dazu waren Untersuchungen notwendig, die eine Übersicht über die geologischen Gegebenheiten ermöglichten. Es stellte sich heraus, dass der Gastransport von vulkanischer Aktivität und hydrothermaler Zirkulation abhängig ist. In Regionen mit vulkanischer Aktivität oder tektonischen Störungen äußert sich die verstärkte CO₂-Freisetzung in hohen CO₂-Flüssen durch Gaskanäle. An solchen Stellen sind nicht nur Langzeituntersuchungen an Pflanzen möglich, sondern auch Überprüfungen von Dynamiken der Gasflüsse (Etiopie 1997, 1999; Etiopie und Lombardi 1997). 2) Vor dem Hintergrund historischer CO₂-Katastrophen, die viele Menschenleben forderten, wurden Untersuchungen an verschiedenen Seen durchgeführt. In diesen Seen sind hohe Mengen Kohlendioxid gelöst,

wodurch es theoretisch zu limnischen Eruptionen kommen könnte (Martini 1997; Mousseau et al. 1997). 3) Ein sehr großer Schwerpunkt der Langzeitstudien an natürlichen CO₂-Standorten liegt bei den Auswirkungen erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre auf Pflanzen. In den Untersuchungen wurde verschiedenen Hypothesen nachgegangen. Auf Island und in Spanien wurde mithilfe von Isotopenmessungen festgestellt, dass Pflanzen an CO₂-Standorten unter CO₂-Konzentrationen gewachsen sind, wie sie für die Zukunft geschätzt wurden (Cook et al. 1997; Pinol und Terradas 1997). In Zentral-West-Italien, Florida und Ägypten wurden zahlreiche CO₂-Mineralquellen für die Erfassung der Auswirkungen des Kohlendioxids genutzt, und zwar im Hinblick auf anatomisch-morphologische Merkmale, den Gaswechsel und die Photosynthese unterschiedlicher Pflanzen. Zum Beispiel an *Boehmeria cylindrica* (Woodward und Beerling 1997), *Scirpus lacustris* (Miglietta et al. 1993; Bettarini et al. 1997), *Plantago major* und *Agrostis canina* (Fordham et al. 1997; Selvi 1994, 1997), oder *Triticum aestivum* und *Glycine max* (Badiani et al. 1997). Neben krautigen Pflanzen und Gräsern wurden auch Gehölze wie *Quercus pubescens* (Bettarini et al. 1997) oder *Quercus ilex* (Paoletti et al. 1997) untersucht. Selvi (1997) untersuchte azidophile Grasgemeinschaften, die überwiegend aus *Agrostis canina* ssp. *monteluccii* bestanden. 4) Ineson und Cotrufo (1997) führten Bodenuntersuchungen unter der Fragestellung durch, ob der Abbau organischen Materials durch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen beeinflusst wird.

Nach der Jahrtausendwende wurde die Erforschung von Mofetten als natürliche CO₂-Standorte ausgeweitet. Neben den Messungen in italienischen Mofetten, wurden Untersuchungen an Mofettenstandorten in Nord-Ost-Slowenien, West-Tschechien und Deutschland durchgeführt. Der Fokus dieser Forschungsprojekte lag auf anatomisch-morphologischen und physiologischen Messungen an der Mofettenvegetation (Vodnik et al. 2002, 2006, 2007, 2009 und 2013; Pfanz et al. 2004; Maček et al. 2005) sowie auf der Charakterisierung der spezifischen Vegetation terrestrischer Mofetten (Saßmannshausen 2010). Zusätzlich wurden Messungen an Pilzen und Mikrobakterien in Mofettenböden durchgeführt (Maček et al. 2009, 2012).

In West-Tschechien wird aufgrund der geologischen Bedingungen verstärkt die Dynamik von CO₂-Ausgasungen untersucht (Weinlich et al. 2006, 2013; Koch et al. 2008; Heinicke et al. 2009; Bräuer et al. 2011), ebenso die Auswirkungen des aufsteigenden Kohlendioxids auf den Untergrund und auf die Bodeneigenschaften (Blume und Felix-Henningsen 2009; Greiß 2008; Heinicke et al. 2009; Rennert et al. 2011; Weinlich 2014; Rennert und Pfanz 2015, eingereicht).

Seit dem Jahr 2008 wird das Vorkommen und die Zusammensetzung verschiedener Bodenorganismen (Collembola, Nematoda) in den Mofetten des west-tschechischen Plesnátales untersucht (Schulz und Potapov 2010; Hohberg et al. 2015, eingereicht).

1.2 Kenntnisstand und theoretische Hintergründe der Untersuchungen

1.2.1 Was sind Mofetten?- Abgrenzung des Mofettenbegriffes von anderen rezenten- und postvulkanischen Erscheinungen

Das Wort Mofette leitet sich von dem italienischen Wort *mofeta* ab, das wiederum von dem lateinischen Wort *mephitis* abstammt (Pfanz 2008a). Mit dem Wort *mephitis* werden stinkende Ausdünstungen der Erde beschrieben. In der Göttin Mephitis wurde diese Naturerscheinung personifiziert (Köster 2003).

Mofetten sind lokal begrenzte Standorte geogener CO₂-Exhalationen. Das Kohlendioxid stammt aus dem Erdmantel und wird durch Gesteinsrisse und Spalten in Richtung Erdoberfläche transportiert. Der Gastransport erfolgt dabei auf dem Weg des geringsten Widerstandes, sowie nach einem Konzentrationsgradienten. Gelangt es in die Pedosphäre, verteilt es sich im Porenraum und wird schließlich als kaltes, trockenes Gas in die Atmosphäre freigesetzt. Durch diese Form der Kohlendioxidausgasung ist eine Mofette nicht direkt zu erkennen, höchstens an Veränderungen der Vegetation. Am besten eignen sich für die Lokalisierung von solch trockenen Mofetten entsprechende Gasmessgeräte, mit denen dann die Konzentrationen sowohl in der Luft, als auch im Boden ermittelt werden können. In den Ausgasungsbereichen können die Kohlendioxidkonzentrationen in den obersten Bodenschichten 100% erreichen (Pfanz et al. 2004; Pfanz 2008a). In nicht-gasenden Böden werden CO₂-Konzentrationen von 2% selten überschritten (Mückenhausen 1993). Die CO₂-Anreicherung hat eine Sauerstoffarmut in gasenden Böden zur Folge (Kap. 1.2.2). Es existieren jedoch auch Mofetten die temporär durch Regen oder Grundwasseranhebungen, mit Wasser gefüllt sind und sich ebenso unter Bächen, Seen, oder ähnlichem befinden. In diesen Fällen tritt das aufsteigende Kohlendioxid durch ein wässriges Diffusionsmedium in die Atmosphäre ein, was in Form von Blasenbildung sehr gut zu erkennen und teilweise auch zu hören ist. Ein weiterer Hinweis auf Mofettenstandorte können Ansammlungen toter Tiere sein. Während der Beutesuche besteht für Tiere die Gefahr in Ausgasungsbereiche vorzudringen, in denen die oberflächennahen CO₂-Konzentrationen sehr hoch sind. Ab 5% Kohlendioxid können erste Irritationen auftreten. Ab 30% erhöhen sich die Herzfrequenz und die Atmung, was meistens zum Tod der Tiere führt. Außerdem deuten pfeifende Geräusche

auf gasende Stellen hin. An diesen Stellen steigt pro Zeit so viel Kohlendioxid auf, dass der Gasfluss sehr hoch und dadurch hörbar ist. Das Gas wird in diesen Fällen meistens durch schlotartige Gaskanäle transportiert (Pfanzen et al. 2004; Pfanz 2008a).

Die Ausgasungen sind von vielen anderen Umweltvariablen abhängig. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind das Wetter und die geologischen Bedingungen der Umgebung, sowie die Beschaffenheit des Bodens. Die verschiedenen Wetterfaktoren, wie Luftdruck, Temperatur oder Niederschlag, können den Gastransport und die CO₂-Gehalte beeinflussen (Pfanzen 2008a; Weinlich et al. 2013). Die geologischen Rahmenbedingungen, wie sie beispielsweise in West-Tschechien vorzufinden sind, können auf die Kohlendioxidkonzentrationen, die Gasflüsse und die Verteilung der Ausgasungen innerhalb einer Fläche einwirken (Faber et al. 2009; Weinlich et al. 2013). Die Bodeneigenschaften, wie zum Beispiel die Bodendichte, das Bodengefüge oder der Porenraum können zudem die Verteilung der gasenden Stellen bestimmen, ebenso Bodenhindernisse, wie Steine oder Wurzeln (Pfanzen 2008a). In der Toskana (Zentral-Italien) scheinen Erdbebenaktivitäten und die Beschaffenheit des tiefgründigen Gesteins die CO₂-Ausgasungen in dem Maße zu beeinflussen, dass sie über mehrere Jahre um einige Meter „wandern“ (Heinicke et al. 2006).

Das aufsteigende Kohlendioxid ist jedoch ebenfalls eine Wirkungsgröße auf verschiedene Umweltvariablen. Während des Gastransportes kommt es zu Reaktionen zwischen dem CO₂ und den Diffusionsmedien, wie zum Beispiel dem Gestein oder dem Boden. Auf diese Weise können durch Gesteinsformationen im Untergrund die geologischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden, ebenso verschiedene Bodeneigenschaften, beispielsweise die Bodenazidität (Heinicke et al. 2009; Rennert et al. 2011; Weinlich 2014). Zudem kann das ausströmende Kohlendioxid das Mikroklima (die bodennahe Luftschicht) verändern. In Abhängigkeit von der Wassermenge, die das aufsteigende Gas an die Atmosphäre transportiert, variiert die Luftfeuchte um die Ausgasungsstellen und dadurch auch die Temperatur. Durch die Eigenschaft des Kohlendioxids, infrarote Strahlung zu absorbieren, kann sich die Luft über Mofetten erwärmen. Ein weiteres Phänomen im Zusammenhang des Kohlendioxids mit den Wetterfaktoren ist die Bildung von Gas-Seen. Befindet sich eine gasende Stelle in windgeschützten Bereichen, zum Beispiel in einer Senke oder Doline, kann sich dort ein Gas-See bilden. In einer Tal-Mofette (Il Bossoleto) in Italien kann dies beobachtet werden. Die Gasflüsse sind dort so hoch, dass sich das Tal gegen Abend mit Kohlendioxid auffüllt (Kies et al. 2015). Die Konzentrationen erreichen in 3 m Höhe knapp 80%. Über Nacht bleibt der entstandene Gas-See erhalten. Aufgrund der Absorption infraroter Strahlung, erwärmt sich der Gas-See am Morgen auf etwa 50 °C. Infolgedessen verdunstet die

Feuchtigkeit am Boden sowie im Gas-See und steigt nach oben. An der Grenze zwischen dem aufgeheizten Gas-See und der kühleren Umgebungsluft kommt es zur Kondensation des aufsteigenden Wasserdampfes. Dadurch bildet sich eine weiße Schleierwolke, die auf dem Gas-See liegt. Mit zunehmender Erwärmung des Gas-Sees löst sich die Schleierwolke langsam auf (Pfanzen 2008a).

Mofetten sind überwiegend in Gebieten mit gegenwärtiger- oder postvulkanischer Aktivität zu finden, oder an Stellen mit Veränderungsprozessen in Karbonatgesteinen des Untergrundes. Im Grunde gibt es sie überall dort, wo tiefreichende tektonische Störungen, tektonische Plattengrenzen oder Vulkantätigkeiten lokalisiert sind (Nordamerika, Afrika, Deutschland, Tschechien, Slowenien, Italien, uvm.). Sie sind auf Agrarflächen oder Wiesen zu finden, in Sümpfen, in bergigen Gebieten oder auch in Dolinen (Pfanzen et al. 2004; Pfanzen 2008a).

Aufgrund der mofettentypischen Umweltbedingungen unterscheiden sich Mofetten von anderen vulkanischen Gas-Dampf-Exhalationen, wie sie beispielsweise auf Thermalquellen oder geothermisch aktiven Orten vorkommen: Fumarolen und Solfataren. Fumarolen sind Stellen ausströmender Gasfontänen. Durch verschieden große Öffnungen im Boden entweicht heißer Wasserdampf, der Temperaturen bis 320 °C erreichen kann (Strahler und Strahler 1999; Murawski und Meyer 2004; Pott und Hüppe 2007).

Solfataren gehören zu den Fumarolen, emittieren aber Schwefelwasserstoff. Die Temperaturen sind niedriger als in Fumarolen; sie erreichen Werte zwischen 100 und 250 °C. In Verbindung mit Sauerstoff an der Erdoberfläche wird Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel oxidiert, der sich dann auf dem Boden absetzt. Häufig lagern sich zusätzlich Eisensulfide ab. Aufgrund der Ablagerung dieser Stoffe sind Solfataren optisch auffallend. Durch den fauligen Eiergeruch des Schwefelwasserstoffes sind Solfataren auch olfaktorisch sehr gut zu finden (Murawski und Meyer 2004; Pott und Hüppe 2007).

1.2.2 Vergleich von Mofettenböden und nicht CO₂-führenden Böden

Die Prozesswirkungen und Eigenschaften des Drei-Phasen-Systems Boden (Gisi et al. 1997) werden durch die Kohlendioxidexhalationen in Mofetten beeinflusst (Blume und Felix-Henningsen 2009; Rennert et al. 2011).

Als Übergangsbereich zwischen der Lithosphäre und der Atmosphäre sind Böden das Ergebnis von Gesteinsumwandlungen in Verbindung mit der Atmos- und Biosphäre. Die Umgestaltung des Ausgangsmaterials der Erdkruste erfolgt unter verschiedenen Verwitterungsprozessen: der chemischen, physikalischen und biologischen Verwitterung.

Durch die physikalische Verwitterung wird das Gestein durch Strahlungs- und Temperatureinflüsse zerkleinert. Sie ist die Voraussetzung für die chemische Verwitterung von Böden. Hier erfolgt die Umformung der Ausgangsmaterialien aufgrund anorganischer und organischer Gase unter Einwirkung von Wasser. Derartige Veränderungen bewirken, dass Ionen aus den Mineralien und Gesteinen herausgelöst werden und in Lösung übergehen können (Scheffer und Schachtschabel 2010). Im Gegensatz zu Böden an nicht-gasenden Stellen, ist bei diesen Verwitterungsprozessen das aufsteigende CO₂ in Mofettenböden für die Bodenbildung entscheidend.

Unter der biologischen Verwitterung der Lithosphäre werden alle Lebenstätigkeiten sämtlicher Organismen verstanden, folglich die der Pflanzen, Menschen und Mikroorganismen, in und auf Gesteinen. Des Weiteren sind ebenfalls alle Verwitterungsvorgänge innerhalb des Bodens, physikalischer und chemischer Art, Teil der biologischen Verwitterung (Kuntze et al. 1994).

Unterschiede in den Bodentypen

Die Wechselwirkungen zwischen der Gas-, Flüssig- und Festphase von Böden finden in Bodenhorizonten statt (Gisi et al. 1997). Im Regelfall unterscheidet man einen streuähnlichen O-Horizont, der vor allem organische Substanzen enthält, von einem A-Horizont, in den entweder Stoffe eingelagert oder ausgetragen werden. In dem darunterliegenden mineralähnlichen B-Horizont findet hauptsächlich eine Stoffzufuhr statt. Danach folgt der C-Horizont, der sich aus dem Ausgangsgestein zusammensetzt (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Als Folge der Ausgasungen unterscheiden sich die Bodenhorizonte von Mofettenböden von denen an nicht-gasenden Orten. Mofettenböden bilden sich unter reduzierenden Bedingungen, da Kohlendioxid ein reduzierendes Gas ist. Der Bodentyp, der an solch gasenden Stellen zu finden ist, wird Reduktosol genannt (Blume und Felix-Henningsen 2009). Reduktosole ähneln in ihrem Aufbau den Gleyen, haben aber einen Y-Horizont, der von einem oder mehreren reduzierenden Gasen geprägt ist. Das Bodenprofil der Reduktosole ist Ah/Yo/Yr. Demnach folgt nach einem terrestrischen humusreichen Oberbodenhorizont (Ah) ein oxidierter (Yo). Dieser ist rot-braun oder gelb-rot gefärbt und enthält viele Eisenhydroxide. Unter dem Yo-Horizont befindet sich ein reduzierter (Yr), mit einer hellgrau bis schwarzen Färbung (AG Boden 1994; Blume und Felix-Henningsen 2009).

Auswirkungen der Kohlendioxid-Emissionen auf die Bodenluftzusammensetzung

Das Porensystem der Pedosphäre besteht idealerweise zu 50% aus Bodenpartikeln und zu 50% aus Porenraum. Unter dem Porenraum werden Hohlräume zwischen Bodenpartikeln, Kapillarräumen, alten Wurzelkanälen und Gangsystemen von Tieren verstanden (Smith und Smith 2009). Alle Porenräume sind entweder mit Luft oder Wasser gefüllt, so dass der Gashaushalt des Bodens in Wechselbeziehung mit dem Wasserhaushalt steht. Daraus folgt, dass alle wasserleeren Porenräume, die mit Luft gefüllt sind, den luftleitenden Raum des Bodens darstellen (Kuntze et al. 1994).

An nicht-gasenden Standorten setzt sich die Bodenluft aus Kohlendioxid, Sauerstoff, Methan, Distickstoffoxid, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Ammoniak zusammen (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Tab. 1: Zusammensetzung der Luft [%] in der Atmosphäre und im Boden, nach Mückenhausen (1993).

Stoff	Atmosphäre	Bodenluft
N ₂	79,20	79,00
O ₂	20,97	20,60
CO ₂	0,03	0,25

Die genannten Gase entstehen durch Lebensvorgänge verschiedener Organismen im Boden; ihre Konzentrationen im Boden weichen von denen der Atmosphäre ab. Die Abweichungen sind durch eine Kohlendioxidzunahme und Sauerstoffabnahme gekennzeichnet. Der Sauerstoffgehalt des Bodens ist immer geringer als der in der Atmosphäre, denn durch die Stoffwechselaktivitäten wird Sauerstoff verbraucht, der nur langsam wieder ersetzt wird. Folglich nimmt der Anteil an Sauerstoff mit steigender Stoffwechselaktivität ab und mit sinkender zu. Der Kohlendioxidanteil ist durch die Atmungsaktivitäten der Wurzeln und der Bodenlebewesen immer höher als in der Atmosphäre, „... *in Acker- oder Grünlandböden werden aber 2% selten übertroffen.*“ (Mückenhausen 1993). Und „... *wenn in der Bodenluft der CO₂-Gehalt auf über 5% ansteigt, wird das Pflanzenwachstum sichtbar beeinträchtigt,...*“ (Mückenhausen 1993). Im Gegensatz zum Sauerstoff steigt der Kohlendioxidgehalt mit zunehmender Bodentiefe. Der Kohlendioxidanteil ist von der Zufuhr organischen Materials und der Feuchtigkeit abhängig, weiterhin von der Temperatur und dem Luftdruck (Etiope 1999). Aufgrund dieser Faktoren ist auch die Menge an Kohlendioxid in der Pedosphäre von den Jahreszeiten abhängig. Bei der Einschätzung des CO₂-Gehaltes in der

Bodenluftzusammensetzung muss neben dem gasförmigen Anteil auch der Anteil des gelösten Gases berücksichtigt werden, der sich in Form der Kohlensäure im Wasser befindet. Die Quellen von Sauerstoff und Kohlendioxid sind unterschiedlicher Natur. Sauerstoff stammt aus der Atmosphäre und die Zufuhr vollzieht sich über die Bodenoberfläche. Ziel ist der O₂-verbrauchende Teil des Bodens, der nahe an der Erdoberfläche liegt. Wie weit der Sauerstoff dann noch in den Boden eindringt, hängt vom Partialdruckgefälle ab.

Das Kohlendioxid hingegen entsteht in einer Bodentiefe von 10 bis 50 cm und diffundiert gemäß des Konzentrationsgradienten zur Bodenoberfläche und weiter in die Atmosphäre.

Alle anderen Gase entstehen durch Ab- und Umbauprozesse von organischen Materialien durch Mikroorganismen (Scheffer und Schachtschabel 2010).

In Mofettenböden weicht die Herkunft des Kohlendioxids und die Zusammensetzung der Bodenluft von den Werten in Tab. 1 ab. An gasenden Stellen befindet sich nicht nur das biogen entstandene CO₂ in den Porenräumen, sondern auch das geogene. Die Anteile des Kohlendioxids an der Bodenluft sind dann stark erhöht, oft werden Werte von 100% erreicht. Mit steigenden CO₂-Konzentrationen sinken die Sauerstoffgehalte, da Kohlendioxid ein sauerstoffverdrängendes Gas ist (Blume 1997). Der CO₂-Partialdruck (Entstehung des Druckes bei ungehinderter Verteilung von Gasen) ist im Boden höher als der von Sauerstoff. Dadurch ist das Bestreben von Kohlendioxid beim Füllen der Porenräume höher als das von O₂ (Scheffer und Schachtschabel 2010). Diese Wechselwirkung zwischen den beiden Gasen kann als Antagonismus bezeichnet werden, also als eine beidseitige Hemmung (Hintermaier-Erhard und Zech 1997). In Mofettenböden herrschen folglich hypoxische bis anoxische Bedingungen.

Aufgrund der Verdrängung des Sauerstoffes in Mofettenböden wurde im Zusammenhang mit geogenen Kohlendioxidexhalationen der Begriff Bodenluft durch das Wort Bodengas ersetzt (Saßmannshausen 2010). Dies wurde auch für die vorliegende Arbeit übernommen.

Unterschiede im Gastransport

Die Gase im Boden sind sehr unterschiedlich verteilt, weshalb sie auf einen Ausgleich bedacht sind. Dieser kann durch Diffusion oder Konvektion erfolgen.

An nicht-gasenden Orten ist der Anteil des Transportes über die Diffusion der bedeutsamere Teil der Gasbewegungen im Boden. Der Gastransport über die Diffusion wird über das 1. Fick'sche Gesetz beschrieben (Kap. 3.1.1.3). Die treibenden Kräfte bei dem Diffusionsweg sind vorwiegend Partialdruck- und Konzentrationsgradienten. Der beschränkende Faktor ist das Wasser. Gas diffundiert durch Wasser wesentlich schlechter als durch Luft. Folglich ist es

für den diffusiven Gastransport von größter Wichtigkeit, wieviel Wasser sich im Porenvolumen befindet, und wie es verteilt ist. Weitere Diffusionsbarrieren sind Pflanzenwurzeln, das Meniskenwasser, die Kontinuität der Festsubstanz, sowie auftretende Verkrustungen des Bodens (Kuntze et al. 1994).

Der konvektive Gastransport ist ein Massentransport, der beispielsweise durch barometrische oder temperaturbedingte Volumenveränderungen ausgelöst werden kann. Aber auch durch starke Windeinwirkungen, Gasneubildungen oder Grundwasserspiegelveränderungen. In Mofetten liegt oft der konvektive Gastransport vor, da das aufsteigende Gas nicht durch Diffusion an die Erdoberfläche transportiert wird, sondern durch schlotartige Kanäle (Chiodini et al. 1997; Kämpf et al. 2013). Im Vergleich zu den Kontrollbereichen sind die Gasflussraten in den Ausgasungsbereichen stark erhöht (Kap. 3.1.1.3).

Einwirkungen erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen auf die Bodenazidität

Die physiko-chemischen Eigenschaften natürlicher Böden ohne CO₂-Einfluss sind von den Sorptionseigenschaften der Bodenkolloide abhängig. Kolloidale Substanzen sind zum Beispiel Ton, Humus oder Metalloxide. Unter Sorption versteht man die Fähigkeit, Moleküle und Ionen an Grenzflächen so anzulagern, dass sie austauschbar sind. Dabei unterscheidet man die physikalische Adsorption von der chemischen. Die physikalische Adsorption ist für den Wasserhaushalt des Bodens von Bedeutung, da hiervon die Wassermoleküle betroffen sind.

Die chemische Adsorption ist für den pH-Wert und die Pufferung von Bedeutung, und dadurch auch für die Bodenentwicklung, die Gefügestabilität und den Nährstoffhaushalt. Die Ionenadsorption ist reversibel und vollzieht sich nach der Wertigkeit der Ionen, wozu Wasser als Medium benötigt wird. Die wichtigsten Kationen sind: Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Wasserstoff, Aluminium, Ammonium, Eisen und Spuren von Schwermetallen. Einige dieser austauschbaren Kationen wirken basisch: Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium. Je höher demnach der Anteil dieser Kationen an den Sorbenten ist, desto kleiner ist der Anteil von Säurebildnern.

Die aktuelle Azidität des Bodens, und damit der pH-Wert, werden durch die H⁺-Konzentration im Boden bestimmt, während die potentielle Bodenazidität aus der Menge der sorbierten H⁺-Ionen resultiert. Einen großen H⁺-Ionen Eintrag bringen die Niederschläge. Normalerweise hat Regen einen pH-Wert von 5,6. Durch anthropogene Emissionen (zum Beispiel Schwefeldioxid) entsteht in der Atmosphäre Schwefelsäure. Zusammen mit anderen

Säuren bewirkt er eine Reduktion des pH-Wertes von Regen auf 4 oder noch tiefere Werte (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Im Boden lebende Organismen und Pflanzenwurzeln erniedrigen durch ihre Atmung die Bodenazidität. Während der Atmung entsteht Kohlendioxid, dessen Abgabe an die Atmosphäre nicht sofort stattfindet. Dadurch erhöht sich der CO₂-Partialdruck im Boden gegenüber der Atmosphäre, wodurch die Konzentration an Kohlensäure stark zunimmt.

Unter Nährstoffmangelbedingungen geben Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen organische Säuren in den Boden ab, wie beispielsweise Citronensäure, Äpfelsäure, Fumarsäure, und andere. Dabei werden Nährstoffe aus der Bodenlösung gelöst. Weiterhin sind die Pflanzenwurzeln gezwungen, H⁺-Ionen in den Boden abzugeben, da sie bei der Nährstoffaufnahme mehr Kationen aufnehmen als Anionen. Zur Erhaltung ihrer Elektroneutralität werden H⁺-Ionen für den Ladungsausgleich abgegeben. Folglich hat die Rhizosphäre, also der Lebensraum der Wurzeln, immer einen deutlich niedrigeren pH-Wert als der restliche Teil des Bodens (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Neben den beschriebenen H⁺-Quellen kommt in Mofettenböden eine weitere hinzu. Das aufsteigende Kohlendioxid löst sich in dem Bodenwasser, wodurch Kohlensäure gebildet wird. Auf diese Weise findet eine Reduktion des pH-Wertes in Böden von Ausgasungsstellen statt (Vodnik et al. 2006; Blume und Felix-Henningsen 2009; Saßmannshausen 2010).

Auswirkungen des Kohlendioxids auf den Abbau organischen Materials

Die organische Bodensubstanz ist ein wichtiger Teil des Oberbodens. Der größte Anteil der organischen Substanz wird langfristig im Boden gehalten und ist gegen einen weiteren Abbau geschützt. Der übrige Teil geht durch mikrobielle Oxidationsprozesse in die Atmosphäre zurück. Aufgrund einer geregelten Aufnahme und Abgabe der organischen Materialien ergibt sich ein Gleichgewicht mit charakteristischem Humusgehalt. Dieser besteht aus allen abgestorbenen Tier- und Pflanzenresten, sowie deren Umwandlungsprodukten. Folglich ist die Zusammensetzung sehr heterogen, da sich die Abbauprozesse in unterschiedlichen Stadien befinden. Die Umwandlung der organischen Materialien wird durch die Bodentemperatur und den Wassergehalt des Bodens reguliert. Der Anteil des Bodenwassers am Porenvolumen bestimmt die Luft- beziehungsweise Sauerstoffversorgung des Bodens. Folglich limitiert er die Lebensbedingungen der aeroben Mikroorganismen, die hauptsächlich für die Zersetzung der organischen Bodensubstanz verantwortlich sind. Gut durchlüftete Böden sind also humusärmer als solche mit ständigem Wasserüberschuss, die an Sauerstoffmangel leiden. Allerdings limitiert Wassermangel auch die Aktivitäten der Mikroorganismen, so dass

folglich auch ein ausgetrockneter Boden humusreich sein kann (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Ferner wird der Humusgehalt von der Vegetationsdecke bestimmt. Eiweißreiche Pflanzen, beispielsweise Gräser oder Kräuter, werden schneller abgebaut als eiweißarme. Manche Pflanzenarten, zum Beispiel *Calluna vulgaris*, sind sehr schlecht zersetzbar, da sie auf luftarmen Mineral- oder Moorböden wachsen. Sie sind Rohhumuslieferanten (Larcher 2001). Aufgrund der Abhängigkeit des Abbaus organischen Materials von der Bodendurchfeuchtung und Durchlüftung, haben erhöhte CO₂-Gehalte im Bodengas Einfluss auf die Umwandlung tierischer und pflanzlicher Produkte (Ineson und Cotrufo 1997). Nach Rennert et al. (2011) ist die Humifizierung unter hypoxischen Bedingungen als Folge fehlender Oxidationsprozesse und herabgesetzter mikrobieller Aktivität gehemmt. Diese Hemmung wirkt sich auch auf die C/N-Verhältnisse im Boden aus, die in gasenden Bereichen größere Werte erreichen. Das Verhältnis zwischen Kohlenstoff und Stickstoff (C/N-Verhältnis) ist entweder eng oder weit. Je kleiner die Zahl, desto enger ist das Verhältnis. Der Stickstoffgehalt im Boden steigt, je enger das Verhältnis ist. Mit zunehmender Humifizierung wird das Verhältnis enger, mit Werten zwischen 10 und 12. Durch Untersuchungen von Ross et al. (2000) und Flechsig et al. (2008) werden diese Ergebnisse bestätigt.

1.2.3 Die bodennahe Luftschicht über Mofetten

In der Meteorologie unterscheidet man im Wesentlichen das Makro- und Mikroklima. Das Makroklima reicht vertikal bis zur Tropopause (Müller 1995). Das Mikroklima hingegen umfasst den Bereich der Atmosphäre bis 1 oder 2 m Höhe (Müller 1995). Daher wird es auch als bodennahe Luftschicht bezeichnet. Im Gegensatz zum Makroklima wird es durch die Wirkungen der Erdoberfläche und des Mikroreliefs geprägt. Dabei steht es in Abhängigkeit von der Oberflächengestaltung, den Bodeneigenschaften, sowie der Bodenbedeckung (Hupfer und Kuttler 2006). Nach Kraus (2008) gehört auch die oberste Bodenschicht, in der sich der Hauptanteil der pflanzlichen Wurzelmasse befindet zur bodennahen Luftschicht. Zusammenfassend werden in der Betrachtung des bodennahen Klimas die Vorgänge berücksichtigt, die in der obersten durchwurzelteten Bodenschicht ablaufen und darüber hinaus bis maximal 2 m Höhe (Müller 1995; Kraus 2008).

Die Verhältnisse im bodennahen Klima werden, wie bereits erwähnt, durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche bestimmt, wobei dem Strahlungsumsatz an der Grenzfläche zwischen Boden und Atmosphäre eine wichtige Bedeutung zukommt. Zum Beispiel werden

die thermischen Verhältnisse innerhalb der bodennahen Luftschicht durch den Strahlungsumsatz bestimmt (Hupfer und Kuttler 2006).

Die Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre ist in Bodennähe am höchsten und kann mit steigender Höhe abnehmen. Sie entsteht durch Verdunstungsprozesse am Boden oder an der Wasseroberfläche. Der Wasserdampftransport erfolgt über Diffusion und ist folglich vom Sättigungsdefizit der Luft abhängig (Hupfer und Kuttler 2006).

Unmittelbar über der Erdoberfläche sind die Windgeschwindigkeiten niedriger als in höheren Schichten (Hupfer und Kuttler 2006).

Für die Auswertung von Messergebnissen in Mofetten ist unter anderem die Kenntnis über die Auswirkungen der bodennahen Luftschicht auf die obersten Schichten des Bodens von Bedeutung. Ein Beispiel ist die Auswertung von Bodengasmessungen. In diesem Fall ließe sich die Frage stellen, wie stark die Einwirkungen der mikroklimatischen Verhältnisse auf die Bodengaszusammensetzung zu einem Zeitpunkt waren und bis zu welcher Tiefe diese Auswirkungen im Boden von Bedeutung sind.

Wie oben bereits erwähnt, ist das Mikroklima ein Grenzflächenklima zwischen Boden und Atmosphäre. Folglich ist die oberste Schicht des Bodens am stärksten den Prozessen in dieser Grenzschicht ausgesetzt (Strahler und Strahler 1999). Das zeigt sich vor allem in der Abhängigkeit der Bodentemperatur von der Umgebungstemperatur (Schinner und Sonnleitner 1996; Strahler und Strahler 1999). Nach Hintermaier-Erhard und Zech (1997) umfasst der Oberboden den Teil des Bodens von 0 bis -40 cm Tiefe. Das bedeutet, dass man unter dem Oberboden die organische Auflage und den A-Horizont versteht (Hintermaier-Erhard und Zech 1997). Demnach wird als Unterboden der Bereich ab -40 cm Bodentiefe verstanden und umfasst die B-Horizonte (Hintermaier-Erhard und Zech 1997).

Das geogene Kohlendioxid kann die bodennahe Luftschicht über Mofetten verändern. In Kap. 1.2.1 wurde bereits erwähnt, dass es die Zunahme der Luftfeuchtigkeit über gasenden Stellen bewirkt. Je nach Konzentration, Gasfluss und Lage der Mofette können ebenfalls die oberflächennahen CO₂-Konzentrationen der Atmosphäre erhöht sein (Kap. 1.2.1; Pfanz et al. 2004; Pfanz 2008a).

1.2.4 Artenzusammensetzung von Pflanzenbeständen und Pflanzenwachstum in Mofetten

Die azonale Vegetation auf Mofetten

Die Vegetation auf Mofettenstandorten wächst unter teilweise extremen Bedingungen. Es ist deutlich geworden, dass die Pflanzen sowohl in der bodennahen Luftschicht, als auch in ihrem Wurzelraum erhöhten CO₂-Konzentrationen ausgesetzt sind, sowie hypoxischen bis

anoxischen Bedingungen. Zusätzlich sind die Böden ihrer Standorte sehr sauer und nährstoffarm (Kap. 1.2.1-1.2.3). An verschiedenen Mofetten in Europa wurde die Vegetationszusammensetzung an gasenden Stellen untersucht. Selvi (1997) erkundete die Vegetation an mehreren Mofetten in Zentral-Italien. Dabei fand er überwiegend azonale endemische Grasgemeinschaften, die vor allem durch das Vorkommen von *Agrostis canina* ssp. *monteluccii* gekennzeichnet waren. Neben diesem Gras traten nur wenige Arten in dieser Grasgemeinschaft (*Agrostidetum caninae* ssp. *monteluccii*) auf. Das Ausbreitungsmuster um die Ausgasungen wurde durch die Distanz zu den gasenden Stellen und dem CO₂-Gradienten der bodennahen Luftschicht und des Bodens bestimmt. Die Arten dieser azonalen Vegetation waren azidophil und ökologisch hoch spezialisiert.

Selvi und Bettarini (1999) studierten die Pflanzenbestände auf Solfataren (Mofetten mit Schwefelexhalationen), sowie auf geothermalen Stellen. Diese emittieren heißen Wasserdampf, in dem auch Kohlendioxid, Borsäure und Schwefelwasserstoff enthalten sind („soffioni boraciferi“). An allen untersuchten Stellen wurde die Gattung *Agrostis* gefunden. Je nach den Standortbedingungen kam eine andere Art vor. *Agrostis canina* ssp. *monteluccii* wuchs vor allem auf stark sauren Böden, fehlte aber beispielsweise in der bereits erwähnten Mofette Il Bossoleto. Hier traten überwiegend *Phragmites australis* und *Agrostis stolonifera* auf. *Agrostis stolonifera* ist höchstwahrscheinlich sehr gut an anoxische Bedingungen angepasst, während *Agrostis canina* ssp. *monteluccii* eher sehr niedrige Boden-pH-Werte ertragen kann. Eine dritte Art, *Agrostis castellana*, kann ebenfalls sehr gut eine fortgeschrittene Bodenazidität tolerieren, vor allem aber hohe Temperaturen. Auf den „soffioni boraciferi“ war die Vegetation vor allem durch *Calluna vulgaris* gekennzeichnet.

Auf einer Mofette in Nordost-Slowenien wuchsen auch krautige Pionierpflanzen. An den stark-gasenden Stellen wurde jedoch hauptsächlich *Echinochloa crus-galli* (Hühner-Hirse) und *Juncus effusus* (Flutter-Binse) gefunden (Turk et al. 2002; Vodnik et al. 2002).

Saßmannshausen (2010) gelang eine Charakterisierung der azonalen Vegetation auf terrestrischen Mofetten in West-Tschechien. Damit wurde der Kenntnisstand der Vegetationszusammensetzung auf Mofetten erweitert, denn die Untersuchungen in Italien umfassten geothermal Biotop in einem mediterranen Klima. Durch die Studien in west-tschechischen Mofetten wurde die azonale Vegetation unter mitteleuropäischen Vegetations- und Klimaverhältnissen untersucht. Schließlich konnten 41 Zeigerarten für gasende und nicht-gasende Stellen bestimmt werden. Unter diesen 41 Phytoindikatoren waren 23 positive und 18 negative Mofettenzeiger. Zusätzlich konnten sieben verschiedene Vegetationstypen für die unterschiedlichen Mofettenbereiche charakterisiert werden.

Die Pflanzenarten, die bei den unterschiedlichen Forschungsprojekten auf Mofetten gefunden wurden, haben gemeinsame Eigenschaften. Sie sind azidophil und ertragen Staunässe oder eine zeitweise starke Bodendurchfeuchtung (Pfanz 2008a; Saßmannshausen 2010). Viele Arten gehören zu den Helophyten (Sumpfpflanzen). Diese sind sehr gut an hypoxische bis anoxische Bedingungen angepasst, da staunasse Böden kaum Sauerstoff enthalten. Sie haben Mechanismen entwickelt, die ihnen die Ausbreitung in Mofetten ermöglichen. Beispielsweise können einige Helophyten mit den oberirdischen Organen Sauerstoff produzieren (über die Photosynthese) und in die unterirdischen Organe, also zu den Wurzeln oder Rhizomen, weiterleiten. Liegen die Wurzeln nahe an der Erdoberfläche, erfolgt der Transport über die Diffusion. Eine weitere Möglichkeit, tiefer liegende Wurzelbereiche mit Sauerstoff zu versorgen, ist ein Vorgang, der als Thermoosmose bezeichnet wird. Dabei wird der Temperaturunterschied zwischen oberflächennahen und tiefen Wurzelbereichen genutzt, wodurch die Diffusion beschleunigt werden kann. Zusätzlich besitzen diese Pflanzen ein Aerenchym. Dieses Gewebe ist ein Luftgewebe, in dem der Sauerstoff durch große Interzellularräume ohne große Diffusionswiderstände geleitet werden kann (Armstrong und Armstrong 1991; Armstrong et al. 1996).

Des Weiteren kann der physikalische Mechanismus der Venturi-Ventilation bei manchen Sumpfpflanzen beobachtet werden, zum Beispiel bei *Phragmites australis*. Dabei werden abgestorbene, rohrartige Stängel des Schilfrohres für die Sauerstoffversorgung des Wurzelsystems genutzt. Wenn der Wind über ein offenes Rohr weht, wird ein Unterdruck erzeugt. Dadurch wird sauerstoffarme Luft aus dem Rohr gezogen. Zugleich wird an einem anderen offenen Rohr sauerstoffhaltige Luft hineingezogen. Auf diese Weise kann die Luft mit erhöhten Kohlendioxidgehalten im Wurzelraum ersetzt werden (Armstrong et al. 1992, 1996; Pfanz 2008a).

Pflanzenwachstum unter erhöhten CO₂-Konzentrationen

Pflanzen, die nicht an hypoxische, saure oder nährstoffarme Wuchsortbedingungen angepasst sind, können kaum auf Mofetten wachsen. Ab einer CO₂-Konzentration von über 2% ist das Wachstum dieser Pflanzen sichtbar eingeschränkt (Mückenhausen 1993) und in den meisten Fällen kommt es gar nicht erst zur Keimung. Samen von negativen Indikatorarten, die in eine Mofetten eingebracht wurden, keimen entweder aufgrund des Sauerstoffmangels nicht aus, oder die Keimwurzeln faulen ab. Neben den bereits erwähnten Pflanzen, die Extremstandorte besiedeln können, existieren dennoch Arten, die erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen ertragen können. Auf gasenden Stellen zeigen sie dann ein verändertes Wachstum. Am

auffälligsten für das menschliche Auge sind zunächst ein eingeschränktes Längenwachstum der Pflanzen, sowie eine gelbliche Färbung. Oft ist im Zusammenhang mit dem CO₂-Gradienten in einer Mofette eine Kleinwüchsigkeit der Pflanzen zu beobachten. Je näher die Pflanzen an die Ausgasungsschwerpunkte heranwachsen, desto geringer ist die Wuchshöhe (Pfanz 2008a). Auch andere Pflanzenorgane werden durch steigende Kohlendioxidkonzentrationen beeinflusst. Durch Untersuchungen der Trockenmasse von Blüten, Blättern, Stängeln und Wurzeln wurde festgestellt, dass mit steigenden CO₂-gehalten die Trockenmasse der Pflanzenorgane abnahm. Die geringere Trockenmasse resultiert beispielsweise aus einer Reduzierung der Blattgröße, der Blütenzahl oder einem verkürzten Wurzelwachstum (Woodward und Beerling 1997; Stubbe 2002). Neben der gehemmten Ausbildung verschiedener pflanzlicher Organe, wirkt sich das geogene Kohlendioxid auch auf die Vermehrung der Pflanzen aus. Oben wurde bereits erwähnt, dass Keimlinge nicht gedeihen können, und dass die Blütenzahl reduziert ist. Hinzu kommt eine verringerte Samenbildung (Stubbe 2002).

Außerdem haben Woodward und Beerling (1997) und Stubbe (2002) mit steigenden Kohlendioxidkonzentrationen eine verminderte Stomatadichte festgestellt.

Die gelbliche Färbung der Pflanzen deutet Chlorosen an, die durch einen verringerten Chlorophyllgehalt zustande kommen. Des Weiteren leiden Pflanzen auf gasenden Stellen an Nährstoffarmut (Pfanz et al. 2004; Vodnik et al. 2006).

An Pflanzen in Mofetten sind jedoch nicht ausschließlich morphologisch-anatomische Veränderungen festzustellen, sondern auch physiologische. Durch verschiedene Untersuchungen wurde eine Reduzierung der maximalen Photosyntheseraten nachgewiesen. Untersucht wurden: *Phleum pratense*, *Echinochloa crus-galli*, *Phragmites australis*, *Juncus effusus*, *Alopecurus pratensis*, *Plantago major*, *Carpinus betulus*, *Zea mays* und *Setaria viridis*. Zusätzlich wurden Veränderungen im CO₂-Kompensationspunkt festgestellt; er korrelierte mit der Nähe zu den Ausgasungen. Je näher die Pflanzen an die gasenden Stellen heranwachsen, desto geringer war der CO₂-Kompensationspunkt. Die Kapazität der Carboxylierung war mit zunehmender Nähe zu stark erhöhten CO₂-Konzentrationen ebenfalls eingeschränkt (van Gardingen et al. 1997; Pfanz et al. 2004; Pfanz et al. 2007).

Nach Maček et al. (2005) ist die Abhängigkeit der Wurzelatmung von erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen sehr artspezifisch. Wahrscheinlich haben Pflanzen unterschiedliche Mechanismen, die Respiration auf erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen einzustellen. Insgesamt konnte durch Messungen an *Alopecurus pratensis*, *Dactylis glomerata*, *Echinochloa crus-galli*, *Holcus lanatus*, *Phleum pratense*, *Poa pratensis* und

Setaria pumila dokumentiert werden, dass eine deutliche Reduzierung der Wurzelrespiration nur unter stark erhöhten CO₂-Gehalten festzustellen war.

1.3 Zielsetzungen der Arbeit

Die Untersuchungen und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind zwei Forschungsbereichen innerhalb der Mofettenforschung zuzuordnen, der abiotisch physiko-chemische Aspekt und der biotisch-organismische Aspekt. Ein wichtiger Schwerpunkt der Erforschung von Mofetten ist die Frage nach der Beeinflussung des Bodens durch aufsteigendes Kohlendioxid. Aber auch die direkte Ausgasung des CO₂ aus dem Boden in die bodennahe Atmosphäre und die darauf einwirkenden Faktoren, wie Wind, Regen, Luftdruck und Temperatur spielen eine große Rolle. Da im Untersuchungsgebiet häufig Schwarmbeben auftreten, wurde auch diesem Aspekt Aufmerksamkeit gewidmet.

Aus diesem abiotischen Forschungskomplex wurden Fragestellungen abgeleitet, die in der Arbeit thematisiert werden:

- ❖ Welchen Einfluss hat das geogene Kohlendioxid auf verschiedene Eigenschaften des Drei-Phasen-Systems Boden?
- ❖ Von welchen Bodenfaktoren ist der Gastransport innerhalb der Bodenschichten bis zur Freigabe des Gases an die Atmosphäre abhängig?
- ❖ Besteht ein Zusammenhang zwischen den Schwarmbebenaktivitäten und den CO₂-Exhalationen? Welche Auswirkungen haben klimatische Faktoren auf das aufsteigende Kohlendioxid?
- ❖ Sind die Ausgasungen im Jahreslauf konstant oder verändern sie sich?

Im zweiten Themenkomplex werden die Auswirkungen der geogenen CO₂-Exhalationen auf die belebte Umwelt berücksichtigt. Die zwei- respektive dreidimensionale flächige CO₂-Ausgasung dreier Mofettenstandorte sollten mit der darauf stockenden Vegetation korreliert und statistisch abgesichert werden. Hier wurden sowohl Standorte mit ausschließlich krautigen Di- und Monokotylen, als auch ein Espenwald untersucht. In der Arbeit wird drei Hypothesen nachgegangen:

- ❖ Das geogene Kohlendioxid beeinflusst die Vegetation sowohl morphologisch als auch im vorkommenden Artenspektrum.
- ❖ Zeitliche Veränderungen in der Bodengaszusammensetzung haben Auswirkungen auf die Stabilität des pflanzlichen Bewuchses in der Krautschicht.
- ❖ Veränderungen im Bodengas ziehen Veränderungen der Vegetation nach sich.

- ❖ Die geogenen Kohlendioxidgasungen verändern den Zuwachs und die Holzstabilität von Espen (*Populus tremula*).

2 Material und Methoden

Bevor die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Messverfahren, Messinstrumente, Materialien, und Methoden der Datenverarbeitung und Statistik vorgestellt werden, wird zunächst auf das Untersuchungsgebiet, sowie die untersuchten Flächen eingegangen.

2.1 Das Untersuchungsgebiet im west-tschechischen Plesnátal

2.1.1 Topographische und klimatische Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Topographie

Das Untersuchungsgebiet im west-tschechischen Plesnátal liegt unmittelbar an der deutsch-tschechischen Grenze, im böhmischen Bäderdreieck, oder genauer im Eger (Cheb)-Becken. Die Kurorte Franzensbad (Františkovy Lázně, 442 m über NN), Marienbad (Mariánské Lázně, 630 m über NN) und Karlsbad (Karlovy Vary, 447 m über NN) bilden dieses Dreieck (aus Internetquelle 4 und 5). Das Gebiet erreicht Höhen von 420 bis 500 m und ist von Mittelgebirgen umschlossen, die 600 bis 1000 m hoch sind. Im Nordosten befindet sich das Erzgebirge, im Norden der Frankenwald, im Südosten der Kaiserwald (Slavkovský Les), im Südwesten der Oberpfälzer Wald und im Westen das Fichtelgebirge (Vacek et al. 2003; Michael 2008). Die Eger (Ohře) entspringt im Fichtelgebirge in unmittelbarer Nähe der Quelle des Weißen Mains, der nach Westen fließt, während sich die Eger nach Osten wendet. Bei Litoměřice (Leitmeritz) mündet sie in die Elbe (Michael 2008). Ihr Verlauf erreicht eine Länge von ungefähr 320 km (Michael 2008). Die Plesná (Fleißebach) ist ein Nebenfluss der Eger. Sie entspringt bei Bad Brambach und mündet in Nebanitz (Nebanice) in die Eger. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in einem ca. 3 km langen Abschnitt im Auenbereich des Plesná-Tales. Die nördliche Begrenzung besteht durch den Ort Milhostov (Mühlessen) und die südliche durch den Ort Hartoušov (Hartessenreuth). Die westliche Grenze des untersuchten Gebietes stellt die Plesná dar, während im Osten das Gelände durch eine Straße begrenzt wird.

Klima

Die angegebenen Durchschnittswerte der Temperatur (Tab. 2) stammen aus den Aufzeichnungen des Arbeitskreises Standortkartierung (1985), für Franzensbad. Aus der gleichen Quelle wurden die Mittelwerte für den Niederschlag (Tab. 2) entnommen, jedoch von der Messstation in Luby (Schönbach).

Tab. 2: Durchschnittswerte der Temperatur [°C] (Station Franzensbad) sowie des Niederschlages [mm] (Station Luby) entnommen aus den Aufzeichnungen des Arbeitskreises Standortkartierung (1985). (Datenerhebung 1978)

	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]
Jahresdurchschnitt	7,5	733
Mai bis September (Vegetationszeit)	14,6	290 bis 390
Januar (Monatsmittel)	-1,8	keine Angaben
Juli (Monatsmittel)	17,0	keine Angaben

Die angegebenen Temperaturwerte sind beispielhaft für das kühl-gemäßigte Klima Mitteleuropas (Schultz 2002). Als Region der feuchten Mittelbreiten weist Mitteleuropa charakteristische thermische Jahreszeitenwechsel auf, mit Tiefsttemperaturen in den Wintermonaten und Höchsttemperaturen in den Sommermonaten. Die Werte in Tab. 2 belegen dies beispielhaft für das Eger-Becken. Die Vegetationszeit im untersuchten Gebiet dauert ungefähr von März/April bis September, was für ein ozeanisch beeinflusstes Klimagebiet spricht (Schultz 2000). Jedoch könnte das niedrige Monatsmittel im Januar eine kontinentale Beeinflussung bedeuten (Saßmannshausen 2010).

2.1.2 Geologie

Der Vulkanismus im Eger-Graben ist im Erdneuzeitalter, im Känozoikum, entstanden, und wie in der Eifel oder in Frankreich erloschen. Die verbliebenen Beweise für die vulkanische Aktivität im Eger-Becken sind die beiden Vulkankrater der quartären Intraplatten-Vulkane, des Kammerbühl (Komorní Hůrka) und des Eisenbühl (Železná Hůrka) an der westlichen Grenze (Špičák et al. 1999; Weinlich et al. 1999; Pichler und Pichler 2007). Ausgelöst wurde die thermische Aktivität im oberen Erdmantel durch die drohende Spaltung der eurasischen Platte. Der Oberrheingraben bildete sich und mit ihm weitreichende Bruchstrukturen und Senkungsfelder (Pichler und Pichler 2007) in Mittel- und Zentraleuropa.

Das känozoische Riftsystem Mittel- und Zentraleuropas

Der Eger-Graben ist ein Teil des böhmischen Massivs. Das böhmische Massiv gehört zu dem europäisch känozoischen Riftsystem, das sich von der Nordseeküste bis zur afrikanischen Atlantikküste erstreckt. Es erreicht eine Länge von 3000 km (Ziegler 1992). Neben dem böhmischen Massiv umfasst das känozoische Riftsystem West- und Zentraleuropas die spanische Valencia Senke, den Golf von Lion, die Gräben von Saône, Limagne und Bresse, das Rheintal und den Leine-Graben. Seine Entstehung wird als „passives Rifting“ bezeichnet (Ziegler 1992). Passives Rifting bedeutet, dass eine früh angelegte Störungszone, zum Beispiel im Präkambrium, durch Dehnung reaktiviert wird. Infolgedessen wird die Lithosphäre dünner, wodurch Material aus der Asthenosphäre nachströmt (Bahlburg und Breikreuz 2004). Die Störungszone des mittel- und zentraleuropäischen Riftsystems wurde im Permokarbon angelegt und im späten Eozän erneut aktiviert. Das Aufsteigen von Magma im känozoischen Riftsystem indiziert eine Herkunft der Schmelze aus der unteren Lithosphäre und oberen Asthenosphäre (Ziegler 1992). Demnach konnte eine Beteiligung von Mantelplumen, die sich aus dem Mantel bis zur Erdkruste schornsteinartig erstrecken (Murawski und Meyer 2004), ausgeschlossen werden (Ziegler 1992). Das Riftsystem Mittel- und Zentraleuropas entwickelte sich zeitgleich mit der Haupt- und Spätphase der alpidischen Gebirgsbildung (Orogenese) (Ziegler 1992). Währenddessen wurden innerhalb der Platte des nord-westlich alpinen Vorlandes wiederholt Kompressionsspannungen aufgebaut (Ziegler 1992), da die Alpenfaltung der Westalpen hauptsächlich im Tertiär des Känozoikums stattfand (Schellmann 2011). Auf diese Weise entstanden die unterschiedlichen Gräben des Riftsystems. Die Subsidenz, also die örtlich regionale Absenkung der Erdoberfläche (Bahlburg und Breikreuz 2004) in verschiedenen Segmenten des Riftsystems war eine Folge wiederholter Veränderungen in der Schwächezone. Diese Veränderungen basierten vermutlich auf einem Zusammenspiel zwischen Kollisions-Kompressionen im Vorland, regionalen Spannkräften und rift-induzierten thermalen Aufstiegen (Ziegler 1992). Für den Bereich des känozoischen Riftsystems in West- und Zentraleuropa hatte das einen Bruch in der Sedimentation zur Folge (Ziegler 1992). In derartigen Sedimentationsunterbrechungen finden tektonische Prozesse, Erosion und Metamorphose statt (Bahlburg und Breikreuz 2004).

Das böhmische Massiv

Das böhmische Massiv als Teil des känozoischen Riftsystems Mittel- und Zentraleuropas, stellt ein wichtiges Element der Geologie Mitteleuropas dar. Als in der westeuropäischen

Platte erneut Rifting einsetzte und Kompressionsspannungen ausgelöst wurden, äußerten sich diese Deformationen auch im böhmischen Massiv. Infolgedessen entwickelte es sich zu einer neuen Struktur im alpinen Vorland. Diese Entwicklung vollzog sich in dem Zeitraum vom Ende der variskischen Gebirgsbildung bis zum Abschluss der alpidischen Gebirgsbildung. Der strukturelle Rahmen wird durch nordwest-südost verlaufende Blöcke des Untergrundes bestimmt, die sich in der Zeit vom Ende des Jura bis zum Ende der Kreidezeit entwickelten. In dieser Phase fand eine Faltenbildung statt, die die Bildung von Sedimentbecken nach sich zog. Dadurch wurde das böhmische Massiv eingeteilt. Während der Hauptphase der alpidischen Gebirgsbildung und durch vulkanische Aktivität gegen Ende des Pliozäns wurden die Untergrund-Blöcke angehoben. Auf diese Weise entstanden Teile der Erdkruste die gegenüber einer anderen Scholle herausgehoben erscheinen (Horste) (Malkovský 1987; Murawski und Meyer 2004). Parallel dazu wurde das böhmische Massiv in das Vortiefenbecken (bewegliche Senke) der östlichen Alpen eingelagert, das während der Orogenese mit Sedimenten gefüllt wurde. Außerdem war es durch tektonische Nachphasen der Gebirgsbildung gekennzeichnet, wie beispielsweise die Entstehung von Falten oder Bruchstrukturen (Malkovský 1987; Murawski und Meyer 2004).

Die Kruste des böhmischen Massivs hat überwiegend eine Stärke von 30 bis 40 km, und die Moho-Diskontinuität (seismische Unstetigkeitsfläche) liegt in einer Tiefe von 30 km (Malkovský 1987; Murawski und Meyer 2004).

Während der späten Phase der variskischen Gebirgsbildung und während des Oberkarbons reicherten sich kohlehaltige Klasten im Bereich des böhmischen Massivs an. Zum Ende des Oberkarbons bis in das frühe Perm hinein steigerte sich die Sedimentation, als Folge tektonischer Aktivitäten. Diese endeten während des frühen und späten Perms, was eine Abnahme der Sedimentation verursachte. Diese Sedimentationsunterbrechung zog eine Phase in der Erosion stattdessen nach sich, und das böhmische Massiv formte sich zu einer zusammenhängenden Landmasse. Anschließend wurde es von Frischwasser-Klasten überschwemmt, infolge von Eigenschwankungen des Meeresspiegels (eustatisch) (Malkovský 1987; Murawski und Meyer 2004). Nach dem Rückgang der Überschwemmungen erfolgte eine marine Sedimentation im böhmischen Becken. In der späten Oberkreide füllten kontinentale Sand- und Tonsteine das Gebiet des böhmischen Massivs.

In der Übergangszeit von der späten Oberkreide zum Tertiär des Känozoikums nahm wahrscheinlich die tektonische Aktivität zu, was zu einer Reaktivierung der nordwest-südost verlaufenden Störungssysteme führte. Das Gebiet des böhmischen Massivs wurde dadurch

erneut Kompressionsbelastungen ausgesetzt, und Hauptbestandteile des Untergrundes wurden angehoben (Malkovský 1987).

Der Eger-Graben

Der Eger-Graben ist eine vulkanotektonische Zone von 350 km Länge im Nordwesten des böhmischen Massivs, die es von Ostnordost nach Westsüdwest durchkreuzt. Er entstand zwischen dem späten Alt-Tertiär und dem Jung-Tertiär, als Folge tektonischer Zugspannungen innerhalb des böhmischen Massivs (Malkovský 1987; Murawski und Meyer 2004). Im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung wurde der Eger-Graben durch Absenkung in mehrere intrakontinentale Becken gegliedert (von Westen nach Osten): Die Becken von Cheb und Sokolov, das nordböhmische Braunkohlebecken und das Zittauer Becken (Malkovský 1987; Bankwitz et al. 2003). Die Absenkung des böhmischen Massivs wurde durch die Alpenfaltung erzeugt. Der südliche Teil des böhmischen Massivs wurde von tektonischen Decken überlagert. Nach Murawski und Meyer (2004) bezeichnet eine tektonische Decke einen großen Gesteinskörper der von seiner Unterlage gelöst und auf eine andere geschoben wurde. Unter der Last der tektonischen Decken sank das böhmische Massiv ab, wodurch schließlich das Vortiefenbecken der Alpen entstand. Im Laufe der Zeit wanderte die Achse dieses Beckens nordwärts (Malkovský 1987).

Im späten Eozän lagerten sich in den Becken Sedimente ab, die hauptsächlich aus Braunkohle bestanden (Malkovský 1987; Špičáková et al. 2000).

Der Eger-Graben wird durch eine Vielzahl tiefreichender Störungen gekreuzt, die nach ihrem Verlauf in verschiedene Gruppen eingeteilt werden können (Špičáková et al. 2000). Teilweise können an den Störungen seismische Aktivitäten verzeichnet werden (Bankwitz et al. 2003). An den Schnittstellen dieser Grabensysteme mit dem Eger-Graben können Becken entstehen, wie beispielsweise das Eger-Becken (Bankwitz et al. 2003).

Das Eger-Becken

Das Eger-Becken entstand im Westen des Eger-Grabens. Das Sedimentationsgeschehen innerhalb des Beckens wird in drei lithostratigraphische Intervalle unterschieden. Nach Bahlburg und Breitkreuz (2004) nutzt die Lithographie die lithologischen Merkmale von Gesteinen für die zeitliche Beschreibung der Erdgeschichte. Sie basiert auf der Abfolge verschiedener Sedimentgesteine.

Im ersten Intervall, das zeitlich im späten Oligozän bis zum frühen Miozän eingeordnet wird, bildete sich eine untere Ton- und Sandformation. Diese enthält ebenfalls vulkanische Klasten,

infolge vulkanischer Aktivität. Die Sedimentschichten bestehen aus alluvial-fluvialen Ablagerungen, basaltisch-vulkanischem Material und Kohle. Die Stärke dieser Formation ist unbekannt.

Das zweite Intervall fand im frühen bis zum mittleren Miozän statt. In diesem Zeitraum war das Cheb-Becken zeitweise überflutet, was zu der Bildung einer Gesteinsformation aus lakustrinen (= limnischen) Ablagerungen von 40 m Stärke führte. Diese enthält Smektite und Kaolinite (Flechsigt et al. 2008).

Im späten Pliozän (drittes Intervall) wurde zunächst die im zweiten Intervall gebildete Gesteinsformation erodiert. Die Oberfläche der Gesteinsformation des dritten Intervalls ist entweder die erodierte Oberfläche der lakustrinen Ablagerungen des zweiten Intervalls, oder sie wurde durch quartäre Flussablagerungen gebildet. In diesem Zeitraum bestand die Gesteinseinheit hauptsächlich aus Sand- und Tonsteinen, durch alluvial-fluviale Sedimentation (Špičáková et al. 2000).

Während der verschiedenen Sedimentationsphasen und der Bildung der Gesteinsformationen kam es wiederholt zu vulkanischen Aktivitäten, die die Ablagerung vulkanischer Klasten zur Folge hatte (Malkovský 1987). Die zu Beginn des Kapitels erwähnten quartären (pleistozänen) Vulkankrater sind Beweise für die magmatische Aktivität (Weinlich et al. 1999).

An seinem westlichen Ende wird der Eger-Graben von einer Störungszone gekreuzt: Der Mariánské Lázně fault zone (MLFZ). Diese verläuft von Nordwest nach Südost und stellt die östliche Begrenzung des Eger-Beckens dar. Ferner ist sie seismisch inaktiv. Eine weitere bedeutsame Störungszone verläuft von Norden nach Süden, und hat eine Länge von 35 km: Die Počátky Plesná fault zone (PPZ). Die PPZ ist seit dem späten Pleistozän aktiv und beeinflusst die Fließrichtung der Plesná (Bankwitz et al. 2003). Diese Störungszone ist identisch mit dem zentralen Erdbebengebiet des Eger-Beckens. Das bedeutet, dass die PPZ im Gegensatz zur MLFZ seismisch aktiv ist. Im Nordosten des Eger-Beckens, nahe der Stadt Nový Kostel kreuzen sich die beiden Störungszonen (Bankwitz et al. 2003; Schütze et al. 2012). An dieser Schnittstelle, die als Nový Kostel focal zone (NKFZ) bezeichnet wird, ist die stärkste Erdbebenaktivität festzustellen (Bankwitz et al. 2003; Fischer und Horálek 2005). Es konnte nachgewiesen werden, dass seit 1991 mehr als 90% der seismischen Aktivität in der NKFZ positioniert war (Fischer und Michálek 2008). Die Erdbebenaktivität tritt in Form von wiederholten Schwarmbeben auf, wodurch das Eger-Becken zu einem sehr interessanten Forschungsgebiet geworden ist. Der Begriff „Erdbebenschwarm“ wurde zum ersten Mal durch den österreichischen Geologen J. Knett im Jahr 1899 verwendet. Er bezeichnete damit

eine Ansammlung von über 100 makroseismischen Beben innerhalb eines Zeitraumes von fünf Wochen, im Jahr 1824 (Neunhöfer und Hemmann 2005). Erdbebenschwärme sind Sequenzen aus einer Vielzahl makroseismischer Ereignisse mit Magnituden über 3 (Murawski und Meyer 2004), die in einer Tiefe von 4 bis 20 km vorkommen. Sie sind sowohl räumlich, als auch zeitlich konzentriert (Neunhöfer und Hemmann 2005; Horálek und Fischer 2008;). Bei Schwarmbebenereignissen überwiegen Ereignisse mit geringen Lokalbebenmagnituden [M_L] (im Eger-Becken max. 4,6 M_L), von denen wenige dominant sind, allerdings nicht als Hauptstöße wahrgenommen werden. Erdbebenschwärme ergeben sich meist als Konsequenz aus einer heterogenen Störungszone mit instabilen Bedingungen der Erdkruste (Horálek und Fischer 2008).

Seit dem Jahr 1962 werden die Schwarmbebenereignisse im Gebiet des Vogtlandes, in dem das Eger-Becken positioniert ist, aufgezeichnet. Seitdem konnten viele starke Schwarmbeben verzeichnet werden: In den Jahren 1962, 1985 und 1986 wurden Erdbebenschwärme mit Mikrobeben ($M_L < 3$) mit maximalen Magnituden von 2,4 bis 3 festgestellt (Neunhöfer und Meier 2004). Im Anschluss an diese Schwarmbeben gab es eine längere Zeit seismischer Ruhe bis zum Jahr 1994. Im Dezember 1994 gab es eine Ansammlung von Mikrobeben mit einer maximalen Lokalbebenmagnitude von 2,2 (Špičák et al. 1999). Im Jahr 1997 wurde ein intensives Schwarmbebenereignis aufgezeichnet, das aus 800 Einzelbeben bestand. Vereinzelt erreicht die Beben eine Stärke von 3 (Horálek et al. 2000). Nach dreijähriger seismischer Inaktivität kam es im Jahr 2000 zu Schwarmbeben mit einer maximalen Lokalbebenmagnitude von 3,2 (Fischer und Horálek 2003). In dem Zeitraum von 2001 bis 2004 folgte erneut eine Zeit seismischer Ruhe, in der ausschließlich Mikrobeben aufgezeichnet wurden, die eine Stärke von 2 M_L nicht überschritten. Insgesamt wurden in der langen Periode von 2001 bis 2007 überwiegend Mikrobeben mit einer maximalen Lokalbebenmagnitude von 2,5 aufgenommen (Fischer und Michálek 2008). Im Jahr 2007 wurden vereinzelt Einzelbeben mit einer maximalen Stärke von 3 aufgezeichnet, die aber keinem Schwarmbeben zugeordnet werden konnten (Weinlich et al. 2013). Im Oktober 2008 wurde seit dem Erdbebenschwarm 1985/1986 die stärkste seismische Aktivität aufgezeichnet. Es ereignete sich ein Schwarmbeben in dem einzelne Makrobeben eine maximale M_L von 3,8 erreichten (Horálek et al. 2009). Es folgte eine Zeit seismischer Inaktivität in der nur Mikrobeben festgestellt wurden (aus Internetquelle 1). Im August/September 2011 kam es erneut zu einem Schwarmbebenereignis. Währenddessen konnten Einzelbeben mit einer maximalen Stärke von 3,5 dokumentiert werden (Fischer et al. 2014). In den Jahren 2012 und 2013 wurden lediglich moderate Schwarmbeben aufgezeichnet, die im höchsten Falle eine M_L

von 2,5 erreichten (aus Internetquelle 1). Im Juni 2014 fand ein Erdbebenschwarm statt, in dem die stärksten Schocks eine maximale Stärke von 4,5 aufwiesen (aus Internetquelle 1).

Die Destabilisierung der Erdkruste ist eine Folge von Deformierungsprozessen die durch aufsteigendes Magma verursacht werden. Nach Geissler et al. (2005) befindet sich unter dem Untersuchungsgebiet eine Anomalie der Moho-Diskontinuität in 50 bis 60 km Tiefe. Im Erdmantel kommt es zu Schmelzvorgängen und das aufsteigende Magma verbleibt an der Moho-Diskontinuität. Als Folge werden Teile des ursprünglichen Gesteins durch die Schmelzprodukte ersetzt. Durch thermalen und magmatischen Überdruck an der Kruste-Mantel-Grenze in Verbindung mit eindringendem Magma in den unteren Teil der Kruste wird eine komplexe Moho-Übergangszone verursacht. Es besteht eine Verbindung des Erdmantels mit der Erdkruste aufgrund der Ansammlung von Magma an der Moho-Diskontinuität. Die Moho-Diskontinuität wird angehoben, als Folge des Transportes von Magma, von Hitze und von aufsteigenden Fluiden. Dadurch verdünnt sich die untere dehnbare Kruste und bewirkt die Anhebung.

Diese Anomalie in der Moho-Tiefe äußert sich an der Erdoberfläche durch das Vorkommen von CO₂-Ausgasungszentren, der quartären Vulkane und von Schwarmbebenaktivitäten (Geissler et al. 2005; Flechsig et al. 2008). Das Kohlendioxid entsteht durch das Schmelzen carbonathaltiger Gesteine im Erdmantel, aufgrund hoher Temperaturen und Drücke in der Erdkruste (Pfanzen et al. 2004). Die Herkunft des CO₂ konnte für das gesamte Ausgasungszentrum Hartoušov nachgewiesen werden, und zwar mit Hilfe der Messung von Heliumisotopen. Helium (He) entsteht im Erdmantel, aber in der Erdkruste ist es kaum noch vorhanden (Pfanzen 2008a). Es ist demnach ein guter Indikator für Wechselwirkungen zwischen Mantel und Kruste und ein gutes Werkzeug für die Unterscheidung von Erdkruste- oder Erdmantelstammenden Gasen. Das freigesetzte Kohlendioxid diffundiert Richtung Erdoberfläche auf dem Weg des geringsten Widerstandes, und nach einem Konzentrationsgradienten, bis es in das Bodengas der Pedosphäre gelangt und von dort in die Atmosphäre entlassen wird. Dabei nutzt es Unebenheiten und Störungen im Grundgestein, und in den oberen Bodenschichten, wie beispielsweise Risse und Klüfte von 100 bis 400 cm² (Pfanzen et al. 2004). Die gleichen Wege werden zusätzlich vom freigesetzten Helium beansprucht, und kann folglich in dem ausströmenden Gas nachgewiesen werden (Pfanzen 2008a). In den untersuchten Gasproben des Eger-Beckens wurden durchgehend hohe Raten der Heliumisotope ³He/⁴He ermittelt, dementsprechend muss das Kohlendioxid dem Erdmantel entstammen (Bräuer et al. 2005, 2008, 2009, 2011, 2014) und ist somit geogenen Ursprungs. Im Eger-Becken wurden mithilfe von Gasmessungen und Gasanalysen vier

Hauptausgasungszentren lokalisiert: 1. Františkovy Lázně (Eger-Becken), 2. Mariánske Lázně, 3. Konstantinovy Lázně und 4. Karlovy Vary. In allen gasenden Zentren wurden hohe Kohlendioxidkonzentrationen gemessen und teilweise hohe CO₂-Flüsse (Weinlich et al. 1999).

Dem Ausgasungszentrum Františkovy Lázně sind das Eger-Becken zuzuordnen und folglich auch das Untersuchungsgebiet zwischen Hartoušov und Milhostov. Dort kennzeichnet sich die PPZ durch zwei Ausgasungszentren aus: Hartoušov und Bublák. Das Gebiet ist durch eine Vielzahl von trockenen oder nassen Mofetten gekennzeichnet. Insgesamt wurden bislang 140 Mineralquellen und 50 bis 500 Mofetten, in einem Areal von 1500 km² lokalisiert (Tank et al. 2005). Der Verlauf der PPZ in nord-südlicher Richtung ist an der geradlinigen Positionierung der gasenden Bereiche zu erkennen. Sie liegen in unterschiedlichen Distanzen zueinander aneinandergereiht in nord-südlicher Richtung. An den beiden Standorten Hartoušov und Bublák konnte anhand der Veränderungen von Isotopenzusammensetzungen eine anhaltend magmatische Aktivität nachgewiesen werden (Weise et al. 2001; Bräuer et al. 2005, 2008, 2011, 2014). Des Weiteren konnten seismisch induzierte Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen und Gasflüsse festgestellt werden (Koch et al. 2008; Kämpf et al. 2013; Weinlich et al. 2013). Die zugrunde liegenden geodynamischen Prozesse werden in Kap. 3.1.2.1 detailliert beschrieben.

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass die Schwarmbeben nicht ausschließlich auf der magmatischen Aktivität basieren, sondern das aufsteigende Kohlendioxid selbst ist ein Auslöser (Koch et al. 2008; Heinicke et al. 2009; Weinlich 2014). Das CO₂ verursacht Gesteinsveränderungen, die zu mechanischer Instabilität führen (Heinicke et al. 2009). Auf diese Weise werden neue Schwächezonen in dem Störungssystem geschaffen, an denen Bewegungen ausgelöst werden können (Weinlich 2014).

Nach Flechsig et al. (2008, 2010) beeinflussen nicht allein die magmatischen Prozesse oder die Auswirkungen des aufsteigenden Kohlendioxids das Vorkommen der gasenden Bereiche an der Erdoberfläche. Zusätzlich muss die Permeabilität der verschiedenen Sedimentschichten berücksichtigt werden. Beispielsweise haben gerade die Bodeneigenschaften des Untergrundes verstärkte Auswirkungen auf die Exhalation des CO₂ aus der Pedo- in die Atmosphäre (Flechsig et al. 2008).

2.1.3 Böden des Untersuchungsgebietes

Die Entstehung eines Bodens ist von bodenbildenden Faktoren, wie Klima, Wasser, Flora und Fauna abhängig, aber auch von anthropogenen Einflüssen, dem Relief und dem Gestein.

Neben den genannten Faktoren beeinflussen zusätzlich regional- oder lokalspezifische Bedingungen die Ausbildung einer Bodenart. Zum Beispiel sind auch die tektonische, sowie die fortlaufende magmatische Aktivität für die Bodenbildung von Bedeutung (Faust 2011).

In dem Untersuchungsgebiet im Eger-Becken sind neben den Faktoren Klima, Wasser, Flora, Fauna und Mensch, ebenso die Bedingungen für die Bodenbildung von Bedeutung, die durch das Relief, das Bodengas und das Gestein vorgegeben werden.

Durch den Verlauf der Plesná ergibt sich eine Einteilung der Landschaft in Talböden und Hangzonen. Die Talböden wurden, und werden auch heute noch, regelmäßig überschwemmt und mit Auensedimenten gefüllt. Auf den Hangzonen lagerten sich überwiegend Sande, Kiese und Tone ab (Malkovský 1987; Špičáková et al. 2000). Entsprechend der Lage unterscheiden sich die Böden der zwei Bereiche in der Korngrößenverteilung und im Wassergehalt (Saßmannshausen 2010).

Aufgrund der quartären (pleistozänen) Ablagerung von Lockersedimenten wie Sande, Kiese und Tone (Flehsig et al. 2008), entwickelten sich in den Hangzonen Braunerden (Scheffer und Schachtschabel 2010; Saßmannshausen 2010). Braunerden gehören zu den terrestrischen Böden und sind durch ein Ah/Bv/C-Profil gekennzeichnet. Demnach bestehen Braunerden aus folgenden Haupthorizonten:

- ❖ einem humosen Oberbodenhorizont, mit einem Mengenanteil organischer Substanz von über 30%,
- ❖ einem verwitterten, verbraunten oder verlehmteten Unterbodenhorizont
- ❖ sowie einem Untergrundhorizont der in mindestens 25 cm, höchstens aber in 150 cm Tiefe beginnt (AG Boden 1994; Scheffer und Schachtschabel 2010).

Der Talboden wird durch einen permanent starken Wasserzustrom beeinflusst. Zum Einen liegt er im Überschwemmungsbereich der Plesná, zum Anderen steht er unter erhöhten Grundwassereinträgen. Auf diese Weise entwickelten sich in den Talbereichen des Gebietes unterschiedliche semiterrestrische Böden. Das Vorkommen von Nassgleyen, Anmoorgleyen sowie Normgleyen konnte nachgewiesen werden. Vermutlich sind neben diesen auch Hanggleye und Auenböden zu finden, was jedoch bislang nicht nachgewiesen werden konnte (Saßmannshausen 2010).

Im Allgemeinen bestehen Gleye aus einem Ah-Horizont der kaum durch das Grundwasser beeinträchtigt wird. Danach folgt ein Oxidationshorizont, und darunter befindet sich ein Reduktionshorizont, der permanent nass ist. Je nach Subtyp können sich die Horizonte überlagern. Diese Böden entstehen unter hypoxischen Bedingungen, da sie unter einem konstanten sauerstoffarmen Grundwasserzustrom stehen. In dem Reduktions (Gr)-Horizont

herrschen reduzierende Verhältnisse, wodurch Eisen- und Manganverbindungen gelöst werden. Im Zuge des kapillaren Aufstieges des Grundwassers gelangen die Verbindungen in den Oxidations (Go)-Horizont. Dort geraten sie in Kontakt mit Sauerstoff und werden als Oxide ausgefällt. Die Ausbildung der verschiedenen Gleye hängt von mehreren Faktoren ab: von dem Einzugsgebiet, von der zeitlichen Abfolge und dem Ausmaß des Grundwasserzustromes, von der Fließgeschwindigkeit, von dem Gestein, von dem Sauerstoffgehalt, sowie von den organischen Verbindungen und Salzen (Scheffer und Schachtschabel 2010; AG Boden 1994).

Nassgleye konnten innerhalb des untersuchten Gebietes am häufigsten festgestellt werden (Saßmannshausen 2010). Für diese Böden ist ein Go-Ah/Gr-Profil charakteristisch. Bei Nassgleyen befindet sich das Grundwasser fortwährend nahe an der Erdoberfläche, und der humose terrestrische Oberbodenhorizont (Ah) wird durch den Go-Horizont überlagert.

Neben den Nassgleyen wurden auch Anmoorgleye in dem Gebiet gefunden, jedoch wesentlich seltener (Saßmannshausen 2010). Bei Anmoorgleyen steht das Grundwasser permanent an der Oberfläche. Als Folge des Sauerstoffmangels ist der Abbau organischer Bestandteile gehemmt. Der Organikanteil liegt zwischen 15 bis 30%. Dieser Subtyp der Gleye kennzeichnet sich durch ein Go-Aa/Gr-Profil aus. In diesem Fall wird der terrestrische anmoorige Oberbodenhorizont durch den Oxidationshorizont überlagert.

Zusätzlich zu den erst genannten Gleyböden konnten Normgleye in dem Untersuchungsgebiet nachgewiesen werden, vor allem in höher gelegenen oder teilentwässerten Bereichen (Saßmannshausen 2010). Bei Normgleyen ist keine Überlagerung des A-Horizontes durch den Oxidationshorizont zu finden, da das Grundwasser den humosen Oberbodenhorizont (Ah) nicht beeinflusst. In dem Oxidationshorizont (Go) befinden sich nur wenige oxidierte Ausfällungen. Der Reduktionshorizont (Gr) weist Reduktionsfarben wie grau, graublau oder graugrün auf. Durch die Beschreibung ergibt sich das Profil: Ah/Go/Gr (AG Boden 1994). Des Weiteren kann aus der Charakterisierung entnommen werden, dass die hypoxischen Bedingungen in den Horizonten nicht derart intensiv ist, wie bei den Nass- und Anmoorgleyen.

Sowohl in der Hangzone, als auch in den Talbereichen des Untersuchungsgebietes entwickelten sich Böden unter dem Einfluss des aufsteigenden Kohlendioxids. CO₂ ist ein sauerstoffverdrängendes Gas. Folglich entstanden sie unter hypoxischen Bedingungen. Im Gegensatz zu den Gleyen ist die Hypoxie keine Folge von erhöhtem Grundwassereinfluss, sondern eine Folge der Auswirkungen reduzierender Gase. Diese Böden werden als

Reduktosole bezeichnet (AG Boden 1994; Blume 1997; Blume und Felix-Henningsen 2009). In Kap. 1.2.2 wurden die Reduktosole als mofettentypische Böden charakterisiert.

In Mofettengebiet des west-tschechischen Plesnátales wurde der Einfluss des Kohlendioxids auf Mofettenböden, beispielhaft auf der Hartoušov-Wiese untersucht. Auf der Hartoušov-Wiese und vereinzelt in dem Untersuchungsgebiet sind hügelartige Strukturen auffallend, die sich mithilfe der Gasmessungen als Mofettenbereiche herausstellen. Auf der Hartoušov-Mofette existiert ein Hügel der durch kleinere Absenkungen gekennzeichnet ist, die vegetationsfrei sind. Zusätzlich sind sie periodisch mit Wasser gefüllt, oder mit wenigen Kieselsteinen. An diesem Hügel wurden die höchsten CO₂-Ausgasungen festgestellt. Mithilfe von geoelektrischen und sedimentologischen Messungen konnte nachgewiesen werden, dass eine deformierte pleistozäne Tonschicht angehoben wurde, wodurch die Hügelstruktur entstand. Als auslösender Faktor konnte das aufsteigende Kohlendioxid identifiziert werden. Je nach dem Wassergehalt der Tonschicht ist das Mofettengas in der Lage diese Schicht entweder in brüchiger oder gedehnter Form anzuheben. Zusätzlich kann ein hoher Gasfluss quarzhaltige Kiesel bis in oberflächennahe Sedimentschichten transportieren, wo sie sich in feinkörnigen Sedimenten einlagern. Ein zusätzlicher Faktor, der zur Entstehung der hügelartigen Struktur beigetragen haben könnte, ist das Anschwellen von Smektiten in den pleistozänen Tonschichten. Diese enthalten eine hohe Dichte an Mikrorissen, und sie weisen eine hohe Permeabilität auf. Dadurch wird ein erhöhter Gasfluss in Verbindung mit erhöhter Wasserzirkulation gefördert (Flehsig et al. 2008).

Das geogene Kohlendioxid hat auch Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften. Flehsig et al. (2008) und Rennert et al. (2011) gelang es nachzuweisen, dass in gasenden Bereichen eine Konservierung organischen Materials begünstigt wird, sowie die Bildung von Rohhumus. Die Gehalte organischen Kohlenstoffes sind dort am höchsten (Flehsig et al. 2008; Rennert et al. 2011). Zusätzlich konnte herausgearbeitet werden, dass der Gehalt an Eisenoxid in den oberen Bodenschichten sehr gering ist (Rennert et al. 2011). Das steht im Widerspruch zu den Bodeneigenschaften von Reduktosolen nach Blume und Felix-Henningsen (2009). Mögliche Begründungen für diesen Unterschied sind das Fehlen eines Oxidationshorizontes in Mofettenböden mit erhöhten CO₂-Konzentrationen, sowie eine verlangsamte Ausfällung der Eisenoxide (Rennert et al. 2011). Dennoch sind auch in gasenden Bereichen punktuelle rostrot gefärbte Oxidationsbereiche zu finden (Rennert et al. 2011). Verschiedene Sumpfpflanzen sind in der Lage über das Aerenchym Sauerstoff in tiefere Bodenschichten zu transportieren, um hypoxische Bedingungen auszugleichen (Pfanzen et al. 2004).

2.1.4 Vegetation

Eine ausführliche Beschreibung der Flora und Vegetation des ca. 3 km langen Untersuchungsgebietes wurde durch Saßmannshausen (2010) vorgenommen.

In einem Zeitraum von 2007 bis 2009 wurden in dem Gebiet 220 Gefäßpflanzenarten und 18 Moose bestimmt. Zusätzlich wurden drei Flechten bestimmt. Unter den 220 Gefäßpflanzenarten befinden sich keine floristischen Seltenheiten (Saßmannshausen 2010).

Durch die verschiedenartige Pflanzenzusammensetzung sind in dem Areal unterschiedliche Bereiche zu verzeichnen. Von der Plesná ausgehend befinden sich dort Bachufer, Teiche mit Schlammböden, der Talraum, trockenes Offenland, Wirtschaftsgrünland, Waldflächen und die Mofettenstandorte. Im Folgenden werden diese Bereiche kurz anhand ihrer Vegetation charakterisiert.

Die Bachufer der Plesná sind teilweise von *Alnus glutinosa* (Schwarzerle) gesäumt. Von den krautigen Pflanzen sind dort größtenteils die Arten *Urtica dioica*, *Galeopsis tetrahit*, *Heracleum mantegazzianum*, *Stellaria nemorum* und *Impatiens glandulifera* zu finden. Durch die Verbindung mit *Stellaria nemorum* handelt es sich in diesem Fall um einen Bach-Erlen-Eschenwald (*Stellario-Alnetum glutinosae*) (Saßmannshausen 2010; Ellenberg und Leuschner 2010).

In periodisch überschwemmten Teichen mit Schlammböden wurden Hundsstraussgras-Grauseggensumpf-Gesellschaften (*Carici canescentis-Agrostietum caninae*) beobachtet. Diese Gesellschaften setzen sich überwiegend aus *Carex nigra*, *Eriophorum angustifolium*, *Menyanthes trifoliata*, *Potentilla palustris* und *Viola palustris* zusammen.

In den Talbereichen kommen überwiegend Mädesüßfluren vor, die durch *Filipendula ulmaria* gekennzeichnet sind. Durch die Verbindung mit dem Kriechenden Baldrian (*Valeriana repens*) werden die Mädesüßfluren des Plesnátales als *Valeriano-Filipenduletum* bezeichnet. Neben diesen beiden Arten wurden *Stachys palustris*, *Lysimachia vulgaris* und *Rumex aquaticus* häufig beobachtet (Saßmannshausen 2010; Ellenberg und Leuschner 2010). Vereinzelt wurden in den Mädesüßfluren kleinere Bestände von *Phalaris arundinaceae* festgestellt. Zudem befinden sich in manchen Bereichen des Talraumes Strauchweiden (*Salix aurita*). In Talbereichen die unter anthropogenem Einfluss stehen, ist überwiegend das Vorkommen von *Alopecuretum pratensis* (Wiesenfuchsschwanz-Wiese) beobachtet worden.

Die trockenen Offenlandbereiche sind durch Borstgrasrasenrelikte (*Violion caninae*) gekennzeichnet. In diesen sind vor allem die Arten *Nardus stricta*, *Arnica montana*, *Dianthus deltoides*, und *Viola canina* enthalten (Saßmannshausen 2010; Klötzli et al. 2010).

Die Grenze zwischen dem Wirtschaftsgrünland und den Brachflächen wird hauptsächlich von zwei Arten bestimmt, *Anthriscus sylvestris* und *Heracleum spondylium* (Saßmannshausen 2010).

Abgesehen von kleineren Baumgruppen existiert in dem Untersuchungsgebiet eine größere Waldfläche, ein Pionierwald. Dieser besteht hauptsächlich aus *Betula pendula* und wenigen *Alnus*-Exemplaren. Der Wald umgibt die Mofette Bublák, wobei die Auswirkungen des Kohlendioxids auf die umgebende Vegetation gering sind. Die Artenzusammensetzung der unteren Vegetationsschichten des Pflanzenbestandes ist mit der des Offenlandes vergleichbar. Des Weiteren sind in dem Birkenwald wassergefüllte Torfstiche zu finden, die teilweise mit Torfmoos-Schwinggras bedeckt sind. Der Gasfluss in diesen Torfstichen ist sehr stark (Weinlich et al. 1999), so dass das Wasser zur Schaumbildung angeregt wird (Saßmannshausen 2010).

In dem Untersuchungsgebiet sind weitere Stellen zu finden, die vegetationsfrei und zum Teil permanent oder periodisch wassergefüllt sind. Sie gehören zu verschiedenen Mofettenstrukturen und werden als Schlenken bezeichnet (Kölbach 2008). Sofern sie wassergefüllt sind und der Gasfluss hoch ist, sind diese Strukturen an der starken Blasenbildung zu erkennen. In dem Fall, dass sie trocken sind, können sie meistens anhand von Ansammlungen verendeter Tiere ausgemacht werden (Pfanz 2008a). Andere Mofettenstrukturen sind durch die mofettentypische Vegetation (Pfanz 2008a), und hügelartige Aufwölbungen (Flechsigg et al. 2008) gekennzeichnet. Die gasenden Bereiche der Mofetten sind oft rundliche oder längliche Strukturen die sich durch die veränderte Artenzusammensetzung von der Umgebung unterscheiden. Nach Saßmannshausen (2010) gibt es in dem Untersuchungsgebiet sieben Mofetten-Vegetationstypen: den *Calluna*-Typ, den *Calluna-Nardus*-Typ, den *Eriophorum-Nardus*-Typ, den *Eriophorum-Deschampsia*-Typ, den *Eriophorum*-Typ, den *Molinietalia*-Typ und den *Arrhenatheretalia*-Typ. Diese Vegetationstypen unterscheiden sich durch ihre Charakterarten von der umgebenden Grünlandvegetation und sind in Bereichen unterschiedlicher Wasserversorgung zu finden.

Der *Calluna*- und *Calluna-Nardus*-Typ sind für trockene gasende Bereiche im Offenland charakteristisch. In beiden ist *Calluna vulgaris* stark vertreten. Feuchte bis nasse Mofetten im Talraum sind hingegen durch die Typen *Eriophorum-Nardus*, *Eriophorum-Deschampsia* und *Eriophorum* gekennzeichnet. Für alle drei Typen ist das erhöhte Vorkommen von *Eriophorum vaginatum* charakteristisch. Der *Molinietalia*- und *Arrhenatheretalia*-Typ sind im feuchten, teilweise bewirtschafteten Grünland festgestellt worden. Der *Molinietalia*-Typ ist an dem

Vorkommen von *Succisa pratensis* zu erkennen, und der *Arrhenatheretalia*-Typ an *Alopecurus pratensis* (Saßmannshausen 2010).

2.2 Die Untersuchungsflächen

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Messungen in der Birnen- und Moosmofette sowie in dem *Populus tremula*-Bestand. Alle drei liegen im Mofettengebiet des west-tschechischen Plesnátales (Kap. 2.1.2) in unmittelbarer Nähe zur Hartoušov-Wiese (Abb. 1), die in Saßmannshausen (2010) ausführlich beschrieben ist.

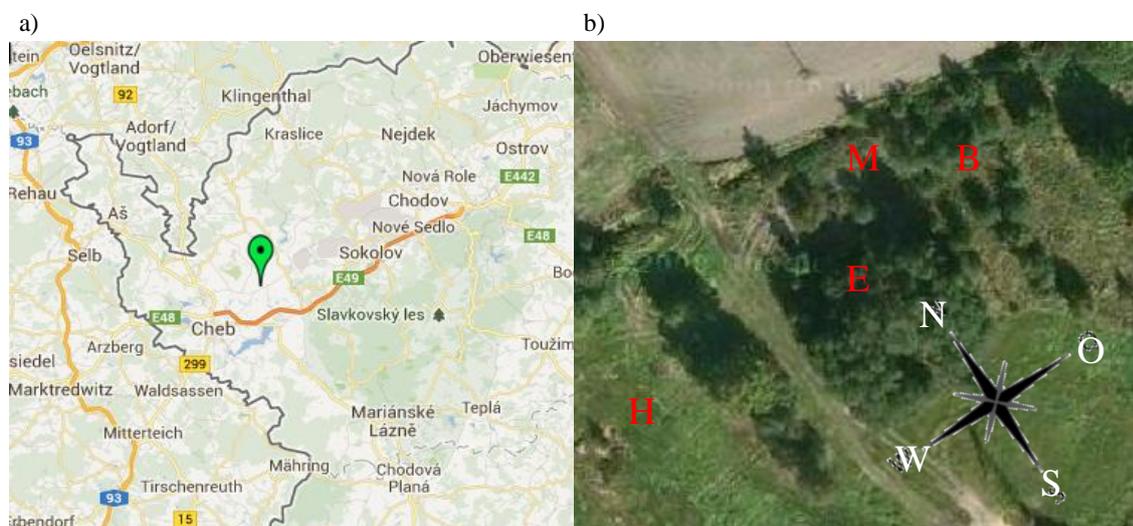


Abb. 1: Einordnung des Mofettenstandortes Hartoušov (a) (grüne Markierung) und Lage der Birnen (B)- und Moosmofette (M), und des Espenwäldchens (E) (b). H=Hartoušov-Wiese (aus Internetquelle 3).

Für die Durchführung der jährlichen oder vierteljährlichen Messungen und der Aufnahmen der Pflanzenbestände, war es von besonderer Wichtigkeit, dass während jeder Aufnahmekampagne die gleichen Messstellen, und Vegetationsquadrate, untersucht wurden. Um dies gewährleisten zu können, fand die Einrichtung der Birnen- und Moosmofette, und des Wäldchens als Dauerflächen (permanent plots) statt, mit genau definierten Messrastern. Die Messtransecte wurden nach den Himmelsrichtungen und der Orientierung zur Plesná ausgerichtet. Im Untersuchungsgebiet ist das Plesnátal in der Nord-Südachse einzuordnen, so dass beispielsweise der Ort Hartoušov im Süden der drei Untersuchungsflächen liegt, und der Ort Milhostov im Norden. Der Messpunkt 0/0 befindet sich in allen untersuchten Standorten im Nordosten. Von diesem Punkt ausgehend verlaufen die Quertransecte in ostwestlicher, und die Längstransecte in nordsüdlicher Richtung (Abb. 2; der Nord-Pfeil ist leicht nach links

gekippt)). Somit verlaufen die Längstransecte parallel zu dem Verlauf der Počatky-Plesná-Störung, sowie zu der Fließrichtung der Plesná (Bankwitz et al. 2003).

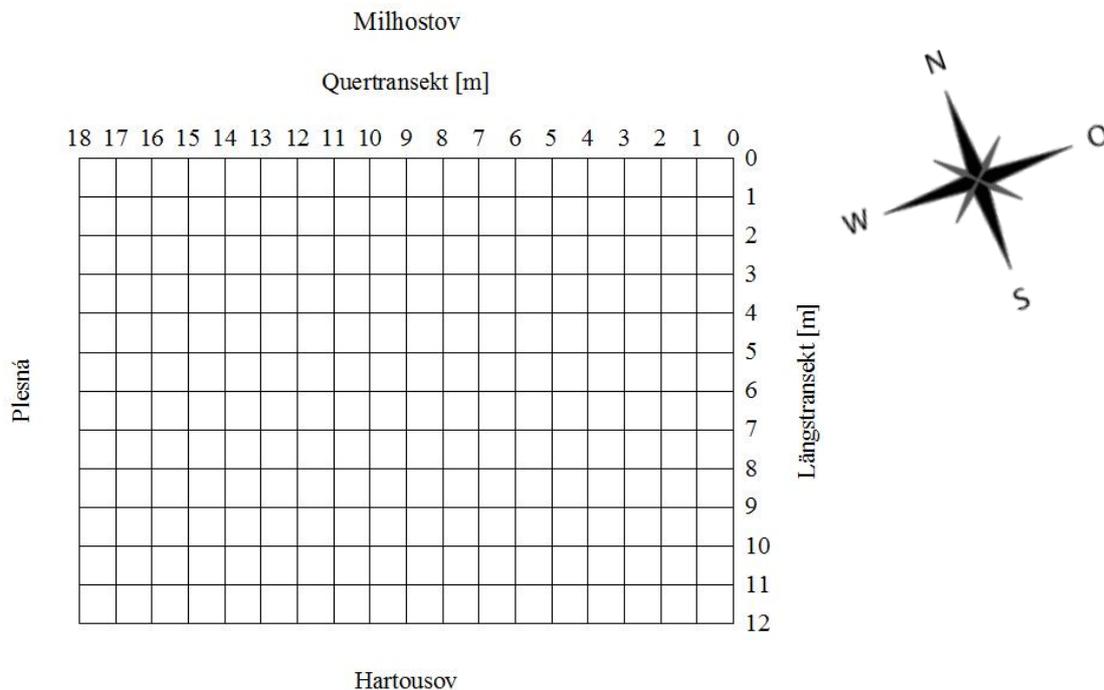


Abb. 2: Ausrichtung des Messrasters nach den Himmelsrichtungen am Beispiel der Birnenmofette. (Der Nordpfeil ist leicht nach links gekippt)

Des Weiteren wurden markante Punkte im Gelände für die Fixierung der Messraster genutzt (Dierschke 1994), beispielsweise Bäume, oder Sträucher.

Vor dem Hintergrund aussagekräftiger Vegetationsaufnahmen musste bei der Einrichtung hauptsächlich berücksichtigt werden, dass sich die Rastermaße für eine hohe Variabilität an Pflanzenarten in den Pflanzenbeständen eigneten (Dierschke 1994). Zusätzlich wurde beachtet, dass die Ausgasungszentren ungefähr im Zentrum der Mofetten lagen, die mittleren CO₂-Werte im Mofettenbereich 2% überschritten, und eine deutliche Unterscheidung der Mofettenzone von den Kontrollbereichen vorlag (Saßmannshausen 2010). In beiden Mofetten konnte diese Bedingungen ausreichend erfüllt werden (Kap. 3.1.1.1 und 3.2.1.1). In dem *Populus tremula*-Bestand konnte die Bedingung der mittigen Position des Ausgasungszentrums in der Mofette nicht erfüllt werden (Kap. 3.3.1.1). In diesem Fall wurde Wert darauf gelegt, dass sich alle Bäume innerhalb des Messrasters befanden.

2.2.1 Die Birnenmofette

Die Birnenmofette ist eine 216 m² große Fläche der Hangzone (Kap. 2.1.3), mit 247 bodenkundlichen Messpunkten, und 216 Einzelquadraten für die floristischen Aufnahmen. Die Quertransekte sind 18 m lang, und die Längstransekte 12 m. Der Name beruht auf der Existenz einer ungefähr 21 Jahre alten Wildbirne (*Pyrus pyraster*) im oberen südlichen Drittel der Mofette (Abb. 3). Sie hat ein sehr kümmerliches Erscheinungsbild, da sie im Ausgasungsbereich der Fläche wächst (Baakes 2009). Zu Beginn der Messungen im Jahr 2008 entwickelte die Wildbirne noch Blätter und sogar Früchte. Jedoch wurde im Laufe der Jahre die Ausbildung von Früchten vermehrt eingestellt und schließlich auch das Austreiben von Blättern. Inzwischen ist der verkümmerte Baum gänzlich abgestorben.



Abb. 3: Die Birnenmofette im Juli 2013. Blickrichtung von Osten nach Westen.

Im Süden des Standortes grenzt ein abgelassener Teich an. Die Transekte 11, 12 und 13 werden durch den ehemaligen Uferbereich bestimmt, wodurch der Boden in diesen Transekten besonders trocken, sandig, steinig und bröckelig ist. Bei der Abgrenzung der Untersuchungsfläche von der Umgebung wurde vor allem beachtet, dass die bodenkundlichen und floristischen Messungen zu hohen Variabilitäten in den Ergebnissen führten. Nach Saßmannshausen (2010) vertritt die Birnenmofette den *Calluna*-Typ, der im Untersuchungsgebiet vor allem auf trockenen Böden zu finden ist, im Übergangsbereich von schwachen zu mäßigen Ausgasungen. Dieser Mofetten-Vegetationstyp wird durch ein starkes Auftreten von *Calluna vulgaris* gekennzeichnet, das in mehr als 40% aller Aufnahmequadrate zu verzeichnen ist (Saßmannshausen 2010). Im Gegensatz zu einem anderen Mofetten-Vegetationstyp, dem *Calluna-Nardus*-Typ, ist hingegen *Nardus stricta* seltener zu finden.

2.2.2 Die Moosmofette

Die Moosmofette liegt in unmittelbarer Nähe zu der Birnenmofette (Abb. 1), und ist folglich auch in der Hangzone zu positionieren. Mit einer Fläche von 130 m² ist sie jedoch wesentlich kleiner. Gegenüber der Birnenmofette haben die Quertransekte eine Länge von 13 m und die Längstransekte 10 m. Diese Maße machen sich in der Anzahl der bodenkundlichen Messpunkte (n=154) und vegetationskundlichen Aufnahmequadrate (n=130) bemerkbar. Die Namensgebung beruht auf den hohen Deckungsgraden des Mooses *Pleurozium schreberi* (Thomalla 2009).



Abb. 4: Die Moosmofette im Juli 2013. Blickrichtung von Nordosten nach Nordwesten.

Vergleichbar mit der Birnenmofette ist bereits optisch eine Variation des Pflanzenbestandes innerhalb der Fläche zu erkennen, nach der die Abgrenzung von dem umgebenden Areal bestimmt wurde. Im Norden ist die Mofette durch einen Wassergraben begrenzt, der in der Vergangenheit vermutlich durch die Fläche führte. Ein Indiz dafür ist die Existenz einer Erle im Süden, die sich in einem sehr schlechten Zustand befindet. Sie entwickelt wenige Blätter, und von ehemals vier Sprossen ist noch einer erhalten. Der schlechte Zustand der Pflanze könnte auf die Verlegung des Baches zurückzuführen sein, wodurch sich die Standortbedingungen des Baumes geändert haben (Thomalla 2009). Die Moosmofette vertritt, wie die Birnenmofette, den *Calluna*-Typ.

2.2.3 Das Espenwäldchen

Der circa 1020 m² große Gehölzbestand grenzt unmittelbar an die Birnen- und Moosmofette. Die Quertransekte sind 30 m lang, und die Längstransekte 32 m. Dadurch ergeben sich 272

Messpunkte für bodenkundliche und 240 Aufnahmequadrate für floristische Untersuchungen. Die Baumschicht setzt sich hauptsächlich aus *Populus tremula* und *Quercus robur* zusammen. Für die physikalischen Messungen wurden 130 Espen dauerhaft nummeriert, und für die dendrochronologischen Untersuchungen war ein Abholzen von zehn Bäumen notwendig.



Abb. 5: Das Espenwäldchen im März 2011. Blickrichtung von Nordwesten nach Südosten.

2.3 Freilandmessungen

Zunächst werden jene Methoden und Arbeitsweisen erläutert die im Freiland stattfanden: Die Gasmessungen, die Bodenprobengewinnung, die Vegetationsaufnahmen, die Gasflussmessungen, die Messungen der Durchdringungswiderstände der Böden, und die Entnahme der Baum-Bohrkerne. Dabei werden die Methoden nochmals unterteilt in fortwährend angewendete, und einmalig durchgeführte. Begonnen wird mit den regelmäßig verwendeten Methoden. Alle angewendeten Methoden wurden in den drei Untersuchungsflächen nach derselben Vorgehensweise durchgeführt.

Während der Messungen dienten Bambusstäbe als Markierungshilfen, die die Transektanfänge und Enden kennzeichneten. Zwischen den Stäben wurden Messbänder ausgelegt, an denen die Transekte in der Birnen- und Moosmofette meterweise abgearbeitet werden konnten.

2.3.1 Messung der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen im Bodengas

In der Birnenmofette wurden die Gasmessungen im Jahr 2008 begonnen, und in der Moosmofette im Jahr 2009. Seither fanden diese Messungen in beiden Flächen jährlich im

März/April statt, und seit März 2012 auch vierteljährlich. Im Espenwäldchen fand eine einmalige Messung im Jahr 2011 statt. Dazu wurde ein Deponiegasmonitor des Typs GA 2000, der Firma Ansyco Karlsruhe, verwendet. Neben den untersuchten Gasen, können mit diesem Gerät gleichzeitig Methan, Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff gemessen werden (Ansyco GmbH Karlsruhe, Bedienungsanleitung deutsch V 1.2 GA 2000, 2006). Diese gasförmigen Stoffe werden bei den Untersuchungen, aufgrund ihres kaum nennenswerten Vorkommens, vernachlässigt. Zusätzlich wird der Umgebungsdruck angegeben.

Die Durchführung der Messungen geschieht nach folgender Vorgehensweise: An der Messstelle wird ein Bodenbohrstab von 1 m Länge mithilfe eines Schonhammers, der Marke Simplex, in den Boden auf die erforderliche Messtiefe getrieben. In dem Bohrloch werden dann die CO₂- und O₂-Konzentration gemessen. Dazu wurde ein Teflonschlauch in den Boden geführt. Die Ermittlung der Kohlendioxidkonzentrationen erfolgt über die Infrarot-Spektrometrie, während die Konzentration des Sauerstoffes chemisch analysiert wird. Das Kohlendioxid absorbiert das infrarote Licht (0,8 bis 500 µm), und nach dem Lambert-Beer'schen-Gesetz wird über das Maß der Lichtabsorption die Konzentration des CO₂ ermittelt (Hirner et al. 2009; Hein und Kunze 2012).

Bei den flächigen Aufnahmen werden die beschriebenen Arbeitsschritte einmalig für jeden Messpunkt durchgeführt. Für die Gasmessungen an den *Populus tremula*-Individuen wurden die Messungen dreimal um den Baum herum durchgeführt.

In beiden Flächen verliefen die Gasmessungen zu jeder Zeit störungsfrei, sodass die Datensätze jeder Messkampagne vollständig sind.

2.3.2 Vegetationsaufnahmen

Die seit 2008 (Birkenmofette), beziehungsweise seit 2009 (Moosmofette), jährlich durchgeführten Vegetationsaufnahmen fanden im Juni oder Juli statt. Im Espenwäldchen wurde die Vegetation einmalig im Jahr 2011 aufgenommen. Nach dem Entwicklungsrhythmus der meisten Pflanzenarten die auf den drei Untersuchungsflächen vorkommen sind diese Monate günstige Aufnahmezeiträume (Dierschke 1994). Die Bestimmung erfolgte nach Schmeil und Fitschen (2011).

In jeder Teilfläche der festgelegten Messraster wurde der Pflanzenbestand in der Krautschicht verzeichnet, unter Zuhilfenahme einer Vegetationstabelle (Abb. 6). Von den Hauptschichten eines Bestandes, die überwiegend durch die Wuchshöhe der Pflanzen voneinander abgegrenzt werden, ist die Krautschicht in 0,5 bis 1,5 m Höhe von pflanzensoziologischem Interesse

(Dierschke 1994). Deshalb wurde in den Vegetationsaufnahmen die Krautschicht aufgenommen, ergänzend jedoch auch die Baum- und Strauchschicht. Vor allem bei den Vegetationsaufnahmen im *Populus tremula*-Bestand waren auch die höheren Schichten des Bestandes von Interesse. Die Strauchschicht umfasst Gehölze die nicht höher als 5 m wachsen, und zu der Baumschicht gehören folgerichtig alle Gehölze mit über 5 m Wuchshöhe (Dierschke 1994).

Transekt IV																		
Aufnahmenummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Deckungsgrad [%]	90	85	80	80	90	90	90	80	100	100	100	100	100	100	90	90	90	90
Achillea millefolium	.	.	.	.	.	.	.	1.	4.	2.	2.	1.	4.	4.	1.	.	.	.
Agrostis capillaris	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.	2.
Alchemilla spec	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Alnus glutinosa	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Alopecurus pratensis	3	5-	3	2	4.	2.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Anthriscus sylvestris	.	r	r	.	2.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	2.	2.	4.
Arrhenatherum elatius	.	.	.	.	1	1.	2.	.	.	.	4.	1	.	.	.	.	.	.
Betula pendula	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2.
Polygonum bistorta	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Brachythecium salebrosum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Calluna vulgaris	.	.	.	.	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Campanula rotundifolia	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carex hirta	1	4.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Carex nigra	.	.	1.	.	.	.	.	2	1	1	2.	.	2.	.	.	1.	1	1
Carex ovalis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cirsium palustre	1.	2.	4.	2.	4.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Crataegus monogyna	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Deschampsia cespitosa	1	1	1	3	3	5	6	1	1.	7	5-	8	3	5	5	5	3	5
Deschampsia flexuosa	.	.	.	.	.	.	.	1	1	.	1.	.	2	2	.	.	.	2

Abb. 6: Ausschnitt aus einer Rohtabelle, beziehungsweise eines Handzettels, wie er im Feld angefertigt wird, aus der Vegetationsaufnahme von 2011, der Birnenmofette. Einzig die alphabetische Sortierung der Artenliste erfolgte nicht im Freiland. Die Artenliste im Freiland entsteht nach der Reihenfolge in der die Arten gesichtet wurden.

Diese Tabelle enthält die Transektnummer, die Nummer des Aufnahmequadrates, den Gesamtdeckungsgrad der einzelnen Quadrate, die Artenliste, sowie die Deckungsgrade (Dominanzen) der einzelnen Arten. Der Deckungsgrad „... ist ein Maß für die horizontale Ausdehnung in Bezug zu einer Grundfläche“, demnach „der prozentuale Anteil der Teilflächen, die bei senkrechter Projektion aller oberirdischen, lebenden Pflanzenteile einer Sippe auf dem Boden abgebildet werden (Flächenanteil, der bei senkrechtem Sonnenstand von einer Sippe beschattet wird)“ (Dierschke 1994). In den Kap 3.1.3, 3.2.3 und 3.3.2 wird festzustellen sein, dass die Dominanz, wie das Wort schon andeutet, Auskunft über die Konkurrenzkraft, die Wüchsigkeit und den Bauwert einer Pflanzenart gibt. Der Bauwert steht für die bestandsbildende Bedeutung einer Art. Für die Schätzung des Deckungsgrades stehen verschiedene Skalenarten zur Verfügung: 1) Skalen mit gleichmäßiger Abstufung, und 2) Skalen mit ungleichmäßiger Abstufung in den höheren, aber verfeinerter Abstufung in den unteren Bereichen. In den meisten Fällen findet die zweite Art Verwendung, da gerade in

artenreichen Pflanzenbeständen hohe Deckungsgrade selten zu vermerken sind (Dierschke 1994). Die Vegetationsaufnahmen der untersuchten Flächen basieren auf der Dezimalskala nach Londo. Diese Skala eignet sich im Besonderen für Aufnahmen in überschaubaren Dauerflächen. Im Gegensatz zur Braun-Blanquet-Skala, die 25%-Stufungen hat, ist die Londo-Skala kleinschrittiger aufgegliedert, und kann auf jeder Stufe noch verfeinert werden. Eine Gegenüberstellung der beiden Skalen wird in Tab. 3 vorgenommen.

Tab. 3: Gegenüberstellung der Londo- und der Braun-Blanquet-Skala, nach Dierschke (1994).

Londo-Skala			Braun-Blanquet-Skala		
Skala	Deckung%	Mittelwert	Skala	Deckung%	Mittelwert
.1	< 1	1	5	> 75-100	87,5%
.2	1-3	2	4	50-75	62,5%
.4	3-5	4	3	25-50	37,5%
1	5-15	10	2	5-25	15,0%
2	15-25	20	1	< 5	2,5%
3	25-35	30			
4	35-45	40			
5	45-55	50			
6	55-65	60			
7	65-75	70			
8	75-85	80			
9	85-95	90			
10	95-100	100			

Die im Freiland angefertigten Vegetationstabellen wurden dann editiert und überarbeitet (Abb. 7). Diese Version enthält zusätzlich die Artenzahl pro Aufnahmequadrat, sowie Prozentzahlen der Deckung. Des Weiteren wurden die Zeigerarten farblich markiert, die positiven orange und die negativen blau. Nach der Umwandlung der Stufen in Prozentzahlen existiert die Möglichkeit, Mittelwerte oder Anteile zu berechnen.

Transekt I																		
Aufnahmenummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Deckungsgrad [%]	100	100	100	70	55	50	80	20	90	90	100	95	90	80	90	90	90	90
Artenzahl	6	7	10	7	8	8	9	12	11	15	14	13	14	14	14	11	10	12
<i>Achillea millefolium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	1	1	0	0	0
<i>Agrostis capillaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Alchemilla spec</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Alnus glutinosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
<i>Alopecurus pratensis</i>	60	40	10	2	0	10	4	1	0	0	2	10	4	0	2	0	0	0
<i>Anthriscus sylvestris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	2	4	1	10	20
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	30	40	0	0	0	0	0	0
<i>Betula pendula</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Bistorta officinalis</i>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Brachythecium salebrosum (M)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Calluna vulgaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Campanula rotundifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Carex hirta</i>	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Carex nigra</i>	4	20	1	0	0	0	2	2	10	10	4	2	10	10	4	10	10	10
<i>Carex ovalis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cirsium palustre</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Crataegus monogyna</i>	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0	0	0	0	0	1	40	40	60	40	30	40	20	10	40	10	50	2
<i>Deschampsia flexuosa</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	30	10	0	2	0

Abb. 7: Ausschnitt aus der überarbeiteten Rohtabelle, aus der Vegetationsaufnahme von 2011, der Birnenmofette. Dieser Tabelle wurden die Artenzahlen pro Aufnahmequadrat hinzugefügt. Außerdem wurden die positiven Mofettenzeiger orange markiert und die negativen blau.

2.3.3 Verfahren der Bodenprobenentnahme

Für die Untersuchung verschiedener Bodeneigenschaften fand an jedem Messpunkt eine Bodenentnahme statt. Im Espenwäldchen wurden nur an den nummerierten Bäumen Proben gezogen. Die Proben wurden dann bis zur Analyse luftdicht verwahrt. Die Probenentnahme wurde wie folgt durchgeführt: Bei dem Entfernen des gewünschten Bodenbereiches aus dem Boden kam ein 1 m langer Bohrstock nach Pürckhauer zum Einsatz. Dieser ist im Besonderen für wiederholte flächenrepräsentative Entnahmen, mit kleinen Probemengen, geeignet, aber auch für die Begutachtung von morphologischen Schichten und Horizonten (Hartge und Horn 2009; Blume et al. 2011). Für die Probengewinnung wird der Pürckhauer mithilfe eines Hartplastikhammers, der Marke Simplex, 40 cm tief in den Boden getrieben. Anschließend wird der Bohrstab einmal und die eigene Achse gedreht, und unter wiederholtem Drehen aus dem Boden entfernt. Das Drehen bewirkt, dass der gewünschte Bohrkern von den umgebenden Bodenbereichen getrennt wird, sodass sich im Inneren des Bohrstabes einzig die unverfälschte Probe befindet (Hartge und Horn 2009). Für die Messungen der verschiedenen Parameter war hauptsächlich der Bodenbereich zwischen 7 und 13 cm Tiefe von Interesse, denn in den obersten Bodenschichten bilden Pflanzen ihre Hauptwurzelmasse aus, die dann mit zunehmender Tiefe abnimmt (Kutschera 1960). Unter Zuhilfenahme eines Zollstockes wurde das erforderliche Probenstück von dem Rest des Bohrkerns sondiert, und in 20 ml Hartplastik-Scintillationsgefäße verpackt, die luftdicht verschlossen wurden.

2.3.4 Gasfluss-Messungen

Die Gasflussmessungen in der Birnen- und Moosmofette fanden im März 2013 statt. Vor dem Hintergrund der noch nicht begonnenen Vegetationsperiode der Pflanzen, und der geringen Bodenatmung (Mielnick und Dugas 2000; Frank et al. 2002) war dieser Zeitraum günstig. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen (Vodnik et al. 2009) sollte vor den Messungen die Grasnarbe nicht entfernt werden. Daher war es notwendig die Gasflussmessungen zu einem Zeitpunkt durchzuführen wenn die Vegetation noch nicht im Wachstum begriffen ist, damit die Akkumulationskammer mit möglichst wenigen Hindernissen auf den Boden gebracht werden konnte. An den Messungen des CO₂-Flusses war das Messsystem von West Systems Portable diffuse flux meter Carbon dioxide hi-flux, mit folgenden Einzelkomponenten, beteiligt (West Systems Portable diffuse flux meter Carbon dioxide hi-flux Handbook Release 7.00 August 2007):

1. Dräger Polytron IR CO₂ Detektor
2. Accumulation Chamber type A
3. Brand Acer n300 (Palmtop PDA).

Zwischen der Akkumulationskammer und ihrer Wasserfalle wurde eine zusätzliche selbst angefertigte Wasserfalle eingebaut, um den Schutz vor aufkommender Feuchtigkeit in dem Messgerät noch zu verbessern. Diese Wasserfalle bestand aus einem Stück Hartplastikschlauch, der mit Silica Gel Orange (1-3 mm, mit Indikator, Perlform), der Firma Roth, gefüllt, und jeweils an den Enden mit Stücken eines Haushaltsschwammes verschlossen wurde.

Der CO₂-Fluss wurde an jedem Messpunkt der beiden Messraster gemessen und zwar vor den Konzentrationsmessungen. Die entstehenden Bohrlöcher würden den Gasfluss eventuell, aufgrund der lokalen Minimierung von Bodenhindernissen für das Aufsteigen des Kohlendioxids verändern. Für die Messungen fand eine Präparation der Messstellen statt, indem störende Pflanzen- oder Bodenbestandteile entfernt oder nieder gedrückt wurden. War die Akkumulationskammer ordnungsgemäß auf dem Boden platziert, konnte schließlich der Ventilator eingeschaltet werden. Die Ergebnisse erscheinen augenblicklich auf dem Bildschirm:

1. Die Kohlendioxidkonzentration in ppm
2. Die Steigung in ppm/s
3. Der ermittelte Regressionsfaktor.

Aufgrund der Messung des Gasflusses als Veränderung der CO₂-Konzentration über die Zeit, musste der Fluss aus den teilweise ermittelten Werten, sowie eines Akkumulationskammer-

Faktors, berechnet werden. Der Faktor wird aus dem barometrischen Druck in mBar, einer Gaskonstante in $\text{L bar/mol}^{-1} \text{K}^{-1}$, der Lufttemperatur in Kelvin, dem Kammervolumen in Kubikmetern und der Kammerfläche in Quadratmetern berechnet. Die Einheit ist $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}/\text{ppm s}^{-1}$. Die Akkumulationskammer-Faktoren werden von dem Hersteller für die entsprechende Kammer berechnet und sind dem Handbuch zu entnehmen. Dafür werden des Weiteren die Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] und der Luftdruck [mBar] benötigt (West Systems Portable diffuse flux meter Carbon dioxide hi-flux Handbook Release 7.00 August 2007). Beide wurden dem Internet (aus Internetquelle 2) von einer Wetterstation der 8 km entfernten Stadt Cheb entnommen. Unter Zuhilfenahme dieser beiden Werte und dem Handbuch wird der Faktor abgelesen. Der Gasfluss [$\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$] ergibt sich schließlich aus dem Wert der Steigung in ppm/s multipliziert mit dem Akkumulationskammer-Faktor (West Systems Portable diffuse flux meter Carbon dioxide hi-flux Handbook Release 7.00 August 2007).

2.3.5 Untersuchung der Penetrationswiderstände der Böden

Die Durchdringungswiderstände in den Böden der Birnen- und Moosmofette wurden im März 2013, unter Verwendung eines Penetrologgers (Eijkelkamp Agrisearch Equipment) ermittelt. Vor dem Beginn eines Messdurchlaufes musste der Penetrologger programmiert und zusammengebaut werden.

Die Durchführung der Messung ging schnell von statten. Die Tiefenbezugsplatte wurde an der Messstelle gerade auf den Boden gelegt. War dies nicht möglich wurden störende Pflanzenteile entfernt oder nieder gedrückt. Anschließend wurde der Konus in den Boden getrieben, wobei darauf zu achten war, dass dieser Vorgang weder zu schnell, noch zu langsam von statten ging, denn dann wurde die Messung von dem Gerät abgebrochen, und musste wiederholt werden. Eine zu schnelle und stoßweise Vorgehensweise bei der Messung führt zu wenig repräsentativen Ergebnissen. Daher besitzt der Penetrologger eine eingebaute Steuerung für die Penetrationsgeschwindigkeit. Bei der Bestimmung der Eindringtiefe durch das Gerät kam die Tiefenbezugsplatte zum Einsatz. Mithilfe eines internen Ultraschallsensors und des Reflektierens der Ultraschallwellen durch die Tiefenbezugsplatte, konnte mit hoher Genauigkeit die Eindringtiefe ermittelt werden. Um die Tiefenmessung über den Ultraschall nicht zu stören, musste darauf geachtet werden, dass sich keine Hindernisse unter dem Penetrologger befanden, und dass kein Wind unter dem Gerät wehte. Nach Beendigung der Penetration konnte der Konus wieder aus dem Boden entfernt werden. Die gemessenen Widerstände in Megapascal [MPa] wurden automatisch in dem Penetrologger gespeichert, und konnten sowohl graphisch, als auch numerisch begutachtet werden. Zusätzlich wurden sie

am Ende eines Aufnahmetages aus dem Gerät gelesen, und auf den Computer übertragen (Eijkelkamp Agrisearch Equipment Penetrologger Gebrauchsanweisung September 2012).

2.3.6 Entnahme der Baum-Bohrkerne

Die Holzproben der zu untersuchenden *Populus tremula*-Exemplare wurden im September 2011, mithilfe von Zuwachsbohrern der Firma SUUNTO, Finnland genommen. Es wurde sowohl der Weichholz- als auch der Hartholzbohrer verwendet.

Für die Probennahme wurde der Bohrer in einem 90°-Winkel in Brusthöhe (130 bis 140 cm) auf dem Stamm positioniert (IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Zuwachsbohrer Anleitung und Pflege, Holz-Labor Dr. K. Joos).

Aufgrund der Schiefelage einiger Exemplare wurden zwei Bohrkerne pro Individuum genommen. Eine Probe aus dem Zugholz des Stammes, die zweite aus dem Druckholz.

Die gezogenen Bohrkerne wurden zur Aufbewahrung in verschließbare nummerierte Probenbeutel verpackt, und bis zur Verarbeitung kühl gelagert.

2.3.7 Messung der Strahlungsintensität

Die Messung der Strahlungsintensität (PAR= photosynthetic active radiation) fand während einer Messkampagne im September 2011 an einem wolkenfreien Messtag statt. Für die Messung wurde ein Lichtmessgerät der Firma LI-COR, USA (LI-COR, Quantum/Radiometer/Photometer, Model LI-250 Light Meter) verwendet, mit einem Sensor ebenfalls von der Firma LI-COR, USA (LI-COR, Sensor Model Quantum). Vor dem Beginn der Messungen wurde das Gerät kalibriert. Bei den Messungen wurde der Sensor möglichst gerade zum Himmel gerichtet positioniert. Eine Messung wurde in 1 m Höhe durchgeführt, die zweite auf der Erdoberfläche. Die Werte in $\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ wurden auf dem Display des Lichtmessers angezeigt.

2.3.8 Messung der Stammdurchmesser

Die Stammdurchmesser von 118 *Espen*-Exemplaren wurden im September 2011 gemessen. Diese Messungen wurden mithilfe einer Messkluppe der Firma Nestle (Nestle, Messkluppe Ameise 30 cm) vorgenommen. Die Ermittlung des Stammdurchmessers wurde in Brusthöhe (130 bis 140 cm Höhe des Stammes) durchgeführt. Die teilweise beweglichen Schieber auf der zentimeterskalierten Messschiene wurden im 90°-Winkel eng um den Stamm gelegt. Die Stammdurchmesser konnten dann anhand der Position des beweglichen Schiebers auf der Skala abgelesen werden.

2.3.9 Messung der Baumhöhen

Die Messungen der Baumhöhen an 118 nummerierten Espen-Exemplaren wurden im September 2011 mithilfe eines Spiegelrelaskopes nach Bitterlich durchgeführt. Dieses forsttechnische Messinstrument ist sehr vielseitig einsetzbar. Neben Höhenmessungen von Bäumen können mit dem Spiegelrelaskop Grundflächen bestimmt werden, aber auch Stammdurchmesser, Gefälle oder Abstände.

Die Baumhöhe muss mithilfe von zwei Ablesewerten ermittelt werden. Ein Wert gibt die Höhe des Scheitels (h_1) an, der zweite ist am Grund des Baumes (h_2) abzulesen. Die Höhe errechnet sich dann aus der Differenz der beiden Werte (h_1-h_2) (Kramer und Akça 1982).

2.3.10 Aufnahme der Lentizellen

Die Anzahl der Lentizellen pro Fläche wurde im März 2012, an 35 ausgesuchten Bäumen aufgenommen. Nach den CO_2 -Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe wurde eine Kontrollgruppe festgelegt, sowie eine CO_2 -Gruppe. Der Festlegung der Bäume liegen die CO_2 -Messungen von März 2012 zugrunde. Die Kontrollbäume wachsen auf nicht-gasenden Stellen des Bestandes, während die CO_2 -Bäume auf gasenden Bereichen wachsen, mit 25 bis 50% Kohlendioxid in 40 cm Bodentiefe. Für die Erfassung der Lentizellen wurde ein quadratisches Stück Maschendraht verwendet. Dieses bestand aus 100 Teilflächen mit Seitenlängen von 14 x 14 mm. Das Raster wurde in jeder Himmelsrichtung an den Stamm gehalten, in ungefähr 10 bis 15 cm über dem Boden. Anschließend wurde ein Photo gemacht. Das Auszählen der Lentizellen fand dann in der Universität Duisburg-Essen am Computer statt. Die Lentizellen wurden getrennt nach den Himmelsrichtungen gezählt. Pro Teilfläche wurde die Anzahl der Lentizellen erfasst und anschließend aufsummiert.

2.4 Laboruntersuchungen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die Methoden und Arbeitsweisen erläutert, die in den Laboren der Universität Duisburg-Essen, Fakultät Biologie, Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie, angewendet wurden. Hierbei handelt es sich um die Messungen verschiedener Bodenfaktoren und der physikalischen Untersuchungen der Bohrkerne. Die Untersuchungen der Stickstoffgehalte und der Dendrochronologie wurden in Laboren anderer Universitäten durchgeführt.

2.4.1 Bestimmung des Trockengewichtes der Bodenproben

Nach der Bestimmung des Frischgewichtes direkt im Anschluss der Probennahme, erfolgte die Bestimmung des Trockengewichtes. Erst nach diesem Verarbeitungsschritt konnten die Bodenproben für weitere Untersuchungen verwendet werden.

Die Trocknung der Proben in einem Trockenschrank (Firma Memmert) dauerte vier Tage bei 105 °C. Bei dieser Temperatur wird das Bodenwasser entfernt. Wasseranteile die ausschließlich unter höheren Temperaturen aus dem Boden gelöst werden können, werden nicht zum Bodenwasser gerechnet, sondern zum Kristallwasser der festen Bodenbestandteile (Schinner et al. 1993; Scheffer und Schachtschabel 2010). Nach vier Tagen wurden die trockenen Proben erneut gewogen. Auf diese Weise konnte der Wassergehalt ermittelt werden (Hartge und Horn 2009).

Nach Mückenhausen (1993) ist es notwendig mehrere Wassergehaltsbestimmungen im Jahreslauf durchzuführen, da diese Bodenvariable keine statische Größe ist. Vielmehr unterliegt sie ständigen Schwankungen, verursacht durch unregelmäßige Wasserzufuhr oder Verlust.

2.4.2 Messung des pH-Wertes und der elektronischen Leitfähigkeit der Böden

Vor den nächsten Analyseschritten mussten die getrockneten Bodenproben, mithilfe von Mörser und Pistill, zermörsert werden. Unter anderem wurden dabei das Bodenskelett sowie größere Pflanzenbestandteile aus den Proben entfernt.

Für die Messung des pH-Wertes wurden 750 mg Boden in ein gläsernes 20 ml Schnappdeckelgläschen überführt. Anschließend wurden diese mit 15 ml vollentkalktem Wasser aufgefüllt und verschlossen. Damit sich die Bodenbestandteile ausreichend in dem Wasser lösen konnten, wurden die Gläschen eine Minute lang geschüttelt und dann eine Stunde stehen gelassen. Dadurch setzten sich die groben Bodenbestandteile am Boden des Gläschens ab. Diese Arbeitsweise ermöglicht das Lösen der H^+ -Ionen aus den festen Bestandteilen in das wässrige Medium. Die Messungen erfolgten dann unter Verwendung eines elektronischen pH-Meters (WTW Microprocessor pH/ION Meter pMX 3000), an das eine pH-Elektrode der Firma Schott (Schott Blue Line 23) angeschlossen war. Für die Bestimmung des pH-Wertes wurde die pH-Elektrode in die Bodenlösung geführt, wobei darauf geachtet wurde, dass sie nicht den Boden berührte, und die abgesetzten Bodenbestandteile aufwirbelte. Nach 5 bis 10 min hatte sich der pH-Wert soweit stabilisiert, dass er mit zwei Dezimalstellen notiert werden konnte.

Mit den für die Bodenaziditätsmessung angefertigten Bodenlösungen konnte im direkten Anschluss die elektronische Leitfähigkeit des Bodens ermittelt werden. Diese Variable ist von der Menge gelöster Ionen einer Bodenlösung abhängig. Je höher die Ionenkonzentration eines wässrigen Mediums ist, desto besser wird elektrischer Strom geleitet (Blume et al. 2011).

Die Leitfähigkeit [mS/cm] wurde mithilfe eines Konduktometers (WTW Microprocessor Conductivity Meter LF 196) und der dazugehörigen Leitfähigkeitsmesszelle gemessen, die in die Bodenlösung getaucht wurde.

2.4.3 Untersuchung des organischen Anteils an den festen Bodenbestandteilen

Die Bestimmung des organischen Anteils an der festen Bodensubstanz vollzog sich über die Gewichts Differenz der Proben nach Glühverlust (Veraschung). Diese Methode hat sich aufgrund ihrer einfachen Handhabung für die C-Bestimmung durchgesetzt (Blume et al. 2011).

Für die Veraschung im Muffelofen (Firma Heraeus) wurde 1 g Boden in ein 20 ml Schnappdeckelgläschen überführt, von dem zuvor das Leergewicht bestimmt wurde. Die fertigen Probengefäße wurden auf einer feuerfesten Platte platziert und in den auf 405 °C vorgeheizten Muffelofen gestellt. Die Dauer des Verbrennens der organischen Bestandteile betrug acht Stunden. Anschließend kühlten die Proben 18 Stunden in dem Ofen ab und wurden dann direkt gewogen. Aus der Differenz des Probengewichtes vor und nach der Veraschung ließ sich der prozentuale Anteil des organischen Mengenanteils berechnen.

Bei der Probenentnahme wurden noch intakte Pflanzenteile nicht aus der Bodenprobe entfernt, sodass sich sowohl intakte, als auch abgestorbene Pflanzenreste in dem erforderlichen Bodenstück befanden. Jedoch können noch lebende Pflanzenbestandteile nicht in den Humusgehalt eingerechnet werden, denn dieser bezieht sich ausschließlich auf abgestorbene organische Bestandteile im Boden. Infolgedessen konnte durch das oben beschriebene „Vermuffeln“ nicht der Humusgehalt der Böden in den Mofetten ermittelt werden, sondern die Menge der organischen Substanz.

2.4.4 Fractometrische und dendrochronologische Untersuchungen

Die dendrochronologischen Untersuchungen wurden durch Dr. Monika Vejpusťková am Forestry and Game Management Research Institute, Department of Forest Ecology Strnady 136, 252 02 Jiloviště, Czech Republic, durchgeführt.

Die physikalischen Holzuntersuchungen wurden unter Zuhilfenahme eines Fractometers III (Firma IML, Deutschland) gemacht. Das Fractometer bietet die Möglichkeit, eine Festigkeitsbestimmung des Holzes bei kleinen Probengrößen vorzunehmen.

Die Bestimmung der Holzfestigkeit erfolgt durch das Versagen des Holzes unter Spannungen. Ist folglich die aufgebrachte Spannung auf das Holz höher als die Festigkeit, zerbricht es. An einem Baumstamm können vier mechanische Belastungsarten verursacht werden, die unterschiedliche Festigkeiten erfordern:

1. Die Biegefestigkeit eines Baumes wird beansprucht wenn starke Windbewegungen auf die Krone einwirken. Unter derartigen Bedingungen überträgt die Baumkrone Spannung auf den Stamm, in Form von Druck-, Zug- oder Schubspannungen. Die Festigkeitskenngrößen die Informationen über die Biegefestigkeit enthalten sind die radiale Scherfestigkeit in Faserrichtung und die tangentielle Scherfestigkeit in Faserrichtung.
2. Die Zugfestigkeit wird durch Biegungen des Stammes belastet. Wird ein Stamm in eine Richtung gebogen, beispielsweise durch Windbewegungen, oder er wächst schief um höhere Belichtungsintensitäten zu erreichen, wird auf einer Seite des Stammes Zug erzeugt, und auf der anderen Druck. Mit der radialen Zugfestigkeit wird überprüft wie stark die Zugfestigkeit eines Stammes ist.
3. Druckfestigkeiten eines Holzes werden mithilfe der axialen Druckfestigkeit überprüft. Die Druckfestigkeit wird für den Ausgleich von Druckspannungen auf den Stamm benötigt, die durch Biegungen verursacht werden.
4. Die Scherfestigkeit eines Stammes wird beansprucht wenn durch starke Windbewegungen starke Seitenäste eines Stammes bewegt werden. Durch die Bewegungen wird der Stamm auf Torsion (Verdrehungen) belastet. Die Scherfestigkeit wird mithilfe der tangentialen Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung überprüft (Götz und Mattheck 1999).

Für die Messung der beschriebenen Festigkeitskenngrößen benötigt ein Fractometer III verschiedene Bestandteile (Götz und Mattheck 1999).

Die gezogenen Bohrkern der Espen wurden ungefähr 30 bis 60 min nach der Entnahme weiterverarbeitet. Vier Festigkeitskenngrößen wurden an jeder Probe untersucht:

1. radiale Scherfestigkeit in Faserrichtung
2. tangentielle Scherfestigkeit in Faserrichtung
3. tangentielle Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung
4. axiale Druckfestigkeit.

Für die Ermittlung der Widerstandskräfte der Holzproben gegen die unterschiedlichen Spannungen wurden Stücke der Bohrkerne in die Einspannvorrichtung eingespannt.

Für die Bestimmung der tangentialen Scherfestigkeiten in und senkrecht zur Faserrichtung wurden die Probenstücke in Station 3 der Einspannvorrichtung platziert. Für die korrekte Messung der tangentialen Scherfestigkeit in Faserrichtung müssen die Fasern der Holzprobe parallel zu der Belastungsrichtung liegen. Für die Ermittlung der tangentialen Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung müssen die Fasern senkrecht zur Belastungsrichtung stehen.

Die Überprüfung der radialen Scherfestigkeit in Faserrichtung erfolgte an Station 2 der Einspannvorrichtung. Das Probenstück wurde mit den Fasern zur Belastungsrichtung in der Station eingespannt.

Für die Bestimmung der axialen Druckfestigkeit musste die Probe in Station 4 eingespannt werden, wobei die Holzfasern parallel zur Belastungsrichtung verlaufen mussten (Götz und Mattheck 1999).

Die Messungen der Festigkeitskenngrößen werden nacheinander durchgeführt, es können nicht alle Stationen zugleich mit einem Probenstück belegt werden.

Befindet sich ein Stück eines Bohrkerns in einer Station der Einspannvorrichtung wird das Handrad langsam und kontinuierlich gedreht. Durch das Drehen des Rades wird über den verstellbaren Hebelarm Kraft auf die Einspannvorrichtung übertragen, und folglich auf das Probenstück. Die Kraft wird erhöht bis die Spannung größer ist als der Widerstand des Holzes, und die Probe versagt, beziehungsweise zerbricht. Die maximal aufgewendete Kraft die zum Zerbersten des Holzstückes geführt hat, ist auf der Kraftmessuhr mithilfe eines Schleppzeigers abzulesen (Götz und Mattheck 1999). Je nach Widerstandskraft eines Probenstückes musste der Kraftbereich am Fractometer verstellt werden. Bei einem raschen Versagen der Probe musste der Kraftbereich auf die maximale Kraft von 100 N festgelegt werden. In der Situation, dass nicht genügend Kraft auf die Probe übertragen werden konnte, wurde der Kraftbereich mit maximalen Kräften bis 1000 N eingestellt (IML Deutschland, Fractometer III Gebrauchsanweisung und Gewährleistungsbestimmung). Die Werte für die Festigkeitskenngrößen werden in Newton angezeigt (Götz und Mattheck 1999). Für die nächste Messung wird das zerbrochene Probenstück aus der Station entfernt und verworfen. Des Weiteren muss der Schleppzeiger der Kraftmessuhr wieder auf Null gestellt werden.

Für die weitere Verwendung der gemessenen Daten wurden sie in Megapascal umgerechnet.

2.4.5 Bestimmung der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte

Im Juni 2014 wurden die Bodenproben für die Bestimmung der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte, sowie für die Wiederholung verschiedener Bodenuntersuchungen in der Birnenmofette gezogen. Die Vorgehensweise bei der Probenentnahme ist in Kap. 2.3.3 nachzulesen.

In den Laboren der Universität Duisburg-Essen sind die pH-Werte, die Bodenwassergehalte und die organischen Gehalte der Bodenproben ermittelt worden. Die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte wurden an der Universität Hohenheim, am Institut für Bodenkunde und Standortslehre, zugehörig zum Fachgebiet Bodenchemie und Pedologie, unter Univ.-Prof. Dr. Thilo Rennert durchgeführt.

2.5 Datenverarbeitung und Statistik

Für die Verarbeitung der gesammelten Daten, das Erstellen der Abbildungen, die statistischen Auswertungen und das Anfertigen der Arbeit wurden verschiedenste Programme genutzt.

2.5.1 Datenverarbeitung

In Tab. 4 sind die verwendeten Programme aufgeführt, sowie deren Einsatzbereiche.

Tab. 4: Auflistung der verwendeten Microsoft Office Professional Plus® 2007 Programme und der Bildbearbeitungsprogramme, sowie deren Einsatzbereiche.

Programm	Einsatzbereich
Word 2007	Erstellen der Arbeit
Excel 2007	Dateneditierung, Anfertigen von Graphiken und Tabellen, statistische Auswertungen
Power Point 2007	Bildbearbeitung
Paint 2007	Bildbearbeitung
Sigma Plot 12.0	Bildbearbeitung
Adobe Photoshop CS5	Bildbearbeitung

2.5.1.1 Anfertigen von Abbildungen der flächig gemessenen Bodenparameter

Für die Darstellung der flächig erhobenen Bodenparameter, sowie der Vegetation, wurde das Programm Sigma Plot 12.0, der Firma Systat Software GmbH, verwendet. Des Weiteren wurden die Abbildungen der jährlichen und vierteljährlichen Gasmessungen, in Abhängigkeit

von den Wetterbedingungen mithilfe dieses Programmes angefertigt. Folglich wurden folgende Abbildungen unter Verwendung dieses Programmes erstellt:

- ❖ Die CO₂- und O₂-Konzentrationen
- ❖ Der Gasfluss
- ❖ Das Bodenwasser
- ❖ Der pH-Wert
- ❖ Die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte
- ❖ Der Anteil der organischen Substanz an den festen Bodenbestandteilen
- ❖ Die Bodendichte (Flächen- und Transektabbildungen)
- ❖ Die Leitfähigkeit (im Anhang)
- ❖ Alle graphischen Darstellungen der Vegetation
- ❖ Die Strahlung (PAR) im Espenwäldchen
- ❖ Graphische Abbildungen der temporären Konzentrationsvariationen im Zusammenhang mit den Wetterfaktoren

Das Programm bietet die Möglichkeit viele Daten in einem bunt gefärbten Konturgraphen darzustellen. Diese Graphen basieren auf einem XYZ-Koordinatensystem, indem die Z-Daten, zum Beispiel die CO₂-Werte mithilfe von Konturlinien dargestellt werden (Systat Software GmbH Sigma Plot 11.0 Handbuch Teil 1). Demnach konnten die Rohdaten der Messungen in die Verarbeitung eingebracht werden, keine Mittelwerte, oder ähnliches. Des Weiteren nimmt das Programm eine automatische Füllung der Konturen vor, wobei die Füllung bei dem niedrigsten Z-Wert beginnt, beispielsweise bei der niedrigsten CO₂-Konzentration (Systat Software GmbH Sigma Plot 11.0 Handbuch Teil 1). Um eine effiziente Übertragung der Messraster auf die Abbildungen zu ermöglichen, wurde der Beginn der Achsenskalierungen bei Null festgelegt. Dadurch konnten für die Abszisse und die Ordinate stets die gleichen Skalierungen verwendet werden, die den reellen Messrastern der untersuchten Flächen entsprechen. Zudem besteht die Möglichkeit dem Graphik-Assistenten sowohl die Z-Intervalle, als auch die Farben benutzerdefiniert vorzugeben. In diesem Fall werden die Z-Intervalle und Füllfarben gestreckt und interpoliert, sodass sie miteinander übereinstimmen (Systat Software GmbH Sigma Plot 11.0 Handbuch Teil 1) Auf diese Weise konnten für alle Bodenparameter und für die Vegetation die Z-Intervalle und Farben selbst definiert werden, wodurch unterschiedliche Gewichtungen innerhalb der Wertebereiche der erhobenen Datensätze aussagekräftig herausgearbeitet werden konnten (Abb. 8).

Die graphische Darstellung der gesammelten Datensätze, sowohl die der Bodeneigenschaften, als auch die der Vegetation, nach der oben beschriebenen Vorgehensweise mit dem

Programm Sigma Plot 12.0, hat Vorteile gegenüber der Darstellungsweise die mit dem Excel-Programm erreicht werden kann. In Abb. 8 sind mehrere Darstellungsvarianten der CO₂-Konzentrationen gegenübergestellt. In Abb. 8a sind die CO₂-Werte in 10 cm der Moosmofette mit Excel dargestellt. Ein Vorteil dieser Darstellungsweise ist, dass die genauen CO₂-Werte für den Betrachter ersichtlich sind. Dies kann jedoch zugleich ein Nachteil sein, denn die Abbildung wirkt durch die Zahlen unterbrochen, es entsteht kein zusammenhängendes Abbild der Ausgasungsbereiche. Unterstützt wird dieser Nachteil noch durch die scharfen Kanten der einzelnen Zellen, wodurch keine fließenden Übergänge entstehen, wie beispielsweise in Abb. 8b. Für die Anfertigung dieser CO₂-Abbildung kam das Programm Sigma Plot 12.0 zum Einsatz. Direkt ist auffallend, dass die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Konzentrationsbereichen abgerundet, beziehungsweise fließend sind. Dadurch entsteht ein Bild der Kohlendioxidkonzentrationen das der reellen CO₂-Verteilung innerhalb der Fläche nahe kommt. Zwar gibt es bei der Betrachtung nicht die Möglichkeit gleichzeitig auch die gemessenen Werte zu überblicken, jedoch eignet sich diese Darstellungsweise hervorragend für einen Überblick über das CO₂-Vorkommen in einer Mofette. In dieser Form hat diese Abbildung, ungeachtet des gerade beschriebenen Vorteils, jedoch auch Nachteile, im Vergleich mit der Excel-Abbildung. In diesem Falle wurden alle Einstellungen automatisch durch das Programm vorgenommen, die Z-Intervall- und Achsenskalierungen, sowie die Füllfärbung. Die Transekte beginnen dadurch bei 1 m statt bei 0 m, die 2%-Isolinie (Kap. 2.2) ist nicht in die Skalierung eingearbeitet, und die Skalierung endet mit dem Höchstwert des Datensatzes, bei 30%. Diese Skalierung ist nicht unkorrekt, jedoch sollten für eine bessere Vergleichbarkeit aller Kohlendioxid-Abbildungen alle Z-Intervalle gleich sein, und stets die CO₂-Konzentrationen von 0 bis 100% enthalten. Dies ist ebenfalls für Vergleiche der anderen Bodeneigenschaften wichtig, vor allem auch wenn Abbildungen verschiedener Mofetten miteinander verglichen werden. Außerdem wäre es für ein genaueres Abbild des reell erarbeiteten Messrasters sinnvoll, wenn die Achsenskalierungen den im Freiland betitelten Messpunkten entsprechen.

An diesem Punkt kommt der wichtige Vorteil Sigma Plot-Programmes zum Tragen, benutzerdefinierte Einstellungen vornehmen zu können. Auf diese Weise können die Achsenskalierungen und Z-Intervalle verändert werden (Abb. 8c,d). Der Unterschied zwischen den Abb. 8c,d befindet sich in der Definition der Z-Intervalle, und in der Füllung der Konturlinien. In Abb. 8c wurden die Z-Intervalle benutzerdefiniert, jedoch ist die Färbung durch das Programm vollzogen worden. Im Vergleich zu Abb. 8b allerdings ist der niedrige Konzentrationsbereich derart fein aufgefächert, dass die vielen verwendeten Blautöne des

Programmes kaum zu unterscheiden sind. Aufgrund dieser Kritik entstand letztendlich die Abb. 8d, in der die Z-Intervalle im unteren Wertebereich verändert wurden, und die voreingestellte Füllung wurde durch eine benutzerdefinierte ersetzt. Die Anzahl der blauen Farben konnte um die Hälfte reduziert werden, wodurch sie wesentlich einfacher zu unterscheiden sind. Außerdem kommen dadurch die anderen Farbtöne besser zur Geltung. Diese Darstellungsweise der Kohlendioxidkonzentrationen findet in der gesamten Arbeit Verwendung.

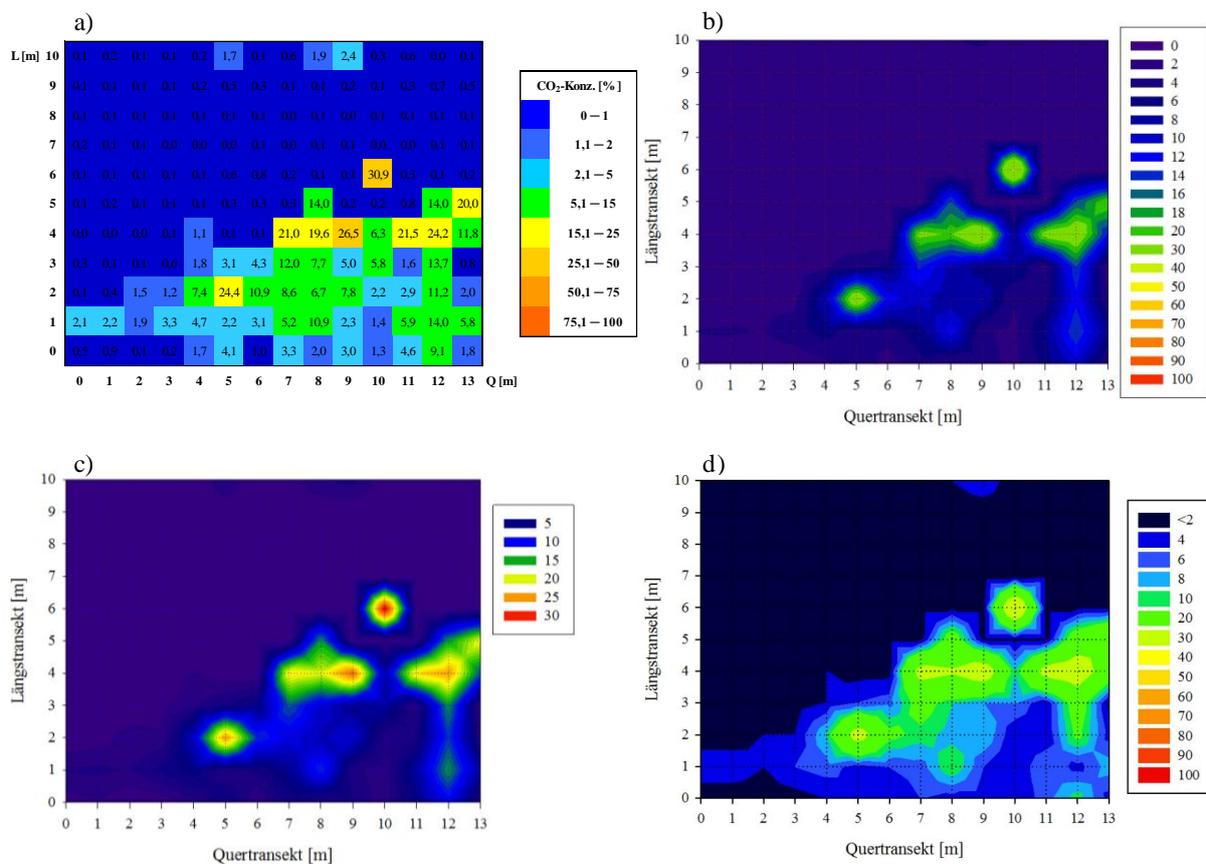


Abb. 8: Vergleich von graphischen Darstellungen der CO₂-Konzentration in 10 cm Bodentiefe der Moosmofette gemessen im März 2009, die mit unterschiedlichen Programmen, oder Programmeinstellungen angefertigt wurden. a) Verwendung des Excel-Programms 2007, b) Anfertigung durch Sigma Plot 12.0 mit automatischer Z-Intervall- und Achsenskalierung, sowie voreingestellter Färbung, c) Anfertigung mit Sigma Plot 12.0 mit benutzerdefinierter Z-Intervall- und Achsenskalierung, jedoch voreingestellte Färbung, d) ebenfalls Anfertigung mit Sigma Plot 12.0, alle Einstellungen benutzerdefiniert. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen.

Durch die standardisierte Anfertigung der Abbildungen unter Zuhilfenahme der zur Verfügung stehenden Optionen wurde eine präzise Vergleichbarkeit der dargestellten Parameter, in allen drei Untersuchungsstandorten erreicht. Für eine fundierte ökologische Charakterisierung der Mofetten ist dies von Bedeutung. Denn die einzelnen Flächendarstellungen der Bodenfaktoren, und der Vegetation, werden nicht ausschließlich

separat analysiert, sondern auch immer vor dem Hintergrund möglicher Wechselwirkungen mit anderen Parametern.

Durch die Gelegenheit benutzerdefinierte Einstellungen über den Graphik-Assistenten einzugeben konnten die Z-Intervalle, sowie die farblichen Markierungen für die darzustellenden Datensätze in allen Untersuchungsflächen gleich gehalten werden. Zum Beispiel hat die pH-Wert-Abbildung der Moosmofette eine gleich gestaltete Legende, wie die der Birnenmofette. Dies gilt für weiterhin für alle Abbildungen.

2.5.1.2 Erstellung der berechneten Erdoberflächen-Abbildungen der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen

Die Gasmessungen auf der Erdoberfläche sind mit einigen Schwierigkeiten verbunden (Kap. 3.1.1.2). Jedoch bietet die Vorgehensweise des Sigma Plot-Programms die Möglichkeit zumindest berechnete Erdoberflächenkonzentrationen abzubilden. Um eine derartige Abbildung erstellen zu können sind zwei Arbeitsschritte notwendig.

1. Zunächst werden die CO₂- oder O₂-Konzentrationen nicht flächig sondern transektweise abgebildet („Flammendarstellung“) (Abb. 9). Dafür werden in das Programm die CO₂- oder O₂-Werte für jede Messtiefe pro Messpunkt eingegeben. Für die X-Achse werden wie für die Flächenabbildungen die Messpunkte des Transektes in Meter angegeben. Allerdings wird für die Y-Achse die Bodentiefe von -60 bis 0 cm eingegeben. Durch die Festlegung des Sigma Plot-Programmes von Z-Intervallen mithilfe von Konturlinien (Kap. 2.5.1.1) werden die fehlenden Werte von -10 bis 0 cm ergänzt und abgebildet.

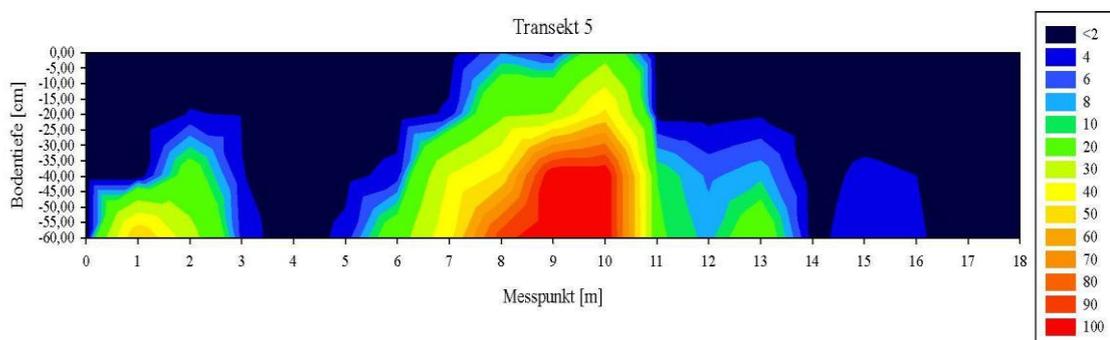


Abb. 9: Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 5 der Birnenmofette im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

2. In einem zweiten Arbeitsschritt müssen die ermittelten Werte des Programms mit denen die fehlenden Messtiefen ergänzt wurden aus der Transektabbildung abgelesen werden.

Nach der Anfertigung aller Transektabbildungen einer Untersuchungsfläche und nach dem Ablesen der berechneten CO₂- oder O₂-Werte für die Erdoberfläche, kann auf die in Kap. 2.5.1.1 beschriebene Vorgehensweise eine Flächenabbildung erstellt werden.

Bei der Interpretation dieser berechneten Flächenabbildungen muss jedoch unbedingt beachtet werden, dass das Sigma Plot-Programm bei der Interpolierung der Z-Intervalle keine Luftbewegungen oder Hindernisse im Boden berücksichtigt.

2.5.2 Statistik

Bei der Auswertung der erhobenen Datensätze kamen verschiedene statistische Methoden zum Einsatz, die unter Zuhilfenahme von Excel 2007 oder CANOCO 4.5 angewandt wurden.

2.5.2.1 Statistische Auswertungen mit Excel 2007

Die Datensätze aller Bodeneigenschaften wurden auf Zusammenhänge mithilfe des Bestimmtheitsmaßes untersucht. Die Abhängigkeiten des Pflanzenbestandes von den Bodenparametern konnten durch den Korrelationskoeffizienten verdeutlicht werden. Teilweise war für Datenverarbeitungen, und vergleichende Gegenüberstellungen die Berechnung arithmetischer Mittelwerte notwendig (Köhler et al. 2002; Rudolf und Kuhlisch 2008).

Die Kalkulationen der arithmetischen Mittel, der Korrelationskoeffizienten, sowie der Bestimmtheitsmaße wurden mit Excel 2007 durchgeführt.

2.5.2.2 Statistische Auswertungen mit CANOCO 4.5

In der Birnen- und Moosmofette wurden verschiedenste Standortbedingungen des Pflanzenbestandes untersucht. Daher waren multivariable statistische Analysen der Datensätze empfehlenswert.

Die multifaktoriellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit basieren auf kanonischen Korrespondenzanalysen (CCA), die mithilfe des Programmes CANOCO 4.5 anzufertigen waren. Kanonische Korrespondenzanalysen sind den kanonischen Ordinationen zuzuordnen. Kanonische Ordinationen werden mit der Absicht durchgeführt, Zusammenhänge zwischen der Artenzusammensetzung und mehreren erhobenen Umweltparametern herauszuarbeiten. Dafür werden Methoden der univariaten direkten Gradientenanalyse verwendet: 1) die

indirekte Gradientenanalyse (Korrespondenzanalyse), und 2) multiple Regressionen für die zusätzlichen Umweltvariablen. Durch diese Methodenkombination wird die kanonische Ordination zugleich als multivariate direkte Gradientenanalyse bezeichnet. Zunächst werden die zwei zugrunde liegenden Methoden der univariaten direkten Gradientenanalyse erklärt.

Die Korrespondenzanalyse (CA) hat zum Ziel, einen theoretischen Gradienten zu entwickeln, der die Artenzusammensetzung optimal erklärt. Dazu werden die Arten maximal entlang eines Gradienten aufgefächert, wobei es die Aufnahmewerte sind, die an der Ordinationsachse angeordnet werden. Die Position der Aufnahmewerte ergibt sich aus den gewichteten Mitteln der Artwerte. Über gewichtete Mittel kann das Optimum einer Art entlang eines Gradienten ermittelt werden, solange sich die Art zu dem Gradienten unimodal verhält. Bei einer unimodalen Verteilung steigen und fallen die Individuenzahlen (Abundanzen) einer Art entlang eines Umweltgradienten, wobei sie an einer Stelle ein Optimum aufweisen. Die höchsten Abundanzen sind dann mit großer Wahrscheinlichkeit in der Nähe des Optimums zu finden. Dieses kann durch die Berechnung gewichteter Mittel der Werte der Umweltvariablen eingeschätzt werden. Die Kalkulation erfolgt über die Multiplikation der Abundanzen jeder Art in einem Objekt mit dem jeweiligen Wert der Umweltvariablen, über alle Aufnahmen, in denen die Art verzeichnet wurde. Anschließend werden die Produkte summiert und durch die Summe aller Abundanzen der Art dividiert. Aufgrund der Informationen, die durch die Berechnung gewichteter Mittel über die Strukturen von Artenzusammensetzungen zustande kommen, werden sie als Basis der Korrespondenzanalyse verwendet (Leyer und Wesche 2007).

Mithilfe multipler Regressionen können zwei oder mehrere Variablen für die Erklärung einer abhängigen Merkmalsausprägung verwendet werden. Zudem wird ein Vergleich der Einwirkungen der verschiedenen beeinflussenden Variablen ermöglicht. Zusätzlich können mithilfe verschiedener Merkmalsselektionsverfahren überreichlich vorhandene Variablen aus der Regressionsanalyse ausgeschlossen werden (Rudolf und Kuhlisch 2008).

Das Prinzip der kanonischen Korrespondenzanalyse basiert auf den zwei oben beschriebenen Verfahren. Es wird jedoch dahingehend erweitert, dass die entwickelten Gradienten Linearkombinationen der erhobenen Umweltparameter darstellen, und zwar der gemessenen Bodeneigenschaften. Hier werden die multiplen linearen Regressionen verwandt, bei denen die Bodeneigenschaften als erklärende Variablen dienen. Dabei werden auch die Wechselwirkungen unter den Parametern berücksichtigt. Durch die kanonische Korrespondenzanalyse werden dann diejenigen Linearkombinationen aufgedeckt, die die Aufnahmewerte am besten erklären. Diese sind jedoch weiterhin von der

Artenzusammensetzung abhängig. Ähnlich wie bei der CA werden die Arten entlang von Gradienten aufgetrennt. Bei der CA gibt es einen Gradienten, der die Wertebereiche der Abundanzen bestmöglich aufgliedern kann. Es ist allerdings stets die Einschränkung gegeben, dass der Gradient eine Linearkombination der Umweltvariablen darstellt. Auf diese Weise umfasst eine kanonische Ordination multivariate Beziehungen zwischen den Arten und Umweltparametern (Leyer und Wesche 2007).

Die kanonische Korrespondenzanalyse startet zunächst mit der Berechnung der gewichteten Mittel, aus denen Aufnahmewerte abgeleitet werden. Diese gehen als abhängige Variable in multiple lineare Regressionen ein, zusammen mit den Umweltfaktoren, die die erklärenden Variablen darstellen. Die abgeleiteten Aufnahmewerte aus den gewichteten Mitteln werden durch die Werte ersetzt, die aus den Linearkombinationen der Umweltvariablen während der Regressionsanalyse entstanden sind. Der Austauschvorgang wird wiederholt, bis sich alle Werte stabilisiert haben. Durch die CCA findet neben der Erstellung eines 3-dimensionalen Ordinationsraumes (im CCA-Diagramm 2-dimensional abgebildet) zusätzlich die Berechnung eines Eigenwertes der CCA-Achsen statt. Dieser Wert ist ein Maß für die maximale Auftrennung der Artwerte entlang der Achsen, beziehungsweise entlang der vorgegebenen Gradienten der Umweltvariablen. Eigenwerte über 0,5 sind sehr gut, Werte kleiner 0,5 sind noch vertretbar, jedoch sind sie bei Null nicht verwendbar. Neben dem Eigenwert werden weitere Kennwerte kalkuliert, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Außerdem existieren verschiedene Modifikationen kanonischer Ordinationen die ebenfalls bei der Analyse der Datensätze nicht zum Einsatz kamen. Beispielsweise kann bei einer Analyse die Methode „forward selection“ verwendet werden. Dies hätte zur Folge, dass diejenigen Umweltfaktoren aus der Berechnung selektiert werden, die keine signifikante Erklärung für eine Artenzusammensetzung erbringen (Leyer und Wesche 2007). Diese Anwendung kam bei den durchgeführten Korrespondenzanalysen nicht zum Einsatz. Zum Einen hatten verschiedene Analysen in dieser Arbeit zum Ziel, die Zusammensetzung der Pflanzenbestände bezüglich aller gemessenen Bodeneigenschaften zu untersuchen. Zum Anderen wurden durch Korrelationsanalysen voneinander abhängige Bodenparameter aufgedeckt, die dann zusammen in die Ordinationen eingebracht wurden. Eine weitere Modifikation besteht darin, selten vorkommende Arten in der Korrespondenzanalyse weniger zu gewichten („downweighting of rare species“). Wenn eine Art mit einer geringen Individuenzahl vermerkt wird, kann keine klare Aussage über ihre Wuchsortansprüche formuliert werden (Leyer und Wesche 2007). Diese Optimierung der Ordinationen wurde bei allen in Kap. 3 vorgestellten Korrespondenzanalysen angewandt.

Die kanonischen Korrespondenzanalysen wurden mit dem Programm CANOCO 4.5 erstellt. Dieses Programm ermöglicht die Durchführung verschiedener Ordinationen. Außerdem sind darin die verschiedenen Modifikationen implementiert. Die Durchführung einer Ordination mit CANOCO 4.5 führt zu der Erstellung eines Ordinationsdiagrammes mit: 1) einer numerischen Zusammenfassung der zu erklärenden Varianz, 2) der Erklärung der Varianz durch Umweltfaktoren, 3) den Kennwerten über die statistische Signifikanz der Umweltfaktoren, 4) und zu einer statistischen Signifikanz der ersten Ordinationsachse mit den erklärenden Umweltvariablen (Eigenwert) (ter Braak und Šmilauer 2002).

Interpretation eines CCA-Diagrammes anhand eines Beispiels

Bei dem in Abb. 10 dargestellten CCA-Diagramm handelt es sich um einen „biplot“, da sowohl Artwerte (Dreiecke) enthalten sind, als auch Umweltvariablen (Vektorpfeile). Bei dieser Art von Diagrammen kann jede Art des Datensatzes in Beziehung mit jeder gemessenen Umweltvariablen, in diesem Fall Bodenvariablen, gebracht werden (Biplot-Regel). Dazu werden von den Art-Dreiecken Lote auf die Vektorpfeile gefällt. Die Art-Dreiecke sind mit verkürzten Artnamen beschriftet. Diese setzen sich meistens aus den ersten vier Buchstaben des Gattungsnamen zusammen, sowie den vier Anfangsbuchstaben des Artnamens. Die Vektorpfeile beginnen bei CCA-Diagrammen im Koordinatenursprung, müssen jedoch über diesen hinaus verlängert werden (Leyer und Wesche 2007), wie es in dem Beispiel für den Vektorpfeil des CO₂ durchgeführt wurde (Verlängerung des Pfeils mithilfe einer grünen Linie). Das Maximum einer Variablen ist dabei der Pfeilspitze zuzuordnen, das Minimum dem Pfeilende. Der Durchschnittswert wird durch den Koordinatenursprung gekennzeichnet. Also befindet sich beispielsweise der höchste Wert der Kohlendioxidkonzentrationen (100%) an der Pfeilspitze und 0% am entgegengesetzten Ende. In dem untenstehenden Beispiel wurden Lote für die Arten *Calluna vulgaris* und *Hieracium pilosella* auf den Vektorpfeil der Kohlendioxidkonzentrationen gefällt (grüne Linien). Die Nähe der Schnittpunkte zur Pfeilspitze deutet die Abhängigkeit der Arten vom Umweltfaktor an. Die Abfolge, der auf diese Weise übertragenen Artpunkte auf den Vektorpfeil, entspricht der Reihenfolge der gewichteten Mittel für das CO₂. Hohe gewichtete Mittel befinden sich an der Pfeilspitze, niedrige an der gegenüberliegenden Seite des Pfeiles, und die mittleren Werte am Koordinatenursprung (Leyer und Wesche 2007). Da der Durchschnitt eines Parameters am Koordinatenursprung liegt, sind alle Arten, deren Schnittpunkte sich auf der Seite mit der Pfeilspitze befinden, stärker von dieser Variablen abhängig. Arten, deren Lote auf der anderen Seite des Koordinatenursprungs ankommen, sind weniger abhängig. Arten, die sich im

Diagrammzentrum befinden, müssen nicht unbedingt dort ihren Schwerpunkt haben. In dem Fall, dass sie gar keinem Umweltparameter zugewiesen werden können, ordnen sie sich automatisch dem Koordinatenursprung zu. Für die angeführten Arten *Hieracium pilosella* und *Calluna vulgaris* kann die Aussage formuliert werden, dass bezüglich dieses Datensatzes *Hieracium pilosella* eine stärkere Abhängigkeit von hohen CO₂-Konzentrationen aufweist, als *Calluna vulgaris* (Abb. 10).

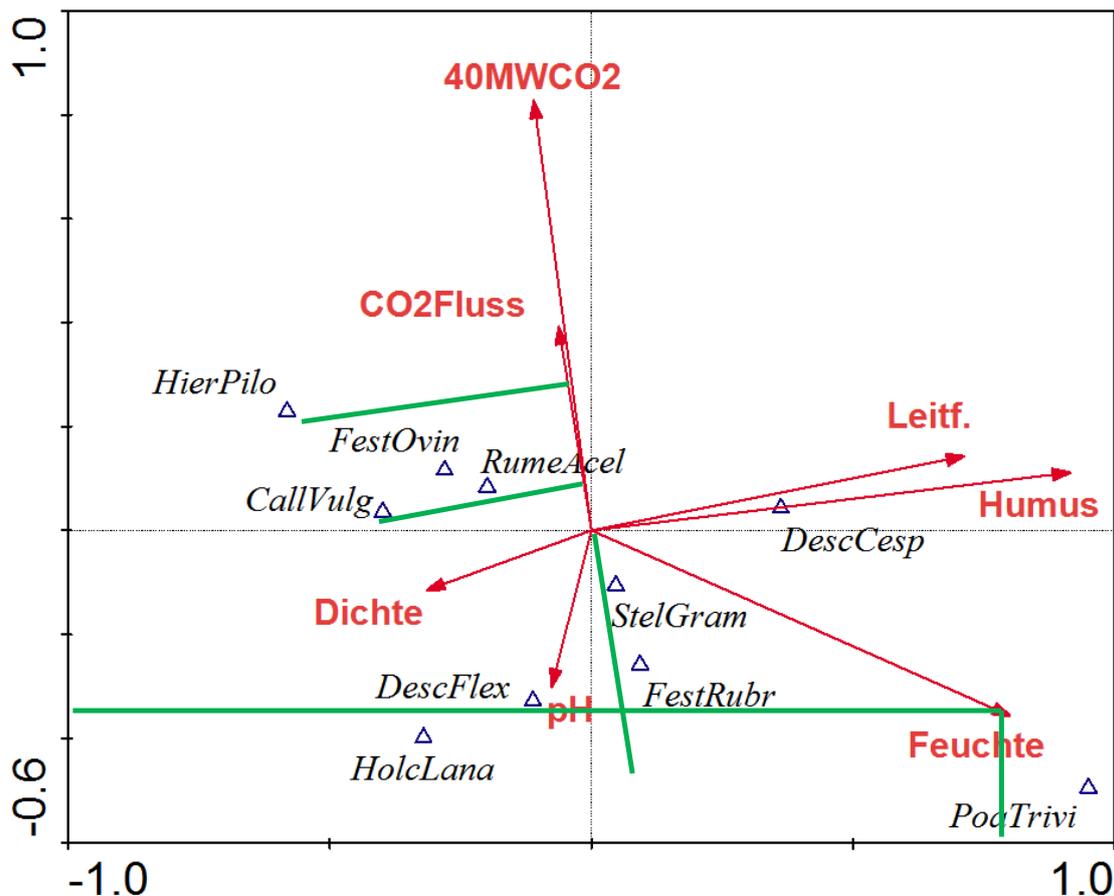


Abb. 10: CCA-Diagramm eines Moosmofetten-Datensatzes. Der Datensatz enthält alle gefundenen Pflanzenarten mit einer maximalen Wurzellänge von 0 bis 10 cm, sowie alle erhobenen Bodeneigenschaften. Die Artwerte sind als Dreiecke dargestellt, und die Bodenfaktoren als Vektorpfeile. Die grünen Linien verdeutlichen die Lote, die gemäß der Biplot-Regel von den Artwerten auf die Vektorpfeile gefällt werden. Die weiteren grünen Linien kennzeichnen den Bezug bestimmter Vektorpfeile zu einer Achse des CCA-Diagrammes. (Datenerhebung 2009)

Die Länge eines Pfeiles ist ebenfalls von Bedeutung: Wird eine Variable durch einen langen Pfeil zu einer der Ordinationsachsen gekennzeichnet, steht sie in einer engen Beziehung zu der Achse. Dadurch hat diese Variable einen stärkeren Einfluss auf die Artenzusammensetzung, als eine Variable, die durch einen kurzen Pfeil dargestellt wird.

In einer CCA werden nicht nur Wechselwirkungen zwischen den Umweltparametern und der Artenzusammensetzung untersucht, sondern auch die Wechselwirkungen der Umweltfaktoren

untereinander. Dies wird zusätzlich mit den Vektorpfeilen ausgedrückt. Pfeile vergleichbarer Länge und Richtung verdeutlichen eine Abhängigkeit der betreffenden Variablen. Zeigt jedoch ein Vektorpfeil zum Beispiel in die rechte obere Ecke des Diagrammes und ein anderer in die linke untere, stehen die Umweltvariablen in keiner Wechselwirkung zueinander. Sowohl die Orientierung eines Vektorpfeiles, als auch die Länge in Bezug zu einer Ordinationsachse, können durch die Fällung von Loten, von der Pfeilspitze zu den Achsen, ermittelt werden (in Abb. 10 beispielsweise für den Vektorpfeil der Bodenfeuchte) (Leyer und Wesche 2007). Die Fällung der Lote (grüne Linien) ergibt, dass die Bodenfeuchte eine starke Verbindung zu der zweiten Ordinationsachse aufweist, jedoch eine geringe zu der ersten Achse. Kurze Vektorpfeile haben meist eine schlechte Korrelation bezüglich der Variationen von Artenzusammensetzung (Leyer und Wesche 2007).

3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Teil der Arbeit werden die Resultate der verschiedenen Messungen in den Untersuchungsflächen vorgestellt und mit Hilfe unterschiedlicher Auswertungsmethoden, bildlicher und statistischer Art, diskutiert. Hierbei wird das Ziel einer ökologischen Charakterisierung beider Mofetten angestrebt, die sich vorwiegend auf abiotische Faktoren und die Vegetation stützt. Zusätzlich werden beide Untersuchungsstandorte mittels unterschiedlicher Messungen, ferner unter Zuhilfenahme verschiedener Wetterdaten und geologischer Aktivitäten vor dem Hintergrund zeitlicher Veränderungen betrachtet.

Die gemessenen abiotischen Faktoren beschränken sich auf die Pedosphäre und bilden somit den pedologischen Teil der Charakterisierung. Die Abbildungen geben Aufschluss über die physikalischen und physiko-chemischen Eigenschaften des Bodens sowie über seine festen Bestandteile. Abgesehen von den Messungen der CO₂- und O₂-Konzentrationen, des pH-Wertes, des Bodenwassers, und der organischen Mengenanteile, wurden diese Untersuchungen einmalig durchgeführt.

Zusätzlich folgen die Darstellungen der Vegetation auf den untersuchten Flächen, wodurch der biotische Teil der ökologischen Charakterisierung abgedeckt wird. Dabei werden sowohl Pflanzengruppen als auch einzelne Arten genauer betrachtet. Die Vegetationsaufnahmen fanden ebenfalls mehrmals statt.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass für die Darstellung von Beziehungen zwischen Kohlendioxidkonzentrationen mit anderen Bodeneigenschaften, oder der Vegetation, die Abbildungen der 40 cm Bodentiefe CO₂-Konzentrationen verwendet werden. Die Messungen

haben gezeigt, dass die CO₂-Werte dieser Tiefe am stabilsten sind, da der Gasaustausch mit der Atmosphäre hier sehr reduziert ist, im Gegensatz zu den oberen Bodenschichten. Nach Weinlich et al. (2013) dringen tägliche Luftdruckschwankungen mindestens 30 cm in den Boden ein und teilweise sogar bis 60 cm. Die Durchdringung hängt dabei von dem leitenden Material ab (Weinlich et al. 2013). In anderen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Druckschwankungen bis zu 50cm den Boden durchdringen, wobei keine Abschwächung des Drucks mit zunehmender Bodentiefe stattfindet. Auf diese Weise wird ein Massentransport des Bodengases aus dem porösen Boden ausgelöst. Auftretende Luftbewegungen beschleunigen ebenfalls den Gastransport aus dem Boden in die Atmosphäre (Takle et al. 2004).

Hinzu kommt die Auswirkung der Vorbereitung der Messstelle mithilfe des Bohrstabes. Bedingt durch die Vorgehensweise (Kap. 2.3.3) werden kurzfristig neue hindernisfreie Diffusionswege für das aufsteigende Kohlendioxid geschaffen. Dadurch wird der Gasfluss aus dem Boden in die Atmosphäre beschleunigt. In den oberen Messtiefen (10 und 20 cm) läuft dieser Vorgang schneller ab als in den unteren (40 und 60 cm). Infolgedessen ist die Gefahr von Messungenauigkeiten in den oberen Messtiefen höher als in den unteren. Aus diesem Grund werden für die Überprüfung möglicher Zusammenhänge zwischen dem Bodengas und anderen Bodeneigenschaften die CO₂-Werte der 40 cm Messtiefe verwendet.

3.1 Die Birnenmofette

Die Birnenmofette ist seit 2008 eine Untersuchungsfläche im Mofettengebiet des westtschechischen Plesnátales. Seit diesem Jahr wurden jährlich, und seit März 2012 zusätzlich vierteljährlich, Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen gemessen. Die Vegetationsaufnahmen fanden, außer in 2009, ebenfalls im Jahresrhythmus statt. Die Untersuchungen des Bodenwassergehaltes, der Bodenazidität und des Anteils organischer Substanz erfolgten zweimal. Alle anderen Untersuchungen wurden nicht mehrfach wiederholt. Im März 2009 wurden folgende Bodeneigenschaften erfasst: CO₂- und O₂-Konzentration, Wassergehalt, organische Anteile an den festen Bodenbestandteilen, pH-Wert und Ionenleitfähigkeit. Die Messungen der Bodendichte und des CO₂-Flusses waren Bestandteil einer Messkampagne im März 2013. Im Juni 2014 fand eine erneute Probennahme für eine Stickstoffbestimmung statt. Diese Bodenproben wurden zusätzlich auf ihren pH-Wert, Bodenwassergehalt und Anteil der organischen Substanz untersucht.

3.1.1 Die Pedosphäre in der Birnenmofette

Die ersten Ergebnisse von Gasmessungen in der Birnenmofette stammen aus dem Jahr 2008. Trotzdem werden zunächst die Messungen von März 2009 vorgestellt, um einen Vergleich mit den anderen Bodenfaktoren zu ermöglichen. Für die Analyse der Bodendichte und des CO₂-Flusses werden die Kohlendioxidmessungen von März 2013 angeführt.

3.1.1.1 Bodengase

Kohlendioxid

In Abb. 11 sind die CO₂-Konzentrationen im März 2009 in der Birnenmofette dargestellt. Abgesehen von den reinen Konzentrationen, ist dieser Abbildung ebenfalls die CO₂-Verteilung innerhalb der Fläche zu entnehmen. Diese ist, neben dem prozentualen Anteil des Kohlendioxids an dem Bodengas, für die Analyse der anderen Bodenfaktoren oder der Verteilung der Pflanzenarten, von Bedeutung.

Zunächst ist eine Steigung der Kohlendioxidkonzentrationen mit zunehmender Bodentiefe festzustellen (Abb. 11).

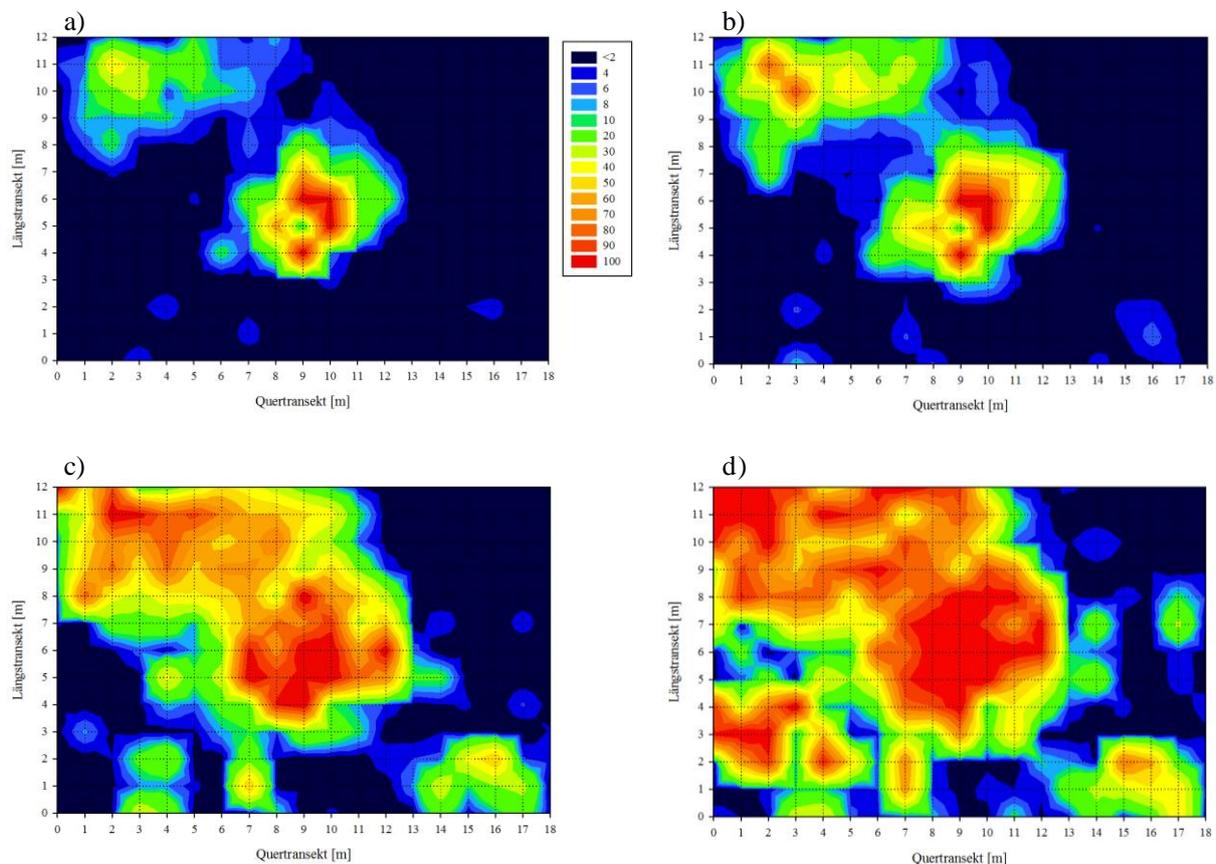


Abb. 11: CO₂-Konzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Die Betrachtung der Fläche in nordsüdlicher Richtung (Kap. 2.2) lässt bereits in 10 cm Tiefe einen stark ausgeprägten Mofettenbereich erkennen, der zwei Ausgasungszentren hat. Eines befindet sich im mittleren Bereich der Mofette zwischen den Transekten 3 bis 8. Hier erreicht das Kohlendioxid bereits konstant Konzentrationen von 10 bis 100%. Das andere Zentrum ist zwischen den Transekten 9 bis 12 zu finden und liegt dementsprechend am südöstlichsten Rand der Fläche (Kap. 2.2). An diesen Messstellen sind vorwiegend CO₂-Werte von 10 bis 40% zu verzeichnen. Beide Zentren sind durch einen Bereich verbunden, der in dieser Bodentiefe weniger stark in Erscheinung tritt. Der Kontrollbereich umschließt die, von Südosten nach Nordwesten verlaufende Mofettenzone. Jedoch ist er vereinzelt von kleineren, räumlich begrenzten CO₂-Ausgasungen unterbrochen, an denen allerdings eine CO₂-Konzentration von 4% nicht überschritten wird.

In der Bodentiefe von 20 cm sind geringfügige Veränderungen des Mofettengases zu vermerken. Die zuvor erwähnten Ausgasungszentren vergrößern sich minimal und in dem südöstlichen Teil steigen die Kohlendioxidkonzentrationen auf größtenteils 20 bis 90%. Innerhalb des Verbindungsbereiches sind maximal CO₂-Werte von 8% zu notieren. Des Weiteren treten in den Kontrollquadraten isolierte, kleinflächige Exhalationsstellen auf, die weniger als 8% Kohlendioxid im Porenvolumen führen.

Ab einer Bodentiefe von 40 cm nimmt der Mofettenbereich, der jetzt zwei Drittel des untersuchten Standortes beansprucht, andere Ausmaße an. Doch nicht ausschließlich die Größe nimmt zu, sondern auch die CO₂-Konzentrationen steigen deutlich an. Das Ausgasungszentrum im mittleren Teil der Fläche vereint sich mit vorher isolierten Ausgasungsstellen in den nördlichen und nordwestlichen Teilquadraten zu einem zusammenhängenden Bereich, in dem der prozentuale Anteil des CO₂ an der Bodengaszusammensetzung auf überwiegend 40 bis 100% anwächst. Das südöstliche CO₂-Zentrum dehnt sich nach Nordwesten aus, so dass beide Ausgasungsschwerpunkte eine großflächige Mofettenzone bilden, in der Kohlendioxidwerte von 30 bis 100% gemessen wurden. Im Nordosten und Nordwesten wird der Kontrollbereich von weiteren lokalen CO₂-Exhalationen unterbrochen.

Der Abbildung mit den CO₂-Konzentrationen in 60 cm Bodentiefe ist zu entnehmen, dass der Mofettenbereich annähernd die komplette Untersuchungsfläche einnimmt. Sowohl beide Ausgasungszentren als auch die vereinzelt gasenden Punkte verbinden sich massiver. In den lokalen CO₂-Stellen, die vorher niedrige Konzentrationen Kohlendioxid führten, sind jetzt Werte von 20 bis 70% zu verzeichnen, stellenweise sogar 100%. Im großflächigen Ausgasungsbereich wurden in dieser Bodentiefe konstant 60 bis 100% Kohlendioxid

gemessen. Weiterhin sind neue, kleinflächige Unterbrechungen des Kontrollbereiches festzustellen, in den die CO₂-Konzentrationen von 4 bis maximal 22% ansteigen. Einzig im Südwesten der Birnenmofette befinden sich weiterhin Einzelquadrate mit Kohlendioxidwerten von weniger als 2%.

Die CO₂-Gasmessungen in dieser Fläche bestätigen, dass sie korrekterweise als Mofettenstandort und somit als Ausgasungsstandort im west-tschechischen Mofettengebiet einzuordnen ist, denn die gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen übersteigen teilweise bereits in 10 cm Bodentiefe, die in Kap. 1.2.2 erwähnten Grenzwerte für Grünlandböden. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die CO₂-Werte, aufgrund des Diffusionsweges des Gases aus dem Erdmantel in die Erdkruste und letztendlich in die Atmosphäre (Kap. 2.1.2). In Saßmannshausen (2010) wird diese Beobachtung an mehreren Mofetten im Plesnátal bestätigt. Deutlich sind in der Birnenmofette zwei Hauptausgasungsstellen des Kohlendioxids zu erkennen, von denen ausgehend die Konzentrationen radial abnehmen, und unregelmäßig verteilte Ausgasungspunkte. Diese heterogene mosaikartige Verteilung des Gases wurde ebenfalls an einer Mofette im Nordosten Sloweniens (Stavešinci) festgestellt (Vodnik et al. 2006). Die CO₂-Veränderungen über kurze Distanzen werden in diesem Fall auf erhöhte Diffusionswiderstände zurückgeführt, die durch die dortigen Eigenschaften des Bodens zustande kommen. Die Pedosphäre dieser untersuchten Fläche ist schluffig-lehmig, wodurch das Kohlendioxid, ausgehend von den gasenden Bereichen, nicht zur Seite geleitet wird, sondern vertikal in einem steilen CO₂-Gradienten (Vodnik et al. 2006). Diese Feststellungen können für die CO₂-Verteilung in der Birnenmofette angewendet werden. In Kap. 2.1.3 wurden die differenten Eigenschaften der Böden des Plesnátales, wie die der Mofettenstandorte, vorgestellt. Vergleichbar mit anderen Untersuchungsstandorten des Plesnátales, wie beispielsweise der Hartoušov-Wiese (Saßmannshausen 2010) oder der Nardus-Nord-Mofette (Greiß 2008), ist auch in der Birnenmofette ein gleyartiger Reduktosol vorzufinden. Die Eigenschaften dieses Bodentyps bieten eine Erklärung für die Heterogenität der Kohlendioxidwerte. In den unterschiedlichen Horizonten kann es zu Verdichtungen (Mückenhausen 1993) und Humusanreicherungen kommen (Scheffer und Schachtschabel 2010), wodurch sich für das CO₂ Diffusionswiderstände ergeben. Die schwachen Hindernisse verhindern kaum eine hohe Diffusion des Gases aus der Pedosphäre an die Erdoberfläche, was an den punktuellen Ausgasungsstellen zu sehen ist. An diesen folgt das Kohlendioxid einem steilen Gradienten von unten nach oben, so dass die hohen Konzentrationen erhalten bleiben, jedoch wirken starke Hindernisse limitierend (Schütze et al. 2012). Die Diffusion dauert wesentlich länger, und hohe Mengen des Gases verbleiben auf dem zur Erdoberfläche

gerichteten Diffusionsweg in anderen Porenbereichen, was zu einer Abnahme der CO₂-Konzentration führt. Ferner existiert die Möglichkeit, dass sich Mengen des Kohlendioxids in großen Hohlräumen grobporiger Bodenschichten sammeln und sich dadurch die Anteile am Bodengas verringern. In diesem Falle wird auf Takle et al. (2004) Bezug genommen, die allerdings den Einfluss von Diffusionshindernissen auf den CO₂-Fluss untersucht haben. Auch Miglietta et al. (1993) haben das Phänomen des mosaikartigen CO₂-Musters an Mofetten in Italien beobachtet. Auch dort sind die CO₂-Konzentrationen in den lokalen Exhalationsbereichen am höchsten und nehmen dann mit zunehmender Entfernung zur CO₂-Quelle ab (Miglietta et al. 1993).

Sauerstoff

Die Messungen der Sauerstoffkonzentrationen wurden parallel zu den Kohlendioxidmessungen vorgenommen. Aufgrund der Tatsache, dass CO₂ ein sauerstoffverdrängendes Gas ist (Kap. 1.2.2), bilden die Sauerstoffkonzentrationen die Kohlendioxidwerte spiegelbildlich ab. Folglich ist das Bodengas im Mofettenbereich sauerstoffarm. Und in den nicht-gasenden Bereichen ist es im Verhältnis zur atmosphärischen O₂-Konzentration leicht verringert. In Kap. 1.2.2 wurde bereits auf den CO₂- und O₂-Antagonismus eingegangen.

Durch Abb. 12 wird diese Wechselwirkung sehr deutlich. Mit Hilfe einer Farbumkehrung in der Legende wird dieser Effekt noch graphisch verstärkt.

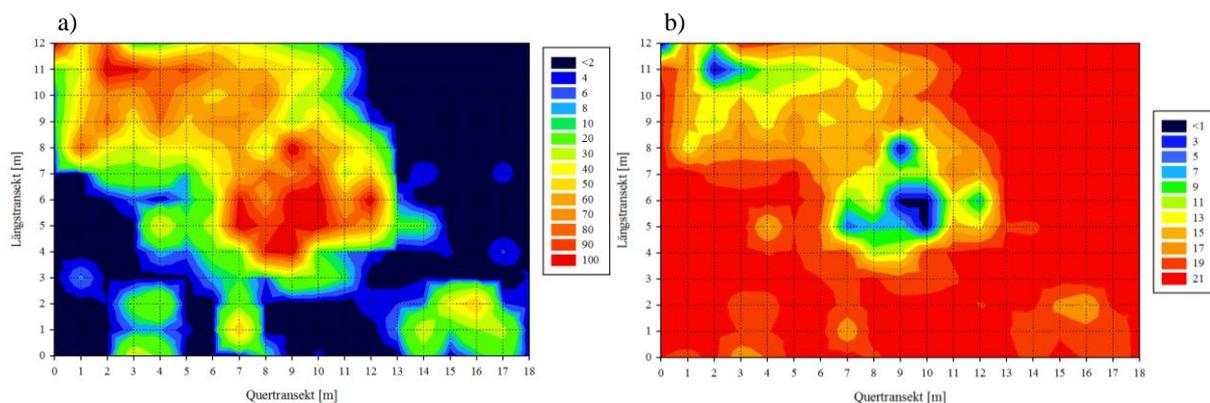


Abb. 12: Vergleich der CO₂-Konzentration [%] (a) und der O₂-Konzentration [%] (b) in 40 cm Bodentiefe der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Der Sauerstoffabbildung ist zu entnehmen, dass an Stellen mit stark erhöhten CO₂-Konzentrationen der Sauerstoff durch das Kohlendioxid verdrängt wird. Folglich wird dort der Boden sauerstoffärmer. In den punktuell gasenden Messpunkten, die 100% Kohlendioxid

führen, wird naturgemäß eine Anoxie erreicht; die O₂-Werte sind dann gleich Null. In direkter Nähe zu diesen Exhalationen betragen die CO₂-Konzentrationen 40 bis 100%; die Sauerstoffkonzentrationen sinken dementsprechend auf 12 bis unter 2%. Im Übergangsbereich zwischen der Mofetten- und Kontrollzone hat das CO₂ einen prozentualen Anteil von überwiegend 10 bis 30% am Bodengas; folglich ist der Sauerstoffanteil höher mit Werten von 15 bis 18%. In den wenig- oder nicht-gasenden Bereichen der Birnenmofette (dunkelorange bis rot) wurden O₂-Konzentrationen von 19 bis 21% gemessen.

Bei der Auswertung aller Sauerstoffabbildungen (Abb. 13) wird die steigende Hypoxie nochmals klarer.

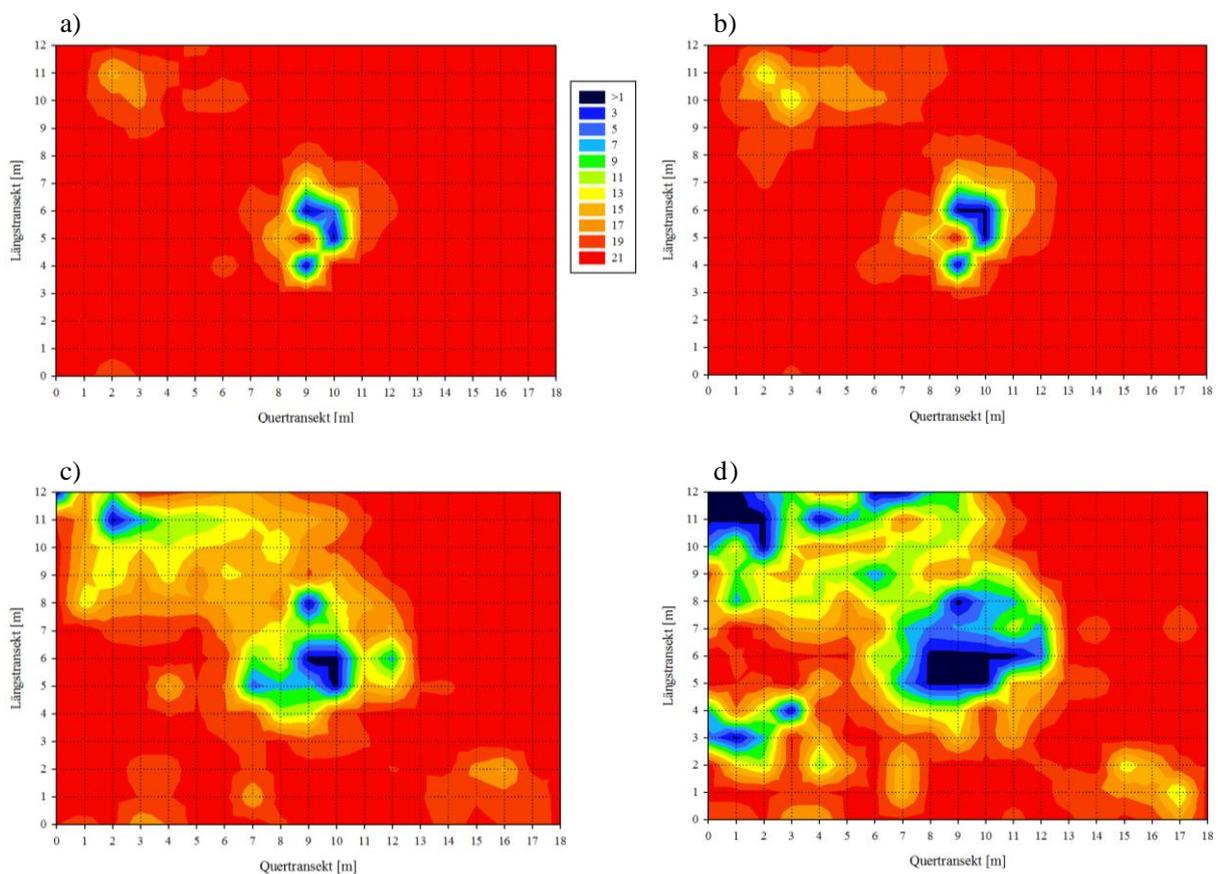


Abb. 13: Sauerstoffkonzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

In den Bodentiefen 10 und 20 cm sind die anaeroben Bereiche des Bodens im Gegensatz zu den CO₂ angereicherten noch sehr kleinflächig und isoliert. Allerdings sinken in den punktuellen Kohlendioxid-Ausgasungen die Sauerstoffkonzentrationen unter 2%.

Ab einer Tiefe von 40 cm ist der großflächige Mofettenbereich in den O₂-Abbildungen deutlich sichtbar, denn die sauerstoffarmen Ausgasungszentren haben sich zu einer anaeroben Zone in der Birnenmofette verbunden. Zusätzlich treten ebenfalls die kleinflächigen,

isolierten CO₂-Emissionen auf, gekennzeichnet durch O₂-Werte von 15 bis 18%. Diese Stellen verbinden sich in 60 cm Bodentiefe im Nordosten mit dem sauerstoffarmen Teil der Fläche, der sich vergleichbar mit dem Ausgasungsbereich von Südosten nach Nordwesten zieht (Kap. 2.2). Die O₂-Konzentrationen in den lokal gasenden Bereichen sinken in dieser Tiefe weiter ab, auf 18 bis 12%.

Der CO₂- und O₂-Antagonismus kann auch statistisch belegt werden (Abb. 14).

Die Analyse der bivariablen Verteilungen resultiert aus einem linearen Zusammenhang zwischen den Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen.

Die hemmende Wechselwirkung der beiden Antagonisten Sauerstoff und Kohlendioxid wird durch Messungen an anderen Standorten bekräftigt. Untersuchungen durch Vodnik et al. (2009) ergeben einen starken Zusammenhang zwischen den CO₂- und O₂-Konzentrationen. Gute Analyseergebnisse sind auch bei Saßmannshausen (2010) oder Greiß (2008) zu finden. Somit kann die Hypothese bestärkt werden, dass an Stellen mit geologischen CO₂-Anreicherungen hypoxische oder anoxische Bedingungen im Boden vorherrschen (Vodnik et al. 2009).

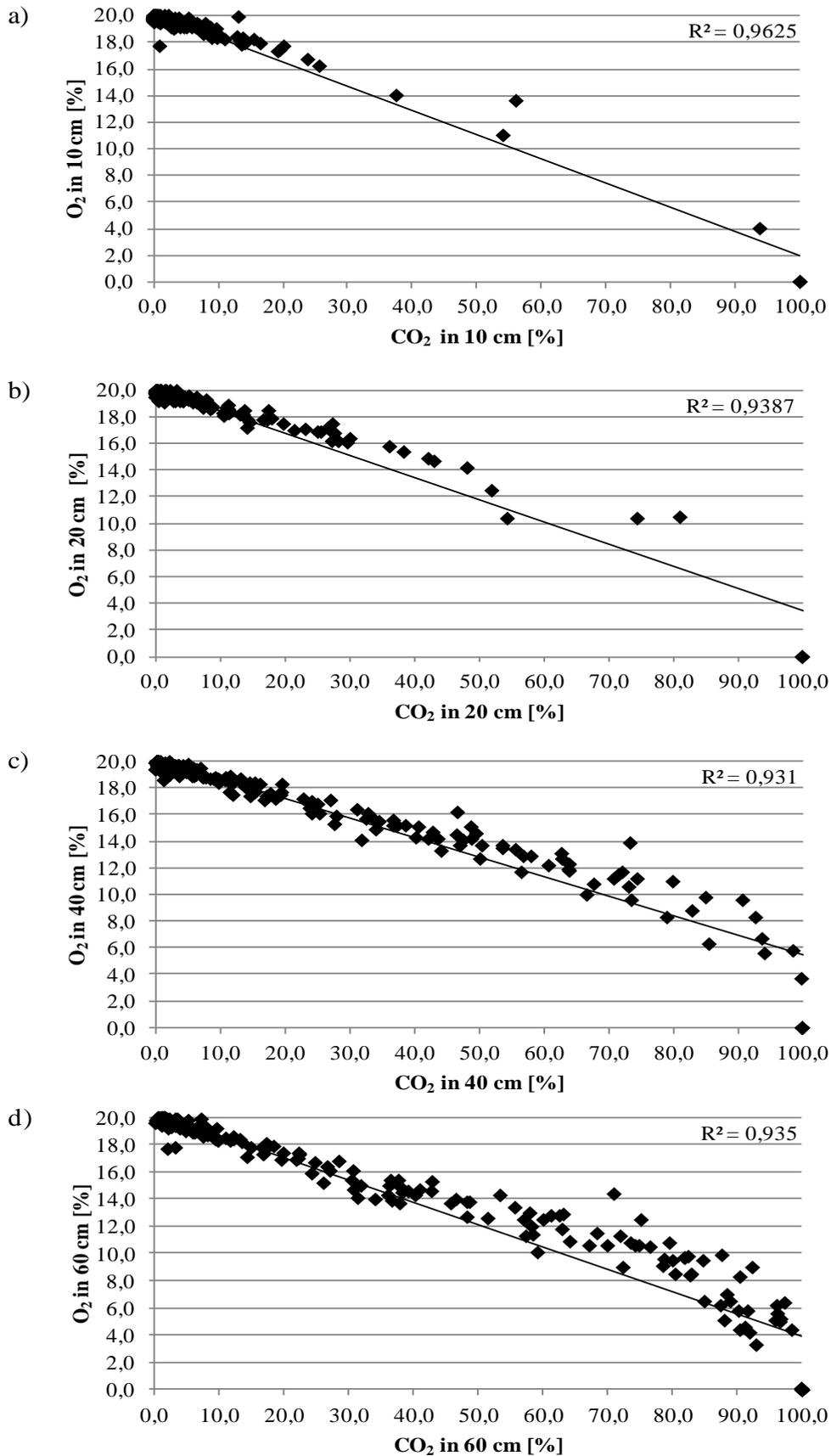


Abb. 14: CO₂- und O₂-Antagonismus in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette. (Datenerhebung März 2009)

Fazit

Die Auswertung der Bodengasmessungen hat gezeigt, dass die Birnenmofette ein Untersuchungsstandort mit zwei Ausgasungsschwerpunkten ist. Diese sind von nicht-gasenden Bereichen umschlossen. Die CO₂-Abbildungen haben deutlich gemacht, dass die Gaskonzentrationen mit zunehmender Messtiefe ansteigen. Die entgegengesetzte Situation konnte für die Sauerstoffkonzentrationen festgestellt und statistisch belegt werden. Es wurde die Sauerstoffverdrängung durch das Kohlendioxid aufgezeigt und so das antagonistische Verhalten der beiden Gase bestätigt. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass die flächigen CO₂-Ausgasungen aufgrund der Bodenbeschaffenheit einer starken Heterogenität unterworfen sind. Alle Schlussfolgerungen wurden durch andere Quellen bestätigt.

3.1.1.2 Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen an der Erdoberfläche

In Kap. 2.3.1 wurde die Methode der Gasmessungen in den Böden der untersuchten Standorte vorgestellt. Die erste Messung befindet sich in einer Bodentiefe von 10 cm. Abgesehen von den CO₂-Werten dieser Messtiefe wäre es ebenso interessant zu erfahren, wie hoch die CO₂-Konzentrationen direkt auf der Erdoberfläche sind. Steigende CO₂-Gehalte in diesem Bereich der Atmosphäre hätten ebenfalls Auswirkungen auf die Pflanzen, zum Beispiel auf den Gaswechsel (Pfanz et al. 2004).

Jedoch sind Gasmessungen direkt auf der Erdoberfläche kaum durchführbar. Das in die Atmosphäre austretende CO₂ wird sehr schnell durch geringste Luftbewegungen verblasen. Diese Luftbewegungen können entweder in Form von Wind auftreten oder durch die Mess-Teilnehmer verursacht werden. Unter derartigen Bedingungen würden nicht die realen Konzentrationen auf der Bodenoberfläche gemessen.

Daher wurde der Versuch unternommen, mithilfe des Sigma Plot 12.0-Programmes die Oberflächenkonzentrationen von Kohlendioxid und Sauerstoff zu ermitteln und darzustellen (Kap. 2.5.1.2).

In Abb. 15 sind die Gaskonzentrationen der Erdoberfläche im Vergleich mit den Abbildungen der 10 cm Bodentiefe dargestellt.

Abgesehen von kleinen Abweichungen sowohl in der berechneten Abbildung der Kohlendioxidkonzentrationen als auch der Sauerstoffkonzentrationen, sind die Abb. 15a,c, genauso wie die Abb. 15b,d, deckungsgleich. Bei absoluter Windstille, sowie dem Ausbleiben jeglicher Luftverwirbelungen, ist anzunehmen, dass die Oberflächenkonzentrationen ähnlich hoch sind wie in 10 cm Bodentiefe. Folgerichtig wären die Kohlendioxidkonzentrationen der

bodennahen Luftschicht über den Ausgasungsbereichen stark erhöht. Zusätzlich wären die dortigen Bedingungen hypoxisch.

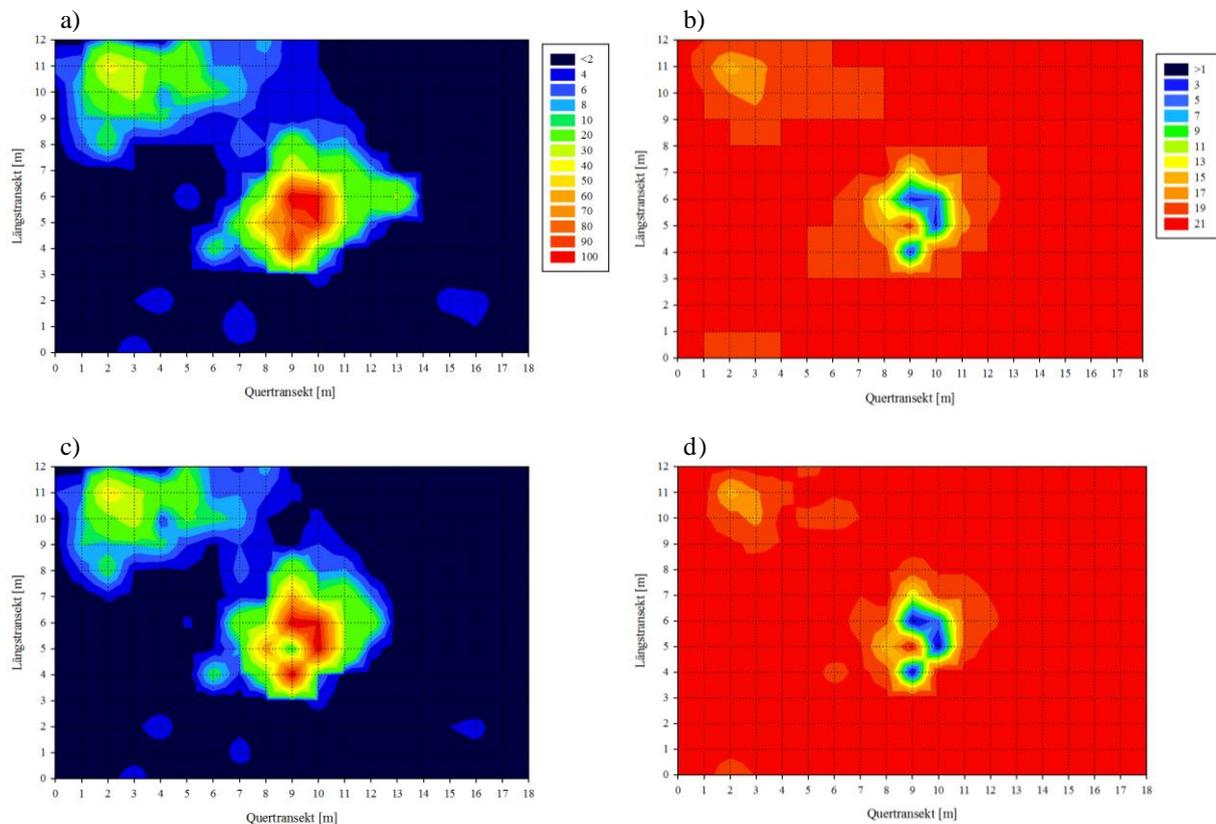


Abb. 15: Vergleich der CO₂- und O₂-Konzentration [%] auf der Erdoberfläche (a) und (b) mit der CO₂- und O₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) und (d) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Fazit

Anhand Abb. 15 konnte gezeigt werden, dass sich die angewandte Methode für die Ermittlung der Oberflächenkonzentrationen und von fehlenden Messwerten eignet. Auf diese Weise können Vermutungen über die Gaskonzentrationen in der bodennahen Luftschicht, sowie über deren möglichen Auswirkungen auf den pflanzlichen Stoffwechsel aufgestellt werden. Dabei darf aber nie außer Acht gelassen werden, dass die ermittelten Konzentrationen ausschließlich für absolut windstille Verhältnisse gelten.

3.1.1.3 Gasfluss-Messungen

Neben den Ergebnissen der reinen CO₂-Konzentrationsmessungen ist gleichsam die Kenntnis von Bedeutung, wie viel mol Kohlendioxid pro Zeit- und Flächeneinheit durch den Boden diffundieren. Um dies festzustellen wurde im März 2013 der CO₂-Fluss im Boden der Birnenmofette ermittelt (Abb. 16).

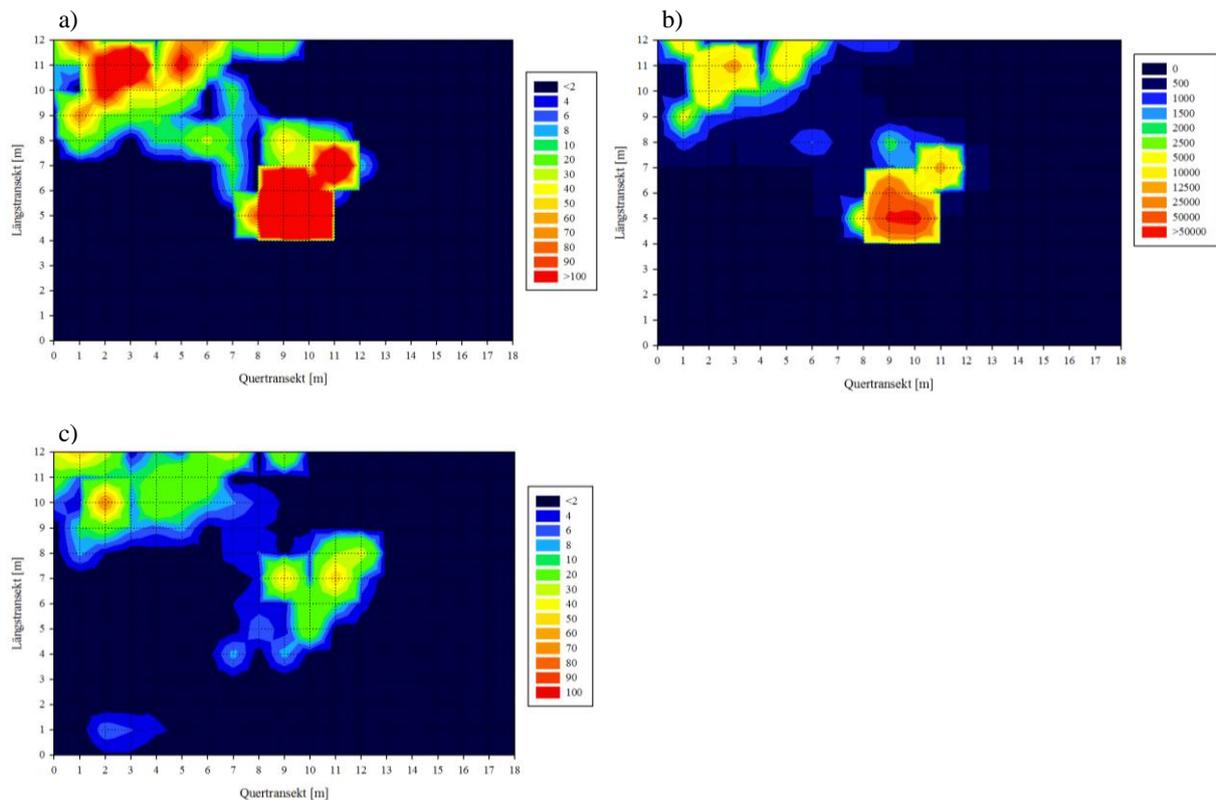


Abb. 16: CO₂-Fluss [mol CO₂ m⁻² d⁻¹] (a), CO₂-Fluss [g CO₂ m⁻² d⁻¹] (b) und CO₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Bereits bei einer ersten Betrachtung der Einzelabbildungen fällt auf, dass der CO₂-Fluss nicht nur in den zuvor beschriebenen Ausgasungszentren erhöht ist, sondern auch in dem Verbindungsbereich dazwischen. Stellenweise beträgt er 1000 bis 1500 mol CO₂ m⁻² d⁻¹. Diese Werte können jedoch unterschätzt sein, da der Messbereich des CO₂-Sensors für die CO₂-Konzentration auf 1 bis 30% festgelegt ist. Außerhalb dieses Wertebereiches sind Messabweichungen möglich (Dräger Polytron Transmitter IR CO₂ Betriebsanleitung 2002). Größtenteils liegen die Werte aber zwischen 10 und 80 mol CO₂ m⁻² d⁻¹. An wenigen Messpunkten wurden 100 bis 300 mol CO₂ m⁻² d⁻¹ gemessen, oder Werte unter 10 mol CO₂ m⁻² d⁻¹. In den nicht oder punktuell gasenden Bereichen ist der CO₂-Fluss gleich Null (Abb. 16a,b).

Für eine bessere Vergleichbarkeit mit den gemessenen Gasflüssen durch Kämpf et al. (2013) wurden die gemessenen Werte in g CO₂ m⁻² d⁻¹ umgerechnet. Nach Abb. 16b liegen die Ergebnisse für den CO₂-Fluss überwiegend in einer Wertespanne von 500 bis 10000 g CO₂ m⁻² d⁻¹; partiell betragen sie 12500 bis maximal 66000 g CO₂ m⁻² d⁻¹.

Mit diesen Wertebereichen sind die CO₂-Flüsse in der Birnenmofette beispielhaft für das Untersuchungsgebiet Hartoušov. Durch Kämpf et al. (2013) wurden großflächig

Gasflussmessungen in dem Untersuchungsareal entlang der Počatky-Plesná-Störungszone durchgeführt. Für das Hartoušov-Messgebiet liegen die ermittelten Kohlendioxidflüsse bei minimal 15 bis maximal 60000 g CO₂ m⁻² d⁻¹. Zusätzlich wurden Wertebereiche angegeben, mit deren Hilfe der diffusive Gastransport von den vertikalen konvektiven Gasbewegungen abgegrenzt werden kann. Gasfluss-Werte kleiner 500 g CO₂ m⁻² d⁻¹ kennzeichnen den diffusiven Transport, dementsprechend deuten Werte größer 500 g CO₂ m⁻² d⁻¹ Konvektion an (Kämpf et al. 2013).

Der Abb. 16 ist weiterhin zu entnehmen, dass in den dunkelblau markierten Bereichen nur eine geringe oder keine Bodenatmung gemessen wurde. Dennoch konnten an diesen Messpunkten CO₂-Konzentrationen von 0 bis 3% verzeichnet werden. Diese Werte deuten entweder eine geringe respiratorische Aktivität des Bodens an, oder das Kohlendioxid ist geogenen Ursprungs. Die Herkunft des Kohlendioxids, beziehungsweise der Anteil der Bodenatmung an den Messwerten kann weder bei den Konzentrations- noch bei den Gasflussuntersuchungen geklärt werden. Ein geringer Anteil Bodenatmung von durchschnittlich 2% ist jedoch bei Gasflussmessungen zu berücksichtigen (Kämpf et al. 2013). Die Diffusion von biogen produziertem CO₂ läge unter 25 g CO₂ m⁻² d⁻¹ (Farrar et al. 1999; Kämpf et al. 2013). Nach Larcher (2001) werden in Wald-, Heide-, Rasen- und Mähwiesen Werte von 2,4 bis 24 g CO₂ m⁻² d⁻¹ für die Bodenatmung gemessen. Die Entstehung von biogenem Kohlendioxid ist jahreszeitenabhängig und vor allem von der Temperatur (Mielnick und Dugas 2000; Larcher 2001; Frank et al. 2002). Die Gasflussmessungen erfolgten im März 2013, also im Übergang zwischen Winter und Frühling. Die Tagesdurchschnittstemperatur in diesem Monat lag bei -1 °C. Während des Untersuchungszeitraumes lagen die Tagestemperaturen im Mittel bei circa -2,6 °C. Demnach kann vermutet werden, dass eine dermaßen geringe Bodenatmung stattgefunden hat (Mielnick und Dugas 2000; Frank et al. 2002), dass sie mit dem Messsystem nicht erfasst werden konnte.

Ein Vergleich der Abb. 16a,c legt die Vermutung nahe, dass Kohlendioxidkonzentration und Fluss voneinander abhängig sind. Die Überprüfung dieser Hypothese ergibt mit der derzeitigen Datengrundlage einen schwachen statistischen Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,2851. Dieses Ergebnis ist konträr zu Gasfluss-Messungen an anderen Mofetten, wie beispielsweise der Stavešinci-Mofette im Nordosten Sloweniens. Bei Vodnik et al. (2009) besteht ein starker Zusammenhang zwischen den CO₂-Konzentrationen und dem Gasfluss.

Diese gegensätzlichen Ergebnisse lassen sich mit Hilfe des 1. Fickschen Gesetzes erklären.
Nach der Gleichung

$$I = -D_B \cdot d_c / d_x$$

(Gleichung 1)

ist der Gasfluss I , in mol pro Flächen- und Zeiteinheit, gleich dem Diffusionskoeffizienten D_B ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) multipliziert mit dem Quotienten aus der Konzentrationsveränderung c (mol cm^{-3}) und der Diffusionsstrecke x (cm) (Scheffer und Schachtschabel 2010). Der Diffusionskoeffizient ist eine konstante Größe, die sich auf die Diffusion eines Gases, in diesem Falle Kohlendioxid, in der Außenluft bezieht (Takle et al. 2004). Das Minuszeichen steht für die Bewegung der Moleküle von Orten hoher Konzentrationen zu solchen niedriger Konzentrationen (Chiodini et al. 1997). Der Quotient aus der Konzentration und der Diffusionsstrecke beschreibt den vertikalen Konzentrationsgradienten des CO_2 (Takle et al. 2004) von unten nach oben. Bei konstanten Bedingungen erreicht die Diffusion durch ein Medium einen Gleichgewichtszustand, bei dem der diffusive Gasfluss zu dem Konzentrationsgradienten proportional ist (Chiodini et al. 1997; Etiope 1999).

Unter der Annahme, dass die Diffusionsstrecke festgelegt ist, kann die zeitliche Konzentrationsveränderung nur variieren, wenn die Konzentration des Kohlendioxids, beziehungsweise der Mengenanteil des CO_2 am Bodengas, zu Beginn des Diffusionsweges zu- oder abnimmt; denn der Diffusionskoeffizient ist ebenfalls eine konstante Größe. Ist dies gegeben, ändern sich die Konzentration über die Zeit und folglich auch der Gasfluss, allerdings nur unter der Prämisse, dass sich die Diffusion ungehindert vollzieht. Mit Berücksichtigung von Hindernissen, wie beispielsweise partiellen Bodenverdichtungen oder des Wurzelfilzes, ist nur die Schlussfolgerung möglich, dass nicht der tatsächliche Konzentrationsgradient über die Zeit gemessen wird, da ein Teil des CO_2 an den Widerständen verbleibt, und möglicherweise lateral diffundiert statt vertikal. Folgerichtig kann es nicht zu einem starken Zusammenhang zwischen einer einmalig punktuell gemessenen Kohlendioxidkonzentration und dem CO_2 -Fluss kommen. Dieser Wert gilt nur für die Messtiefe, und lässt keinen Rückschluss auf die zeitliche Konzentrationsveränderung zu, die an der Erdoberfläche ermittelt wird.

Durch die Untersuchungen von Etiope (1999) ist ein weiterer Erklärungsansatz möglich, und zwar mithilfe von Kohlendioxidkonzentrations- und Flussmessungen auf zwei Wiesenflächen in der Toskana (Zentral-Italien). Die Areale wurden nach identischen Bodeneigenschaften ausgewählt, aber nach unterschiedlicher Sekundärpermeabilität des Unterbodens, die durch tektonische Störungen hervorgerufen wurden. Aus vergleichenden Gasflussmessungen

ergaben sich folgende Schlussfolgerungen: In dem nicht-gasenden Boden findet nur Diffusion statt, während es an gasenden Stellen zur Advektion kommt (Etiopie 1999). In Kap. 1.2.2 wurde der Begriff der Konvektion thematisiert, der einen vertikalen Transport aufgrund von Dichteveränderungen beschreibt. Im Gegensatz dazu steht die Advektion. Sie bedingt die horizontale Massenbewegung einer Größe. Allerdings werden beide Begriffe simultan verwendet, denn der physikalische Prozess ist bei beiden äquivalent, einzig die Auslöser unterscheiden sich (Lege et al. 1996). Es ist davon auszugehen, dass in diesem Falle der vertikale Transport ausschlaggebend ist, durch die Tatsache, dass es auf kurzen Distanzen zu starken Konzentrationsschwankungen kommt (Vodnik et al. 2006).

Durch den advektiven Gastransport können die gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen in unterschiedlichen Bodentiefen keine Vermutungen über den CO₂-Fluss zulassen. Berechnete Flüsse, mit Hilfe des 1. Fickschen Gesetzes, wären immer niedriger als die tatsächlich gemessenen Werte; folgerichtig kann es zu keinem starken Zusammenhang zwischen den Konzentrationen und den CO₂-Flüssen in der Birnenmofette, kommen. Dieses Fazit wird noch durch die Messergebnisse für das Hartoušov-Gebiet bekräftigt (Kämpf et al. 2013). Eine Betrachtung der Kohlendioxidkonzentrationen und der Flüsse an den Messpunkten zeigt tendenziell, dass an Stellen mit hohen Konzentrationen zugleich die CO₂-Flüsse hoch sind. Jedoch gilt dieser Zusammenhang nicht für alle Messungen, sodass auch dort der Zusammenhang nur schwach sein kann.

Nach diesen Erkenntnissen sind letztendlich die unterschiedlichen Resultate von der Birnenmofette und der Stavešinci Mofette zu klären. Die Fläche wurde nach den CO₂-Konzentrationen in drei Bereiche eingeteilt: niedrig, mittel und hoch. Für alle Teilflächen konnte eine hohe Korrelation zwischen dem CO₂-Fluss und den CO₂-Konzentrationen festgestellt werden (Vodnik et al. 2009). Die Werte für den Fluss liegen im Tagesmittel bei 4,6 bis 27,9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für den niedrigen CO₂-Bereich, bei 6 bis 92,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für den mittleren und bei 68 bis 268 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für den hohen CO₂-Messbereich (Vodnik et al. 2009). Diese Zahlen liegen teilweise unter dem oben erwähnten Wert von 25g CO₂ m⁻² d⁻¹ (Kämpf et al. 2013), der in nicht CO₂-führenden Böden gemessen werden kann. Demzufolge können in diesem Fall bessere Korrelationen zwischen den Konzentrationen und den Flüssen zu Stande kommen, vergleichbar mit den Bodenmessungen in der nicht-gasenden Wiesenfläche in der Toskana (Zentral-Italien), bei Etiopie (1999). Zusätzlich kann vermutet werden, dass der Gastransport durch den Boden ungehinderter funktionierte, da die Grasnarbe, beziehungsweise die Vegetation, von den Messstellen entfernt wurde. Dadurch entstand eine höhere Homogenität des Diffusionsmediums. Das würde einen genaueren

Konzentrationsgradienten über die Zeit begünstigen und somit einen besseren Bezug zu den Bodengaskonzentrationen zeigen. Eine weitere Differenz entstand durch die verschiedenen Untersuchungszeiträume. Während die Messungen in der Birnenmofette im März durchgeführt wurden, fand die Datenerhebung bei Vodnik et al. (2009) im Sommer statt. Nach Fang und Moncrieff (2001) reagiert der CO₂-Fluss sehr sensitiv auf Veränderungen der Temperatur in der bodennahen Luftschicht. Bereits kleinste Schwankungen haben einen großen Einfluss auf die CO₂-Ausströmung. Mit steigenden Lufttemperaturen steigt auch die Bodentemperatur je nach Vegetationsdecke und fällt dann mit zunehmender Bodentiefe ab (Hupfer und Kuttler 2006).

Fazit

Die Auswertungen der Gasflussmessungen in der Birnenmofette weisen erhöhte Werte in den gasenden Bereichen auf. Aufgrund der jahreszeitenabhängigen Wetterbedingungen können diese nicht ausschließlich durch biogene Prozesse im Boden verursacht worden sein. Es konnte nachgewiesen werden, dass neben der Diffusion die Konvektion eine treibende Kraft des gemessenen Gastransportes ist. Mithilfe der Abb. 16 und einem Vergleich mit anderen Messungen in diesem Gebiet wurde festgestellt, dass der Wertebereich der ermittelten Gasflüsse in einem Bereich liegt, der für das Untersuchungsgebiet ermittelt werden konnte. Die Unterschiede zu verschiedenen Messungen in anderen Mofetten konnten durch den Messzeitraum, die Bodenbeschaffenheit und Unterschiede in der Durchführung erklärt werden.

3.1.1.4 Bodenwasser

Auch der Wassergehalt des Bodens kann Erklärungen für die Verteilung der Exhalationen sowie ihrer Konzentrationen beitragen (Abb. 17). Der Porenraum der Pedosphäre ist entweder mit Luft oder Wasser gefüllt; aufgrund dessen kommt es zu Wechselwirkungen zwischen Wasser und Gasdiffusion (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Der größte Teil der Untersuchungsfläche ist mit Wassergehalten von 22 bis 30% mäßig feucht. Im mittleren Bereich der Fläche und am südlichen Rand (Kap. 2.2) ist der Boden sehr trocken (18 bis unter 14%). Frische Feuchteverhältnisse sind in südwestlichen und vereinzelt in nordöstlichen Messquadraten zu finden, mit prozentualen Wasseranteilen von über 30%. Im Vergleich mit der CO₂-Abbildung ist auffallend, dass diese Bodenproben, mit wenigen Ausnahmen, aus dem Kontrollbereich stammen. Ferner sind die trockensten Proben in den CO₂-Zentren zu verorten.

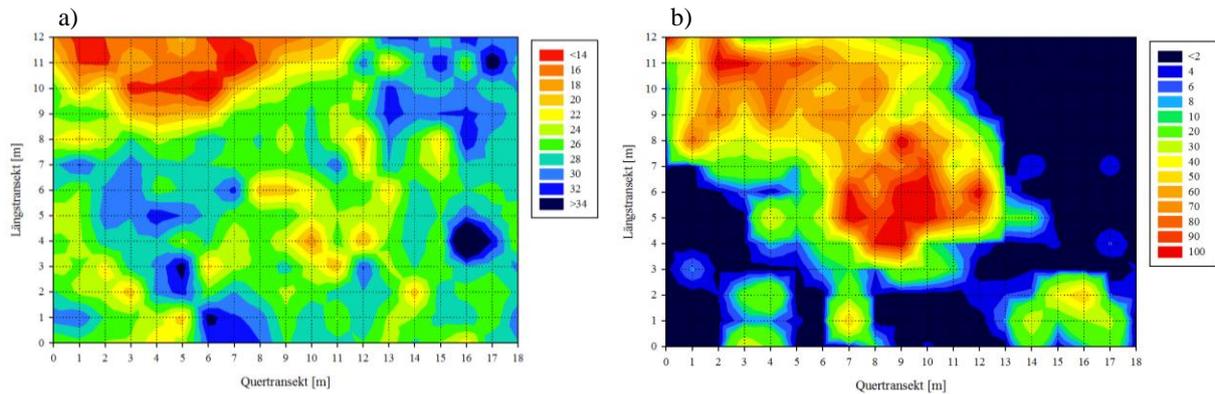


Abb. 17: Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Nach Saßmannshausen (2010) ist die gleichmäßige Verteilung des Bodenwassers auf das weitestgehend ebene Relief der Fläche zurückzuführen. Der sehr trockene Bereich im Südosten der Mofette kommt durch die dortige mangelnde Speicherfähigkeit des Bodens für Wasser zustande. In diesem Teil der Fläche treten skelettartige Rohböden in Erscheinung (Saßmannshausen 2010). Diese sind hauptsächlich durch das Bodenskelett mit großen Korngrößen (>2mm) gekennzeichnet (Scheffer und Schachtschabel 2010); außerdem mit großen Porenräumen, die nicht in der Lage sind, Wasser zu halten. Dementsprechend lassen sich die niedrigen Wassergehalte der entnommenen Proben an den betroffenen Messstellen erklären. Anhand der Bodendichte-Messungen (Abb. 27) ist festzustellen, dass der Boden in diesen Messbereichen bereits in den oberen Bodenzentimetern stark verdichtet ist. Zusätzlich grenzt im Süden der Mofette ein abgelassenes Teichbett an, das eine starke Böschungsneigung bewirkt (Kap. 2.2.1). Folglich ist die Wasseraufnahme des Bodens erschwert, gleichzeitig wird ein Oberflächenabfluss von Niederschlagswasser begünstigt (Saßmannshausen 2010).

Bei einer Gegenüberstellung aller drei Bodeneigenschaften, CO₂-Konzentration, CO₂-Fluss und Wassergehalt, ist auffällig, dass die höchsten Kohlendioxidflüsse in den trockensten Bereichen der Birnenmofette gemessen wurden (Abb. 16a,b;17a,b). Im umgekehrten Falle wurden die niedrigsten in den nassesten Teilen der Fläche gemessen. Die Kohlendioxidkonzentrationen hingegen folgen zunächst scheinbar dem gleichen Muster, da einige der hohen CO₂-Konzentrationen an den trockensten Messstellen notiert wurden. Bei einer genaueren Betrachtung fällt jedoch auf, dass diese Beobachtung nicht für die gesamte Fläche gilt. Gerade in dem mittleren Ausgasungsschwerpunkt ist der Oberboden mäßig bis frisch feucht und auch an isolierten CO₂-Ausströmungen mit hohen CO₂-Werten ist der Wassergehalt des Bodens mäßig bis frisch.

Die Diffusion des Kohlendioxids ist unter anderem abhängig von der Verteilung des Bodenwassers im Porenraum und der Porengrößenverteilung. Mit Wasser gefüllte Bereiche des Porenraumes beschränken die Diffusion des Gases auf seinem Weg an die Bodenoberfläche, da Gas schlechter durch Wasser diffundiert als durch Luft (Scheffer und Schachtschabel 2010). Zusätzlich haben größere Porenvolumina eine effizientere Gasleitfähigkeit als kleine, denn die kleinen Porenräume werden bevorzugt vom Bodenwasser besetzt, und sind somit keine geeigneten Diffusionsbereiche. Folglich ermöglichen die trockenen Rohbodenbereiche im Südosten ebenso wie die teilweise trockene Zone in der Mitte der Fläche, eine gute Diffusion des Kohlendioxids.

Des Weiteren kommt der Temperatur als Einflussgröße der Diffusion, eine gewisse Bedeutung zu. Trockene Böden haben bei gleicher Umgebungstemperatur eine höhere Temperatur als nasse. Der Luftgehalt der Bodenschichten, der in trockenen höher ist als in feuchten (Scheffer und Schachtschabel 2010), wirkt isolierend, wodurch die Wärme besser gespeichert wird. Feuchte Böden hingegen leiten Wärme weiter; dementsprechend erniedrigt sich die Bodentemperatur. Schließlich hat auch die Pflanzendecke Einfluss auf die Erwärmung des Bodens. Ein überwachsener Boden wird durch die Sonneneinstrahlung nicht so stark erhitzt wie ein unbewachsener Boden, da eine Beschattung durch die Vegetation stattfindet (Pott und Hüppe 2007). Die Gasexhalationen werden demnach in den trockenen Teilflächen der Birnenmoofette begünstigt, da vermutet werden kann, dass in diesen die Bodentemperaturen höher sind als in den feuchteren. Diese Überlegungen werden durch eine vergleichende Betrachtung der Abb. 17 a,b bestärkt.

Bei einer statistischen Verifizierung der Wechselwirkungen, zwischen Bodenwasser und CO₂-Konzentration ergibt sich jedoch nach dem derzeitigen Wissensstand kein starker Zusammenhang (aber siehe Saßmannshausen 2010). Das gleiche gilt auch in Verbindung mit dem Gasfluss.

Ähnliche Resultate wurden auch in anderen Forschungskampagnen festgestellt, wie zum Beispiel bei Mielnick und Dugas (1999), Frank et al. (2002) oder Vodnik et al. (2009). Alle drei Untersuchungen haben gezeigt, dass das Muster des Gasflusses dem der Bodentemperatur folgt. Frank et al. (2002) postulierten nach diversen Analysen, dass die Bodentemperatur die dominanteste Einflussgröße auf den Kohlendioxidtransport ist, im Gegensatz zu Bodenwassergehalt und atmosphärischem CO₂-Anteil (Frank et al. 2002).

Mielnick und Dugas (2000) erzielten ebenfalls das Ergebnis, dass der Gasfluss auf die Bodentemperatur reagiert, statt auf den Bodenwassergehalt. Die Daten zeigten zunächst, dass die höchsten CO₂-Flüsse mit den höchsten Niederschlagsmengen gemessen wurden.

Entscheidend für die Einwirkung auf den CO₂-Fluss war jedoch die konstant stabile Bodentemperatur. Daraus lässt sich die Hypothese ableiten, dass der Kohlendioxidtransport im Boden in dem Falle vom Wassergehalt abhängig ist, wenn große Niederschlagsmengen auftreten. Sind jedoch die saisonalen Schwankungen des Bodenwassers gering, ist es als Einflussgröße zu vernachlässigen (Vodnik et al. 2009), während die Bodentemperatur die bedingende Variable darstellt.

Im Gegensatz zu Mielnick und Dugas (2000), Frank et al. (2002) und Vodnik et al. (2009), wurden die Gasflussmessungen in der Birnenmofette einmalig durchgeführt und können daher nur als Momentaufnahme betrachtet werden. Aus diesem Grund ist es nicht möglich die Daten aus der Fläche, hinsichtlich dieser Hypothese, zu überprüfen. Zum Einen können nur die Bodenwassergehalte aus März 2009 für eine Erklärung des CO₂-Flusses hinzugezogen werden, zum Anderen würde eine Auswertung der Niederschlagsmengen in dem betreffenden Untersuchungszeitraum der Flussmessungen kein Ergebnis erzielen, da nicht verifiziert werden kann, wie sich der Gasfluss in Abhängigkeit von anderen Niederschlagsmengen verhalten hätte.

Vodnik et al. (2009) zu Folge sind untere Bodenschichten mit Wassergehalten von 45% Barrieren für den Gastransport, da ihre Gasdurchlässigkeit eingeschränkt ist. Dies trifft auch für die Birnenmofette zu. An den Messstellen mit den höchsten Wassergehalten (maximal 43%) sind die Werte für den Gasfluss gleich Null.

Aus einer vergleichenden Analyse der Kohlendioxidkonzentrationen und des Bodenwassers, ergibt sich zuerst, dass die CO₂-Exhalationen keine Austrocknung der oberen Bodenschichten bewirken, denn die CO₂-Konzentrationen sind, wie bereits erwähnt, auch an den feuchten Messstellen hoch. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem von Vodnik et al. (2009). Durch statistische Analysen konnte bereits geklärt werden, dass das Bodenwasser keinen Einfluss auf die Verteilung der CO₂-Konzentrationen hat. Feuchte Böden weisen in der Regel höhere CO₂-Gehalte auf als trockene (Scheffer und Schachtschabel 2010). Dies würde bei genauerer Betrachtung durch die Daten punktuell bestätigt, aber nicht für die gesamte Untersuchungsfläche. Es existieren Argumente gegen diesen Zusammenhang:

- ❖ Der Bodenwassergehalt ist sehr starken Schwankungen unterworfen (Ellenberg et al. 2001), denn er wird sowohl von den Niederschlagsmengen, als auch vom Grundwasserspiegel bedingt. Diese Tatsache kann mit einer wiederholten Messung des Bodenwassergehaltes in der Birnenmofette bestätigt werden (Abb. 18).

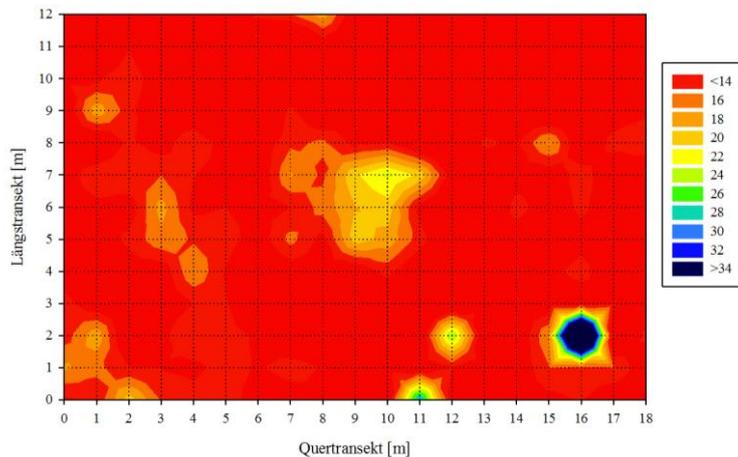


Abb. 18: Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juni 2014)

Im Vergleich mit den Bodenwassergehalten von März 2009 (Abb. 17) wird rasch deutlich, dass der Boden der Birnenmofette im Juni 2014 sehr trocken war. Es existieren keine Zusammenhänge der Bodenfeuchte von Juni 2014 mit anderen Bodeneigenschaften.

Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass extrem kurzzeitige Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen, vergleichbar mit dem Gasfluss, eine Folge von starken ebenfalls kurzzeitigen Wetterereignissen sind, wie beispielsweise Niederschläge oder Gewitter. Für eine Verifizierung dieser Annahme wären dauerhafte Kohlendioxidmessungen von Nöten, mit gleichzeitiger Erfassung diverser Wetterfaktoren und des Grundwasserspiegels.

- ❖ Gerade in den oberen Bodenschichten wird der Wassergehalt von den mikroklimatischen Bedingungen beeinflusst. Die Feuchtigkeit der bodennahen Luftschicht entsteht durch Verdunstungsprozesse im Boden, wobei die Wassersättigung dieser Schicht der kontrollierende Faktor ist (Hupfer und Kuttler 2006). Besteht ein Feuchtigkeitsdefizit zwischen der bodennahen Luftschicht und dem Boden, wird es durch Erhöhen der Verdunstung aus dem Boden ausgeglichen. Sobald ein Gleichgewicht eingestellt ist, wird die Verdunstung aus den oberen Bodenschichten niedriger. Eine zusätzliche Variable ist der Wind, der über die Erdoberfläche streicht, wobei er das Defizit zwischen der bodennahen Luftschicht und dem Oberboden verstärkt. Um dies zu überprüfen, wären die bereits oben genannten dauerhaften Messungen der CO₂-Konzentrationen sinnvoll, allerdings bei gleichzeitiger Aufnahme der mikroklimatischen Bedingungen.

- ❖ Eine wesentliche Bedeutung in Bezug auf den Bodenwassergehalt, kommt zusätzlich der Vegetation zu. Die Birnenmofette wird wenig durch Bäume oder Sträucher beschattet. Dies führt zu einer verstärkten Austrocknung des Oberbodens. Weiterhin ist nicht einzig die mangelnde Beschattung der Vegetation zu beachten, sondern zusätzlich die Transpiration der Pflanzen selbst. Die Transpiration ist wiederum von den mikroklimatischen Bedingungen, wie beispielsweise Luftfeuchtigkeit oder Luftbewegung, abhängig. Während einer verstärkten Transpiration wird dem Boden durch die Wasseraufnahme der Pflanzen über die Wurzeln mehr Feuchtigkeit entzogen, als wenn die Transpiration niedrig wäre.
- ❖ Bei vorherigen Interpretationen wurde mehrfach auf den im Südosten befindlichen Bereich der Fläche eingegangen, in dem ein skelettartiger Rohboden vorherrschend ist. Aufgrund der Porengröße und des sich neigenden Reliefs wird es in diesem Teil der Mofette nie zu einer guten Wasserspeicherung im Oberboden kommen. Der Oberflächenabfluss des Regenwassers ist dort sehr hoch. Infolgedessen ist in diesem Bereich nicht mit Einwirkungen des Bodenwassers auf die CO₂-Konzentrationen zu rechnen.

Fazit

Die Bodenuntersuchungen haben aufgezeigt, dass der Boden innerhalb der Birnenmofette, im März 2009, mäßig feucht bis trocken ist, und dass die höchsten CO₂-Konzentrationen an den trockensten Messstellen gemessen wurden. Die variierenden Feuchteverhältnisse konnten mit unterschiedlichen Wasserspeichereigenschaften des Bodens begründet werden. Aus den genannten Einflussgrößen auf das Bodenwasser, sowie aus einer Wiederholung der Bodenfeuchte-Messungen wurde deutlich, dass der Wassergehalt des Bodens ein variabler Faktor ist. Aus diesem Grund kommt er als bedingender Parameter für die CO₂-Konzentrationen oder den Gasfluss in dieser Arbeit wenig in Frage. Dies konnte durch statistische Analysen und weitere Quellen bestätigt werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass einzig spontan extreme Wetterschwankungen auf die Kohlendioxidgehalte oder den Gastransport wirken.

3.1.1.5 Anteile der organischen Bodenbestandteile an der Festphase

Die festen Bestandteile der Bodenproben wurden ausschließlich auf ihren prozentualen Anteil des organischen Materials an der Bodenzusammensetzung hin untersucht (Abb. 19).

Bei der Analyse der Abb. 19 wird schnell klar, dass sich auch im organischen Mengenanteil des Bodens das Muster der zwei prägnanten Ausgasungszentren wiederholt. Im mittleren Bereich der Birnenmofette und an ihrem südöstlichen Rand (Kap. 2.2) hat das organische Material den geringsten Anteil an den festen Bodenbestandteilen. Das Gleiche ist ebenfalls am nordöstlichen Rand festzustellen. In diesen Teilen der Fläche liegt der organische Mengenanteil in einem Wertebereich von überwiegend 10 bis unter 6%. Das entgegengesetzte Extrem, ein Boden mit hohem organischem Anteil, ist nur an einzelnen Stellen mit Werten von 28 bis 30% vertreten. Größtenteils beträgt in diesem Untersuchungsstandort der prozentuale Anteil der organischen Substanz 12 bis 20% an der Festphase des Bodens.

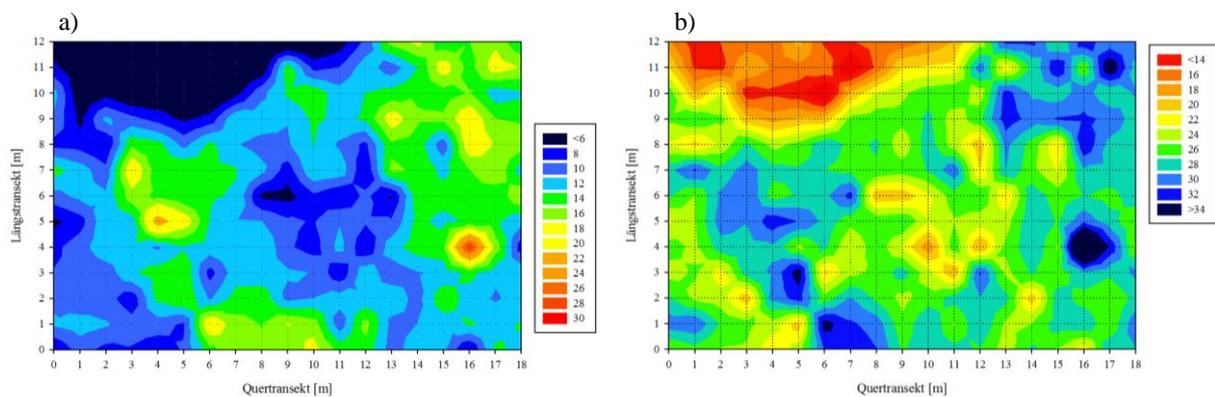


Abb. 19: Anteil organischer Substanz an der Festphase [%] (a) und Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Einem Vergleich mit den Kohlendioxidkonzentrationen ist zu entnehmen, dass die Extreme beider Bodeneigenschaften in den Abb. 19 a,b deckungsgleich sind. Die Stellen mit hohen organischen Gehalten sind gleichzeitig auch diejenigen mit den höchsten CO_2 -Werten und umgekehrt. Selbst das Verbindungsstück zwischen ihnen ist als Übergang zwischen den Zentren mit niedrigen organischen Mengenanteilen zu erkennen.

Legt man die Rohdaten beider Bodenparameter einer Korrelationsanalyse zugrunde, ergibt sich mit der aktuellen Datengrundlage allerdings kein Zusammenhang zwischen dem Anteil des organischen Materials an der Bodenzusammensetzung und den CO_2 -Konzentrationen.

Ein gänzlich anderes Resultat ergibt sich aus einer Analyse der Wechselwirkung zwischen der organischen Substanz und dem Wassergehalt des Bodens (Abb. 20). Diese wird durch eine starke Korrelation bestätigt (Bestimmtheitsmaß von 0,74).

In Abb. 20 ist der Zusammenhang deutlich zu erkennen. Die trockenen Einzelbereiche der Mofette, mit Werten von 20 bis unter 14% Wasser im Porenraum, haben mit Ergebnissen von

10 bis weniger als 6% die geringsten organischen Mengen an den festen Bodenbestandteilen. Der überwiegende Teil der Fläche mit mäßig erhöhten organischen Anteilen von 12 bis 20% ist mit Werten von 24 bis 30% Bodenwasser zugleich der vorwiegend mäßig feuchte.

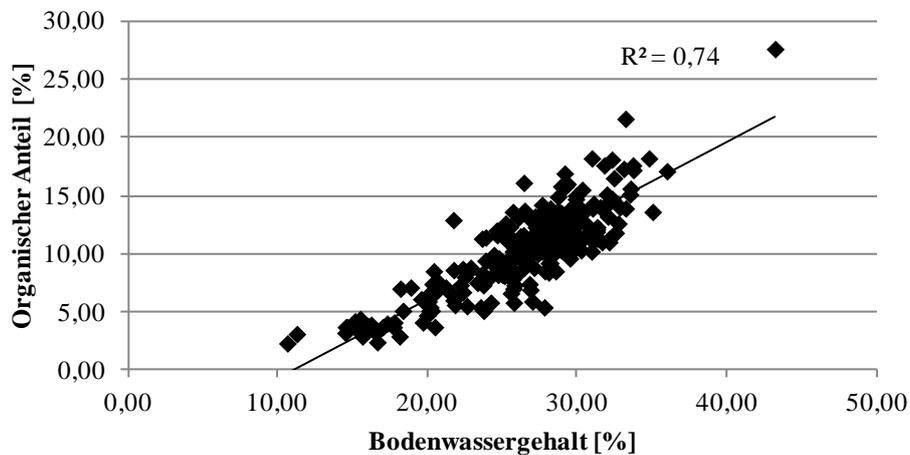


Abb. 20: Korrelationsanalyse mit dem Bodenwassergehalt [%] und dem Anteil des organischen Materials an den festen Bodenbestandteilen [%] in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm der Birnenmofette. (Datenerhebung März 2009)

Das Resultat der Korrelationsanalyse, beziehungsweise das Bestimmtheitsmaß, ist etwas niedriger als bei Saßmannshausen (2010), was durch die unterschiedliche Art der Datenverarbeitung zustande kommt (Saßmannshausen 2010; Scheffer und Schachtschabel 2010). Weiterhin wird verdeutlicht, dass auch in einem Mofettenboden der Wassergehalt des Bodens die dominierende Größe hinsichtlich der organischen Anteile am Bodensubstrat ist. Die Bildung des organischen Gehaltes ist ein von der Bodendurchlüftung abhängiger Vorgang (Scheffer und Schachtschabel 2010). Je besser ein Boden durchlüftet ist, umso effektiver verlaufen die Abbauprozesse pflanzlichen oder tierischen Materials durch die Mikroorganismen; folglich ist er humusärmer. Im Umkehrschluss ist demnach ein Boden mit dauerhaftem Luftmangel humusreicher, da, einhergehend mit dem Luftmangel, die Arbeit der Bodenlebewesen gehemmt wird. Ergänzend sollte aber weiter berücksichtigt werden, dass ein durch Wassermangel stark ausgetrockneter Boden, die Umgestaltungs- und Abbauprozesse limitiert. So kann auch ein trockener Boden unter bestimmten Bedingungen einen hohen organischen Anteil haben (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Die Abhängigkeit des Abbaus organischen Materials von der Bodendurchlüftung ist wahrscheinlich für den südöstlichen Teil der Birnenmofette zutreffend. Dort hat der Boden den geringsten Wassergehalt, wodurch die Porenvolumina hauptsächlich luftgefüllt sind. Aufgrund dessen würden die Aktivitäten der Mikroorganismen begünstigt, sodass in diesem

Bereich der Fläche zugleich die niedrigsten Anteile organischer Substanz an den festen Bodenbestandteilen zu messen wären. An den verschiedenen Kontrollpunkten im Südwesten und Nordosten hatten die entnommenen Bodenproben einen höheren Wassergehalt mit entsprechend höheren organischen Mengenanteilen. Die Feuchtigkeit des Bodens hat demnach zu einer Hemmung der Umwandlungs- und Abbauprozesse geführt, woraus eine organische Anreicherung resultiert. Die Ergebnismuster im mittleren sowie nordöstlichen Teil der Fläche sind vergleichbar mit den bereits beschriebenen, wobei sie Übergangszonen mit mäßigen Wasser- und Organikgehalten zwischen den Extremen darstellen.

Die Abhängigkeit der organischen Substratbildung von der Bodengaszusammensetzung kann mithilfe der gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen in Frage gestellt werden. Durch den partiell vorkommenden Sauerstoffmangel bereits in den obersten 10 cm des Bodens, herrschen für die Mikroorganismen ungünstige aktivitätsinhibierende Bedingungen. Nach Oppermann et al. (2010) verursachen starke CO₂-Exhalationen Veränderungen in der mikrobiellen Gemeinschaft des Bodens innerhalb einer Mofette, die zudem durch die Nutzung des geogenen Kohlendioxids autotroph ist. Eine heterotrophe Kohlendioxidfixierung konnte nicht festgestellt werden. In Folge dieser Erkenntnisse gewinnt die obige Annahme wieder an Aussagekraft.

Den Beweis für die Tatsache, dass die Kohlendioxidkonzentrationen in keinem Zusammenhang mit der organischen Bodensubstanz stehen, liefern die Proben der südöstlichen und mittleren Messpunkte. Aufgrund der hohen Gaswerte im Südosten kann die Annahme geäußert werden, dass das Aufkommen pflanzlichen Materials durch CO₂-gehemmtes Pflanzenwachstum gering ist (Saßmannshausen 2010) und folglich der Boden geringe Mengen organischer Substanz aufweist. Diese Hypothese hält aber der Betrachtung der Mofettenmitte nicht stand. Hier sind die Kohlendioxidkonzentrationen höher als im Südosten, wodurch sich die gleiche Wechselwirkung zeigen müsste. Die erhöhten Bodenwassergehalte wirken diesem Effekt entgegen, womit die oben geäußerte Hypothese entkräftet wird.

In Abb. 21 sind die Ergebnisse der wiederholten Messung der organischen Mengenanteile abgebildet. Eine Gegenüberstellung der Abb. 21a,b zeigt, dass die Verteilung der organischen Festsubstanz trotz geringer Abweichungen über die Jahre hin sehr konstant ist. Insgesamt kann eine Erhöhung der organischen Gehalte festgestellt werden.

Die Teilbereiche, die im März 2009 geringe Anteile organischen Substrates an der Festphase aufwiesen, haben sich bis Juni 2014 verkleinert. Zusätzlich wurden im Juni 2014 noch höhere

Mengen organischer Substanz an Messpunkten gemessen, an denen im März 2009 bereits mäßige oder höhere Werte ermittelt wurden.

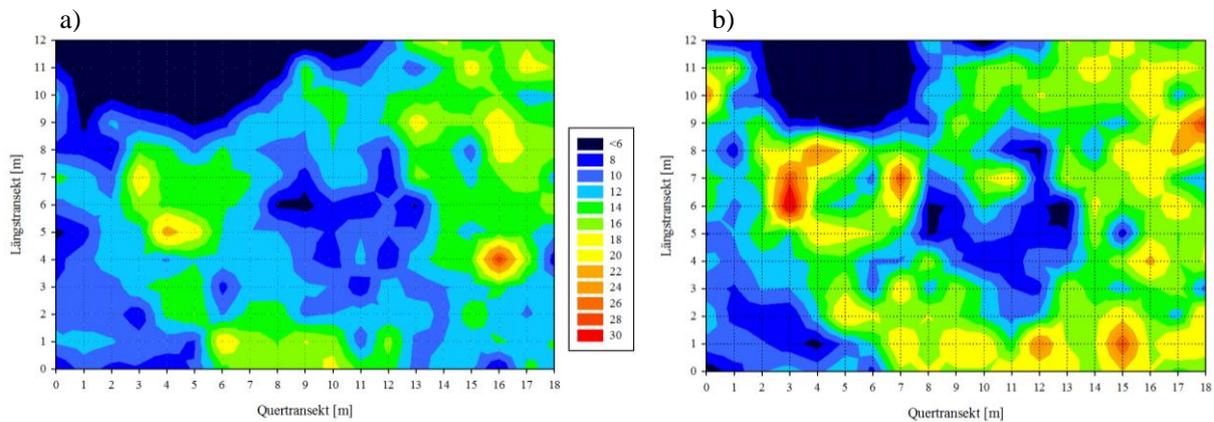


Abb. 21: Vergleich des Gehaltes der organischen Festsubstanz [%] der Birnenmofette in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm im März 2009 (a) mit Juni 2014 (b). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009 und Juni 2014)

Vergleichbar mit den Auswertungen der Ergebnisse aus März 2009 kann auch mit den aktuellen Werten und den zur Verfügung stehenden statistischen Methoden kein Zusammenhang mit den Kohlendioxidkonzentrationen festgestellt werden. Die Erklärungen für dieses Resultat wurden oben bereits erläutert. Außerdem ist keine Abhängigkeit vom Bodenwasser im Juni 2014 nachzuweisen. Ungeachtet dessen lassen sich 33% der Werte des organischen Mengenanteiles durch die Werte der Bodenfeuchte von März 2009 erklären (Abb. 22).

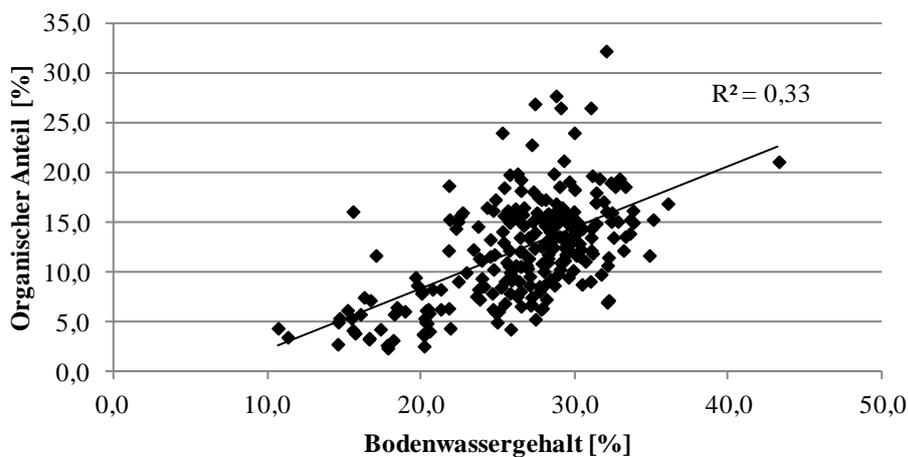


Abb. 22: Korrelationsanalyse mit dem Bodenwassergehalt [%] und dem Anteil des organischen Materials an den festen Bodenbestandteilen [%] in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm in der Birnenmofette. (Datenerhebung März 2009 und Juni 2014)

Das Bestimmtheitsmaß liegt zwar weit unter dem in Abb. 20, dennoch wird deutlich, dass die Bedingungen für den Abbau organischen Materials im März 2009 nachhaltig wirksam sind.

Fazit

Die organischen Mengenanteile an der Festphase des Bodens der Birnenmofette liegen größtenteils im mittleren Wertebereich der gemessenen Gehalte. Wie schon beim Bodenwasser beobachtet werden konnte, fallen die niedrigsten organischen Gehalte mit den höchsten CO₂-Konzentrationen zusammen, auch wenn diese Wechselwirkung nicht mit statistischen Mitteln verifiziert wurde. Es konnte jedoch bestätigt werden, dass das Bodenwasser eine dominierende Einflussgröße auf den organischen Mengenanteil an der Festphase darstellt. Diese Wechselbeziehung könnte mit der Abhängigkeit des Abbaus organischen Materials von der Bodendurchfeuchtung erklärt werden. Die Schlussfolgerungen wurden durch weitere Quellen bestätigt. Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Anteile der organischen Festsubstanz über die Jahre konstant sind.

3.1.1.6 pH-Werte des Bodens

Als eine physiko-chemische Eigenschaft wurde der pH-Wert des Bodens der Birnenmofette im März 2009 gemessen (Abb. 23).

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Pedosphäre innerhalb dieser Fläche vorwiegend als stark sauer und mäßig sauer einzustufen ist (aber siehe Saßmannshausen 2010). Im Südwesten und Nordosten (Kap. 2.2) sind kleinflächige Stellen zu finden, in denen schwach saure oder neutrale pH-Werte gemessen wurden. An vereinzelt Messpunkten sind die pH-Werte im sehr stark sauren Bereich einzuordnen.

Die Interpretation des pH-Wertes vor dem Hintergrund der Kohlendioxidkonzentrationen ergibt kein deutliches Ergebnis. Bei einem ersten Vergleich entsteht der Eindruck, dass der pH-Wert hauptsächlich in den Ausgasungsbereichen im stark sauren Wertebereich liegt, und somit eine Folge der Kohlendioxidexhalationen ist. Einer genaueren Analyse hält dies allerdings nicht stand. Denn erstens liegen auch im Kontrollbereich des Standortes die pH-Angaben in diesem Bereich und zweitens müssten folglich die pH-Werte im Südosten der Fläche zwischen 4,9 bis 4 oder darunter liegen.

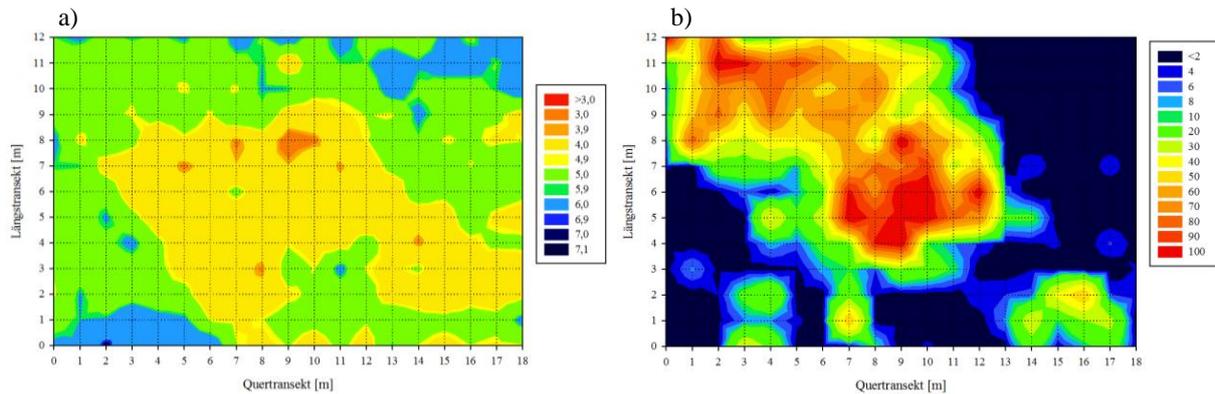


Abb. 23: pH-Wert in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] in einer Tiefe von 40 cm (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Auch der pH-Wert wurde, vergleichbar mit den bereits beschriebenen Bodeneigenschaften, auf potentielle Wechselwirkungen untersucht. Diese Analysen bestätigen die naheliegende Vermutung, dass die Bodenazidität in der Birnenmofette mit den derzeitigen Messergebnissen von keinem anderen der gemessenen pedologischen Faktoren bedingt wird.

Diese Resultate verhalten sich, zumindest bezüglich des Zusammenhangs zwischen pH-Wert und Kohlendioxidkonzentrationen, konträr zu den Ergebnissen bei Vodnik et al. (2006), bei denen die pH-Werte den CO₂-Konzentrationen folgen. Untersuchungen von Rennert et al. (2011) münden jedoch ebenfalls in einem fehlenden Zusammenhang zwischen pH-Wert und Kohlendioxidkonzentration. Aus den Messungen wurde deutlich, dass keine Carbonate im Boden vorhanden sind. Zusätzlich wird die Vermutung geäußert, dass das alkalische von Granit geprägte Einzugsgebiet der Plesná die Bodenazidität beeinflusst (Rennert et al. 2011). Die gleichmäßige Versauerung des Bodens in der Birnenmofette kann eine Folge mehrerer ineinandergreifender Ursachen sein:

- ❖ Zunächst besteht die Möglichkeit, dass die Hypothese von Rennert et al. (2011) auch auf die Birnenmofette zutrifft, da sie in unmittelbarer Nähe des untersuchten Standortes liegt, aber nicht von der Plesná geflutet wird.
- ❖ Nach Saßmannshausen (2010) kommt es hier zu einem Aufeinandertreffen von anthropogenen (erhöhten Schwefelsäureimmissionen durch zwei nahegelegene Braunkohlereviere in Šabina und Sokolov) und mofettogenen (erhöhte Kohlendioxidwerte) Einflüssen, die eine Bodenversauerung begünstigen.
- ❖ Die Vegetation könnte auch einen Beitrag an der flächigen Azidität des Bodens haben, denn viele Arten, zum Beispiel *Calluna vulgaris* oder *Pleurozium schreberi*, die flächig über die gesamte Fläche verteilt sind, produzieren Rohhumus. Diese Pflanzen

sind schlecht zersetzbar und bewirken niedrige pH-Werte (Scheffer und Schachtschabel 2010).

- ❖ Mit zunehmender Bodenversauerung steigt der Al^{3+} -Anteil in der Bodenlösung, wodurch Austauscheroberflächen für basisch wirkende Kationen dezimiert werden. Bei pH-Werten die unter 4,5 liegen, kann sich die Al-Sättigung der Bodenlösung bei 90% einstellen. Die Al-Konzentration in der Bodenlösung steht im Gleichgewicht mit den austauschbaren Al^{3+} -Ionen. Auf diese Weise manifestiert sich eine Versauerung des Bodens, da die Austauscheroberflächen konstant mit Al^{3+} -Ionen besetzt sind und Base-Kationen nicht angelagert werden können (Scheffer und Schachtschabel 2010).
- ❖ Unterschiedlich effektive Pufferkapazitäten der Boden-Puffersysteme bewirken Veränderungen in der Bodenazidität. Demnach besteht die Möglichkeit, dass die Puffersysteme in den stark sauren Bereichen ausgelastet und nicht mehr in der Lage sind den Protoneneintrag abzufangen (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Die Messung der Bodenazidität wurde im Juni 2014 wiederholt (Abb. 24).

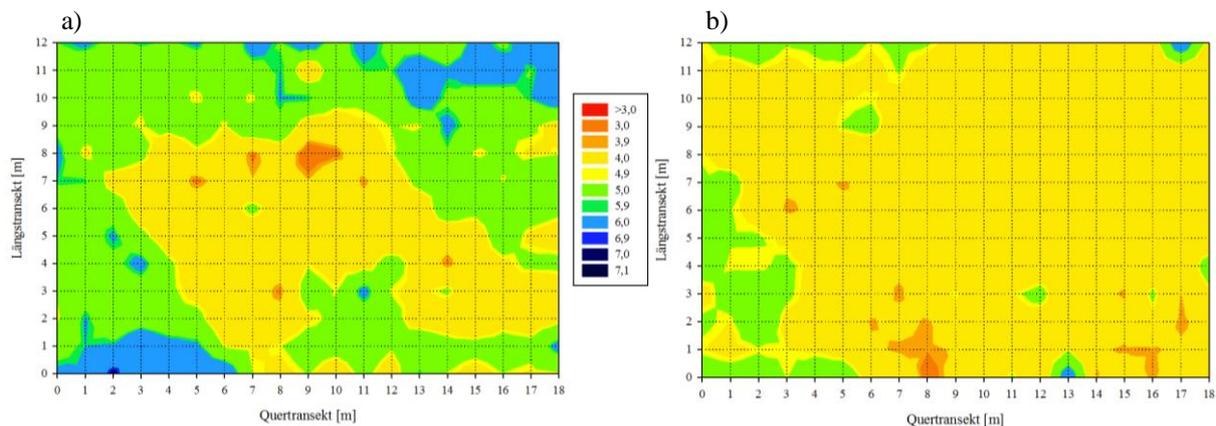


Abb. 24: Vergleich des pH-Wertes in 7 bis 13 cm Bodentiefe im Juni 2014 (a) mit März 2009 (b) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009 und Juni 2014)

Ein Vergleich der pH-Werte von März 2009 und Juni 2014 weist deutlich auf eine zunehmende Versauerung des Bodens hin. Der überwiegende Teil der untersuchten Fläche ist stark sauer nur vereinzelt können pH-Werte im mäßig bis schwach sauren Bereich festgestellt werden. Die sehr stark sauren Stellen im März 2009 sind im Juni 2014 nicht mehr vorhanden. Dafür werden an anderen Punkten pH-Werte in diesem Wertebereich gemessen.

Die fortschreitende Versauerung der Birnenmofette könnte teilweise mit den oben angeführten Erklärungsansätzen begründet werden, auch wenn die Ursachen momentan nicht gänzlich geklärt werden können. Möglicherweise manifestiert sich die Bodenazidität durch

weitere Einlagerungen von Al_3^+ -Ionen im Boden. Außerdem besteht die Option, dass der Protoneneintrag in einem derartigen Maße ansteigt, dass die Puffersysteme nicht mehr in der Lage sind, diesen zu neutralisieren. Die Braunkohlekraftwerke (siehe oben), der zunehmende Kraftverkehr und die landwirtschaftliche Nutzung in der Umgebung könnten Gründe für die anhaltende Bodenversauerung sein.

Fazit

Die Untersuchungen der Bodenazidität in der Birnenmofette haben gezeigt, dass die Fläche stark sauer bis mäßig sauer ist. Vereinzelt wurden sehr stark saure, schwach saure oder neutrale pH-Werte gemessen. Ein Vergleich der Abb. 23a,b führte zu dem Ergebnis, dass die Bodenversauerung keine direkte Folge der CO_2 -Anreicherungen ist. Die Bodenazidität wird vermutlich durch eine Vielzahl abiotischer, biotischer und anthropogener Einflussfaktoren verursacht und auf Dauer vorangetrieben.

3.1.1.7 Stickstoffgehalte

Im Juni 2014 wurden die bislang gemessenen Bodenparameter durch die Messung der Stickstoffgehalte ergänzt (Abb. 25b).

In der Verteilung des Stickstoffs in der Birnenmofette sind wiederholt die zwei prägnanten gasenden Bereiche der Fläche zu erkennen. In den Ausgasungszentren, sowie an wenigen Stellen im Nordosten (Kap. 2.2), liegen niedrige Stickstoffgehalte vor (0,1 bis 0,3%). Überwiegend betragen die Stickstoffwerte jedoch 0,4 bis 0,6% und an vereinzelt Messpunkten 0,7 bis über 1%.

Bei einer Gegenüberstellung der Abb. 25b,c ist zu erkennen, dass die Verteilung des Stickstoffs stark der Verteilung der organischen Festsubstanz entspricht. Niedrige Stickstoffmengen wurden an Punkten mit niedrigen organischen Mengenanteilen gemessen und umgekehrt.

Eine erkennbare Übereinstimmung ist auch in Verbindung mit den Kohlendioxidkonzentrationen festzustellen (Abb. 25d). Geringe Mengen Stickstoff wurden überwiegend an gasenden Messstellen ermittelt, während hohe Stickstoffgehalte hauptsächlich in Kontroll- oder mäßig gasenden Bereichen gemessen wurden. Jedoch gibt es wenige Messpunkte, an denen sowohl die Stickstoffgehalte hoch und zugleich die CO_2 -Konzentrationen erhöht sind.

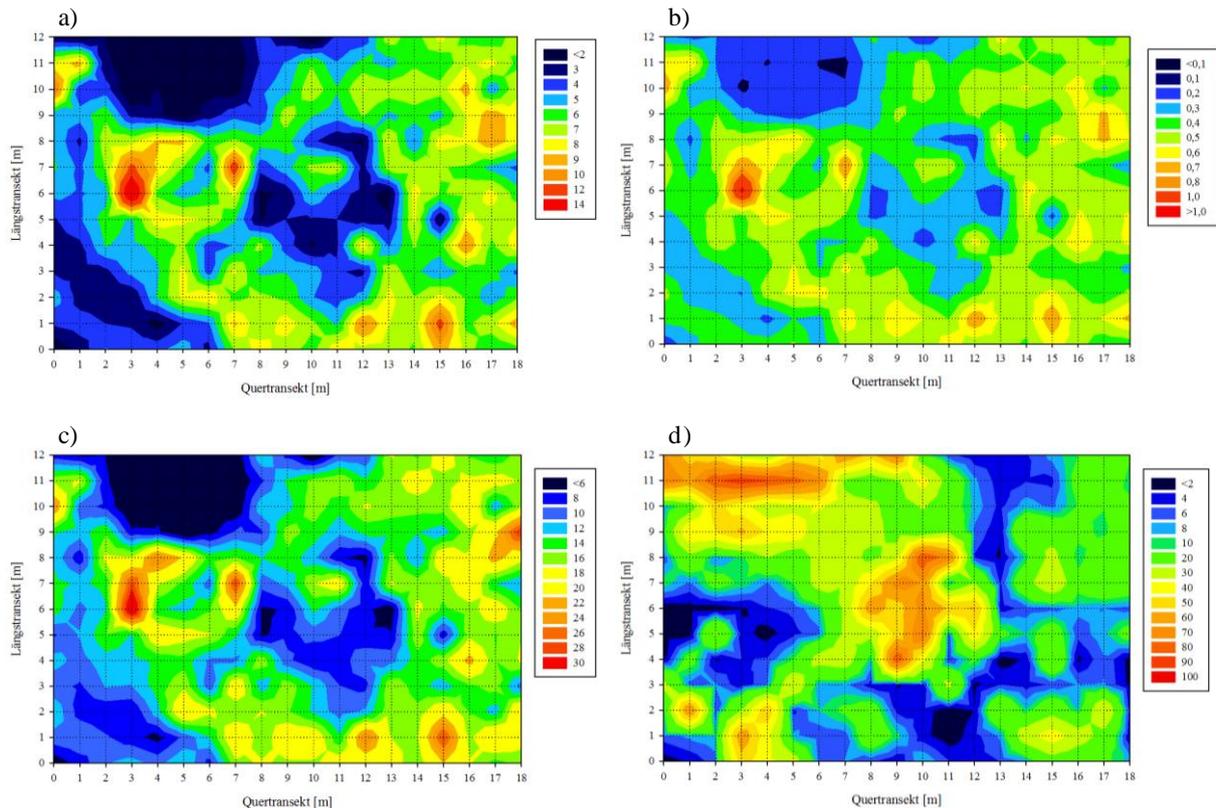


Abb. 25: Kohlenstoffgehalt [%] (a) und Stickstoffgehalt [%] (b) im Vergleich mit der Menge des organischen Anteils an der Festphase [%] (c) in 7 bis 13 cm Bodentiefe, sowie der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März und Juni 2014)

Bei einer Betrachtung der Abb. 25a,b ist offensichtlich, dass niedrige Stickstoffgehalte mit geringen Kohlenstoffgehalten einhergehen und umgekehrt.

Auch in der Verteilung des Kohlenstoffs sind die Ausgasungsschwerpunkte deutlich zu erkennen (Abb. 25a). An den gasenden Messpunkten wurden Werte von unter 2 bis 4% gemessen. Die meisten Kohlenstoffgehalte liegen jedoch in einem Wertebereich von 5 bis 8%. Vereinzelt sind Punkte mit hohen C-Gehalten festzustellen (9 bis 16%).

Die Abbildung der ermittelten Kohlenstoffgehalte ist nahezu deckungsgleich mit der Abbildung der organischen Festsubstanz (Abb. 25a,c). Wie bereits bei den Stickstoffgehalten festgestellt werden konnte, befinden sich Bereiche niedriger Kohlenstoffgehalte genau dort, wo geringe Mengen organischen Substrates gemessen wurden. Hingegen fallen hohe Kohlenstoffwerte mit hohen Mengenanteilen organischer Substanz zusammen.

Aus einem Vergleich der Abb. 25a,d lassen sich ähnliche Beobachtungen feststellen, wie aus dem Vergleich der Abb. 25b,d. Geringe Mengen Kohlenstoff wurden an stark gasenden Stellen gefunden, während sich hohe Kohlenstoffgehalte in Kontroll- oder Übergangsbereichen befinden.

Die optisch erkennbaren Zusammenhänge können statistisch belegt werden (Abb. 26a-c). Jedoch sind mit der aktuellen Datengrundlage keine Abhängigkeiten der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte von den Kohlendioxidkonzentrationen festzustellen.

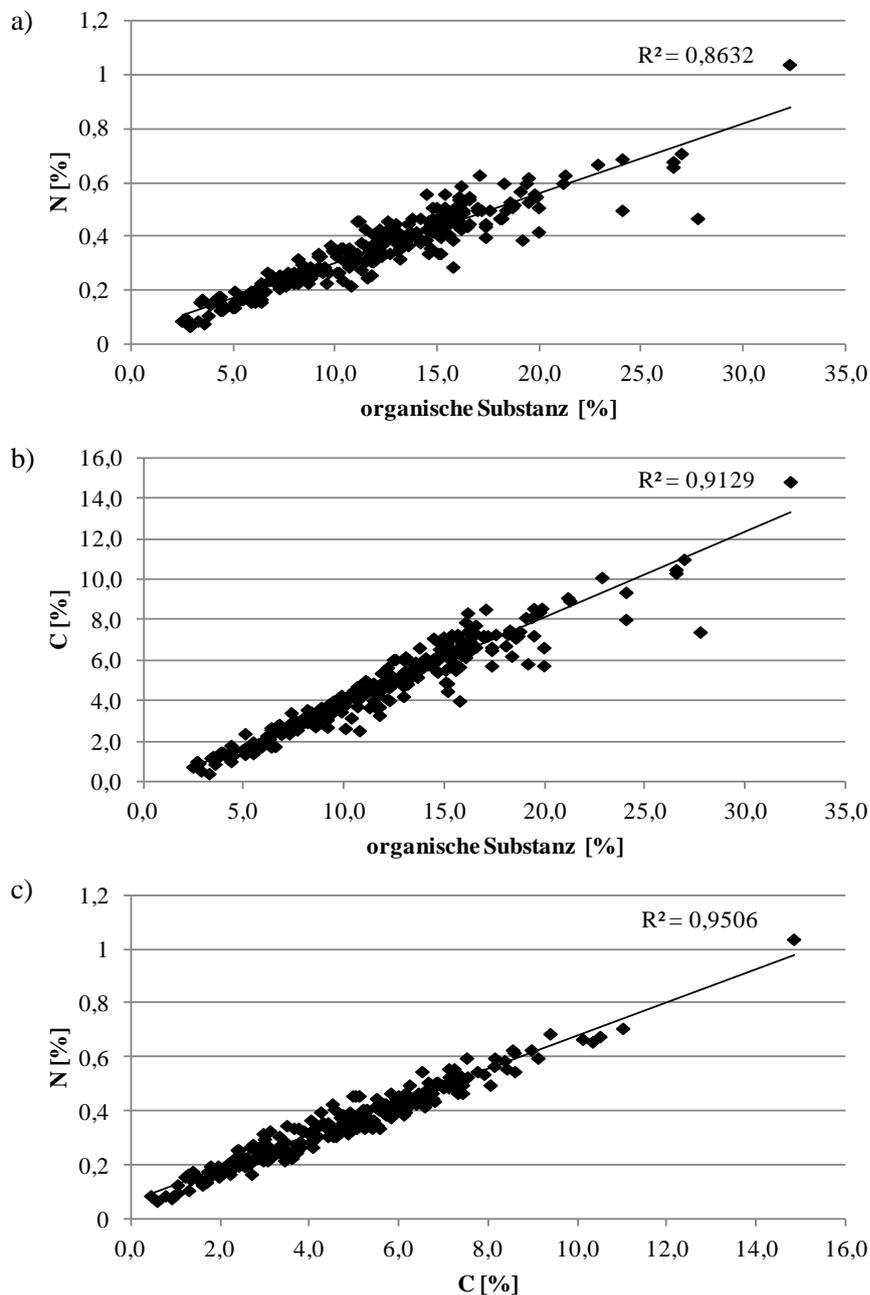


Abb. 26: Korrelationsanalysen mit Stickstoffgehalt [%] (a) und dem Kohlenstoffgehalt [%] (b) mit dem Mengenanteil der organischen Festsubstanz, sowie dem Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt [%] des Bodens in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm der Birnenmofette. (Datenerhebung Juni 2014)

Stickstoff ist vor allem in den Huminstoffen eingelagert. Mit zunehmendem Humifizierungsgrad wird der Stickstoff in mikrobieller Masse gespeichert und in organischen

Verbindungen stabilisiert. Der Kohlenstoff hingegen wird an die Atmosphäre freigesetzt (Scheffer und Schachtschabel 2010).

Anhand der Abb. 25 wurde nachgewiesen, dass die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte an den Messpunkten am niedrigsten sind, an denen zugleich die Anteile organischer Festsubstanz gering sind. Das ist somit verständlich, da an diesen Stellen keine Humifizierung der organischen Abfälle stattfindet. Weiterhin wird durch diese Ergebnisse die Annahme verstärkt, dass in den Aufnahmequadraten geringe Mengen pflanzlichen oder tierischen Materials anfallen. In dem Fall, dass hohe Mengen produziert würden, könnten diese mithilfe der Stickstoffbestimmung nachgewiesen werden, aufgrund der Stickstoffspeicherung in den Huminstoffen.

Fazit

Die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte sind an den Stellen mit niedrigen Anteilen organischen Substrates an der Festphase gering. Der Stickstoff ist in den betroffenen Bereichen weder an die organische Festsubstanz gebunden, noch an die mikrobielle Biomasse. Ferner wurde nachgewiesen, dass an Messpunkten mit geringen Stickstoffgehalten geringe Mengen organischen Abfalls anfallen, da mithilfe der Untersuchungen höhere Mengen Stickstoff in den Huminstoffen hätten gemessen werden können.

3.1.1.8 Penetrationswiderstände des Bodens

Diese Messungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, herauszufinden, inwiefern sich Bodenhindernisse (Wurzeln, Steine) oder die Bodenverdichtung auf das aufsteigende Kohlendioxid auswirken.

Wenig verdichtete Bodenbereiche (dunkelblau bis hellblau) sind in den oberen Schichten bis ungefähr 20 cm gemessen worden (Abb. 27a,b). Der Durchdringungswiderstand des Bodens beträgt 1 bis 2,5 Megapascal [MPa]. Im Südosten und Südwesten der Fläche deuten sich punktuell stärker verdichtete Bereiche des Bodens an (3 bis 7 MPa).

Ab einer Tiefe von 20 cm nimmt die flächige Bodenverdichtung in der Mofette beachtenswert zu (Abb. 27c). Der Durchdringungswiderstand beträgt dann durchgehend 3 bis 7 Megapascal. Von Südwesten nach Nordosten (Kap. 2.2) zieht sich weiterhin eine unterbrochene Teilfläche, in der der Boden durchlässiger ist. Dort werden sehr geringe Werte (1 bis 2,5 MPa) gemessen. Bei einer Bodentiefe von 41 und 60 cm hat die gesamte Mofette einen mäßig oder massiv verdichteten Boden (3 bis 7 Megapascal). Lediglich an vereinzelt Messpunkten wurden noch Werte im untersten Wertebereich gemessen (Abb. 27d).

Ein Vergleich der Abb. 27a-d mit e zeigt, dass der Gasfluss genau an den Messpunkten hoch ist, an denen der Durchdringungswiderstand gering ist. Im mittleren Bereich der Birnenmofette ist der CO₂-Fluss am stärksten, während die Bodenverdichtung am geringsten ist. Im Südosten der untersuchten Fläche ist der Boden bereits in den oberen 20 cm massiv verdichtet. Gleichzeitig sind dort hohe CO₂-Flüsse zu verzeichnen. Dieser Widerspruch wird dadurch gemindert, dass der Boden in den Einzelquadraten nicht großflächig verdichtet, sondern an verschiedenen Stellen noch durchlässig ist. Dementsprechend hat das Kohlendioxid auf seinem Diffusionsweg an die Erdoberfläche keine starken Hindernisse zu überwinden. Auch der Übergangsbereich zwischen den zwei Gasfluss-Zentren ist so zu erklären; dort sind die CO₂-Flüsse geringer, und der Durchdringungswiderstand ist mäßig. Folglich ist die Bodenverdichtung nicht so stark, dass das CO₂ nicht bis an die Erdoberfläche vordringen kann. Jedoch ist sie schon einschränkend genug, dass der Gastransport in verminderter Geschwindigkeit geschieht.

Weiterhin zeigt Abb. 27a, dass der Oberboden im Südosten der Mofette stark verdichtet ist; dementsprechend wird der vermutete Oberflächenabfluss des Wassers in diesem Bereich bestätigt.

Die Resultate der Penetrationsmessungen wurden statistisch ausgewertet. Überprüft wurden mögliche Wechselwirkungen zwischen dem Durchdringungswiderstand und dem CO₂-Fluss, sowie den Kohlendioxidkonzentrationen. Die Bestimmtheitsmaße der durchgeführten Korrelationen sind durchgehend beinahe Null. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das aufsteigende Kohlendioxid Diffusionsbarrieren umgeht.

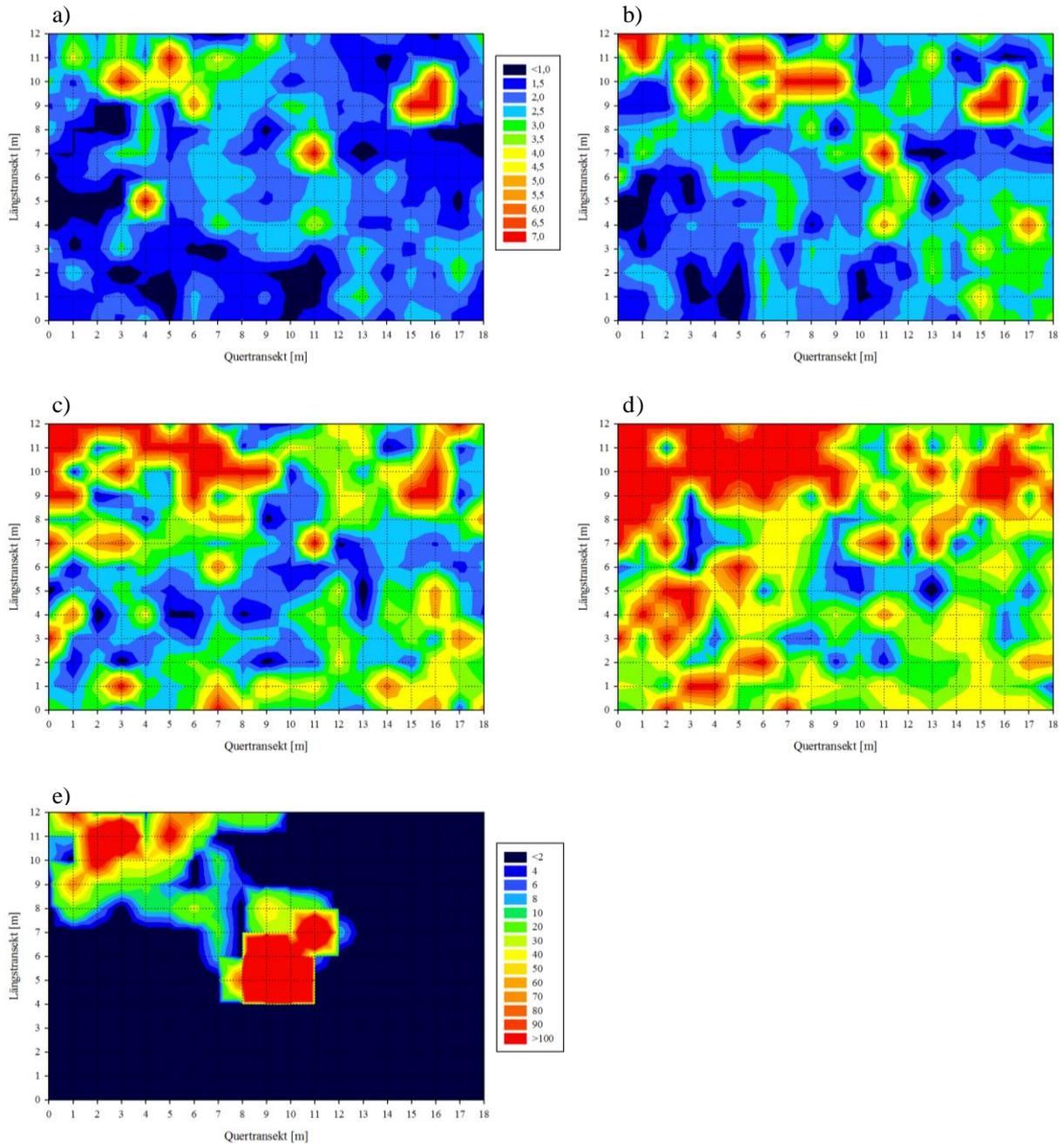


Abb. 27: Durchdringungswiderstand [MPa] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d), sowie CO_2 -Fluss [$\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$] (e) in der Birnenmofette. Für die Erstellung der Abb. a) bis d) wurden für jeden Messpunkt die Mittelwerte von den Zentimetern innerhalb einer Tiefenangabe gebildet. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Aufgrund des Tiefenprofils gibt es die Möglichkeit, die Bodendichte mit Sigma Plot anders abzubilden, und zwar in sogenannten „Flammendarstellungen“ (Kap. 2.5.1.2). Wird der Bodenwiderstand transektweise dargestellt, erkennt man den Durchdringungswiderstand eines Untersuchungsstandortes nicht nur aus der Vogelperspektive, sondern auch im Querschnitt. Zusätzlich können von den Kohlendioxid- oder Sauerstoffkonzentrationen diese Abbildungen

auch gemacht werden (Kap. 2.5.1.2). Auf diese Weise wird ein transektweiser Vergleich zwischen der Bodenverdichtung und den CO₂-Konzentrationen realisierbar (Abb. 28).

Einer genauen Betrachtung der oberen Abbildung ist zu entnehmen, dass die Kohlendioxidkonzentrationen in diesem Transekt an den Punkten 8 bis 10 am höchsten sind und an den Metern 6, 7 und 11-13 im mäßig erhöhten Bereich liegen. Zusätzlich befindet sich am Transektbeginn von den Metern 0-3 eine punktuelle Ausgasungsstelle. Vor dem Hintergrund der Bodendichte kann diese CO₂-Verteilung innerhalb des Transektes erklärt werden.

An den Messpunkten 0-3 ist der Durchdringungswiderstand in den Bodentiefen von 60 cm nach 80 cm hoch und bedingt den Verbleib des CO₂ in 60 bis 50 cm Tiefe. Von 0 nach 3 Meter verdichtet sich der Boden schrittweise in höheren Schichten, aber an Meter 2 ist der Durchdringungswiderstand gering.

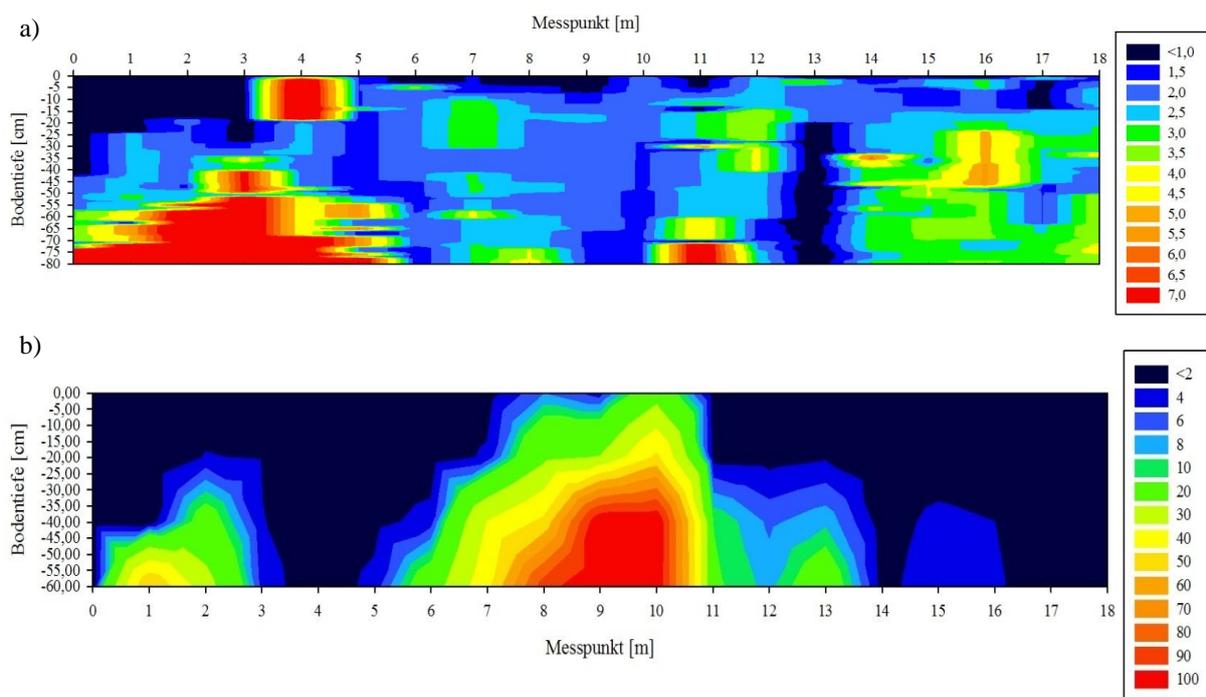


Abb. 28: Durchdringungswiderstand [MPa] des Bodens in Transekt 5 gemessen von der Erdoberfläche bis in 80 cm Tiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 5 im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Diese Auflockerung führt dazu, dass kleine Mengen Kohlendioxid weiter Richtung Erdoberfläche diffundieren. An Messpunkt 4 ist die Bodenverdichtung bereits in den oberen Schichten sehr stark, so dass für diese Messung viel Kraft aufgewendet werden musste. Gleichzeitig ist zu verzeichnen, dass an diesem Meter kein CO₂ in die untersuchten Tiefen der Pedosphäre gelangt. Im weiteren Verlauf des Transektes sind die Durchdringungswiderstände

an den Stellen 7 und 11 massiv, aber zwischen ihnen gering. Dementsprechend sind dort hohe CO₂-Konzentrationen zu vermerken, und das Gas dringt bis an die Erdoberfläche vor. Das gleiche wiederholt sich an Messpunkt 13. Am Ende des Transekt 5 ist der Boden konstant verdichtet, bis auf die obersten Bereiche; auch an diesen Metern wurden, falls überhaupt, nur geringe Konzentrationen Kohlendioxids vermerkt.

Wie sich weiter oben herausgestellt hat, ist auch bei dieser Auswertungsweise, kein statistischer Zusammenhang zwischen dem Durchdringungswiderstand und den CO₂-Konzentrationen des Bodens festzustellen.

Fazit

Die Messungen der Durchdringungswiderstände des Bodens haben die Vermutung bestätigt, dass der Boden in der Birnenmofette oberflächennah teils stark verdichtet ist und in den unteren Bodenschichten flächig. Dadurch konnte die mangelnde Wasserspeicherfähigkeit mancher Bodenbereiche, aufgrund hohen Oberflächenabflusses, nochmals bestätigt werden. Die Abb. 28 konnte ferner verdeutlichen, dass die Bodenverdichtung einen entscheidenden Einfluss auf den Gastransport hat.

3.1.2 Temporäre Veränderungen des Kohlendioxids

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der jährlichen- und vierteljährlichen Mofettengasmessungen vorgestellt und vor dem Hintergrund der Wetterbedingungen und Schwarmbebenaktivitäten diskutiert.

3.1.2.1 Jährliche Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen

Begonnen wird mit den Ergebnissen der jährlichen Messungen, die immer im März eines Jahres durchgeführt wurden (ausgenommen das Jahr 2010) (Abb. 29-32).

In 10 cm Bodentiefe zeigt sich, dass sowohl die CO₂-Konzentrationen, als auch die Verteilung des Kohlendioxids in der Pedosphäre, Schwankungen unterlegen sind (Abb. 29). Demgegenüber wird deutlich, dass die zuvor beschriebenen Exhalationszentren (Kap. 3.1.1.1) konstant vorhanden sind und nur die Konzentrationen variieren. Beispielsweise steigen die CO₂-Werte von 2008 nach 2009, allerdings sinken sie dann wieder im Jahr 2010. Schwankungen dieser Art sind ebenfalls in anderen Jahren festzustellen.

Im Juli 2010, März 2011 und im März 2014 wird ein weiteres Phänomen im Vergleich zu den anderen Jahren sichtbar. Im Gegensatz zu den Märzmessungen 2008, 2009, 2012 und 2013, in denen sich die Mofettenbereiche prägnant von den Kontrollbereichen unterscheiden, ist dies

in 2010, 2011 und 2014 nicht der Fall. Unerwartet treten höhere CO₂-Gehalte in den Kontrollbereichen auf (4 bis 6%, und punktuell sogar bis 10%), sodass die Ausgasungszentren nicht mehr eindeutig von den Kontrollstellen zu unterscheiden sind. Noch drastischer ist die massive Verkleinerung der zwei Kohlendioxidschwerpunkte in diesen Jahren im Gegensatz zu den anderen. Die beiden Zentren sind zwar noch zu erkennen, aber die Konzentrationen des Mofettengases sind deutlich gesunken. Der niedrigste Stand der Kohlendioxidaufzeichnungen in 10 cm Bodentiefe ist im Juli 2010 zu verzeichnen, und in 60 cm Tiefe im März 2014.

Das Phänomen des flächigen Auftretens von CO₂ wird mit den Abbildungen der tieferen Bodenschichten immer handfester. Ab einer Tiefe von 20 cm steigen die Kohlendioxidkonzentrationen flächig an. Obwohl nie Extreme wie in den Exhalationszentren gemessen werden, so werden doch überwiegend 20 bis 50% erreicht (stellenweise auch 60 bis 70%). In der Juliaufnahme von 2010 und den Märzaufnahmen 2011 und 2014 verbleiben vereinzelte Kontrollpunkte innerhalb einer gesamtflächigen Kohlendioxidausströmung, was sich von den Messungen in den Jahren 2008, 2009, 2012 und 2013 unterscheidet. Bei denen sind die CO₂-Zentren klar von einem Kontrollbereich umschlossen, der vereinzelt von solitären Kohlendioxid-Ausgasungen durchbrochen wird.

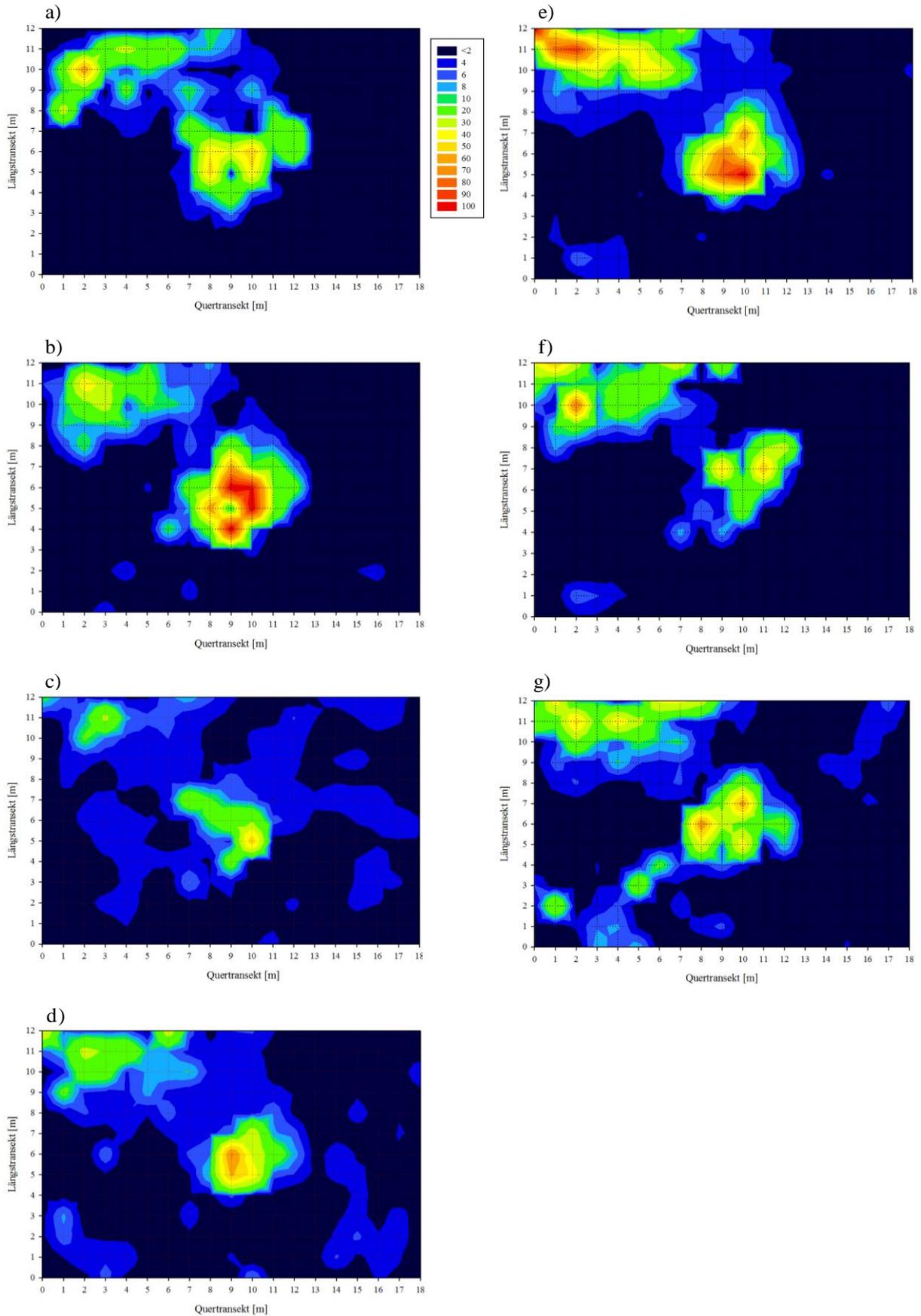


Abb. 29: CO₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe der Birnenmofette von 2008 bis 2014 a) bis g). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

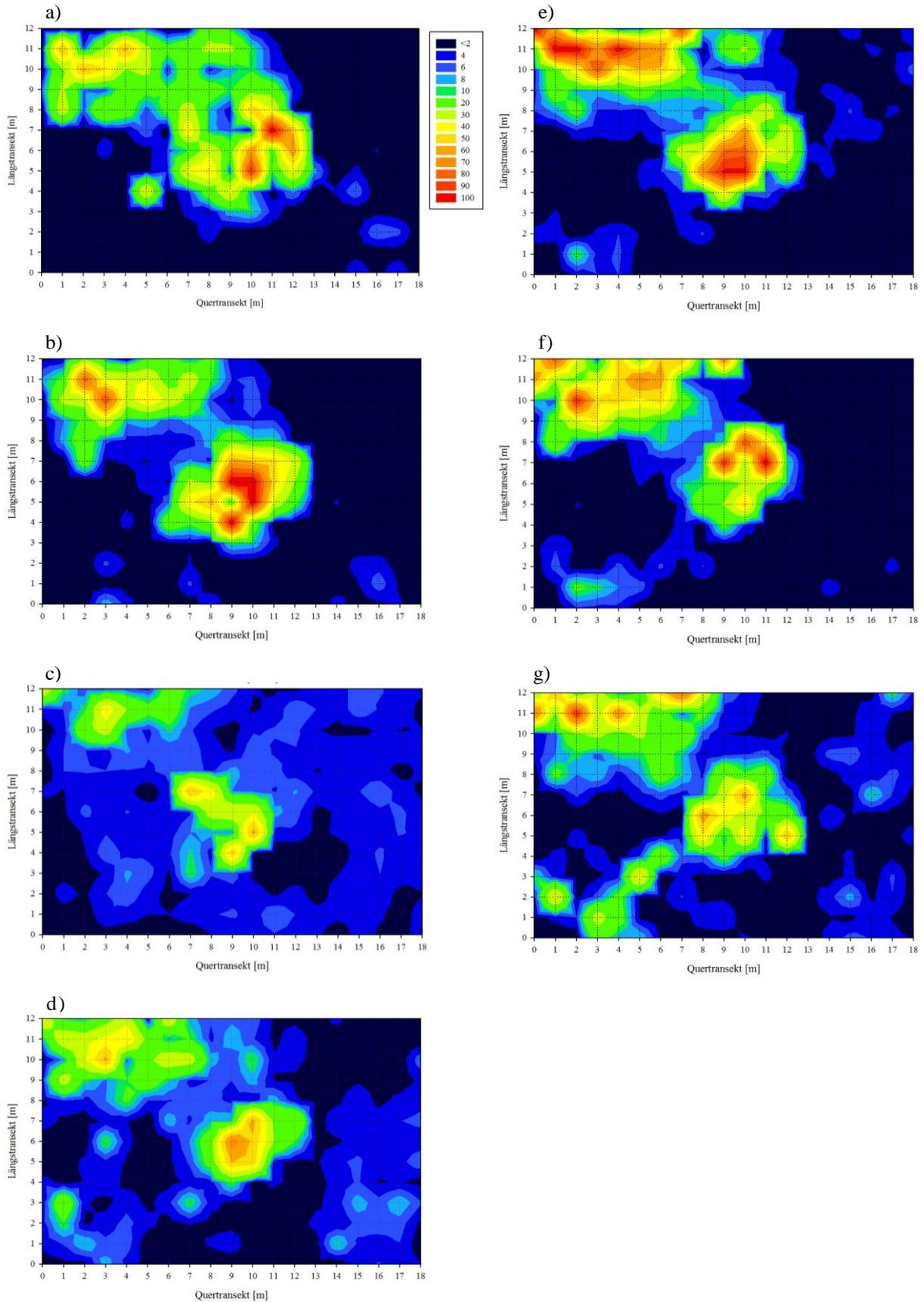


Abb. 30: CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

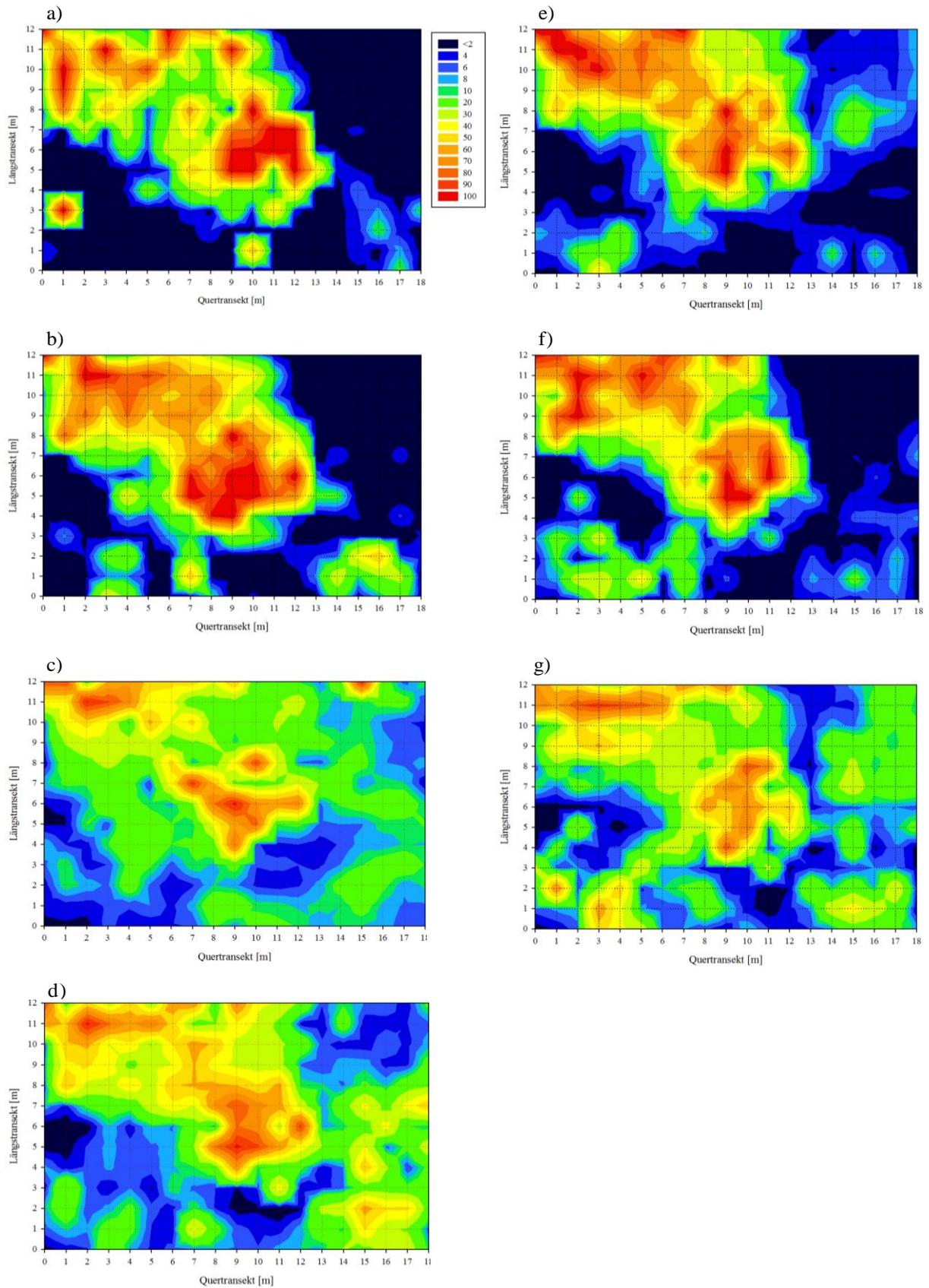


Abb. 31: CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

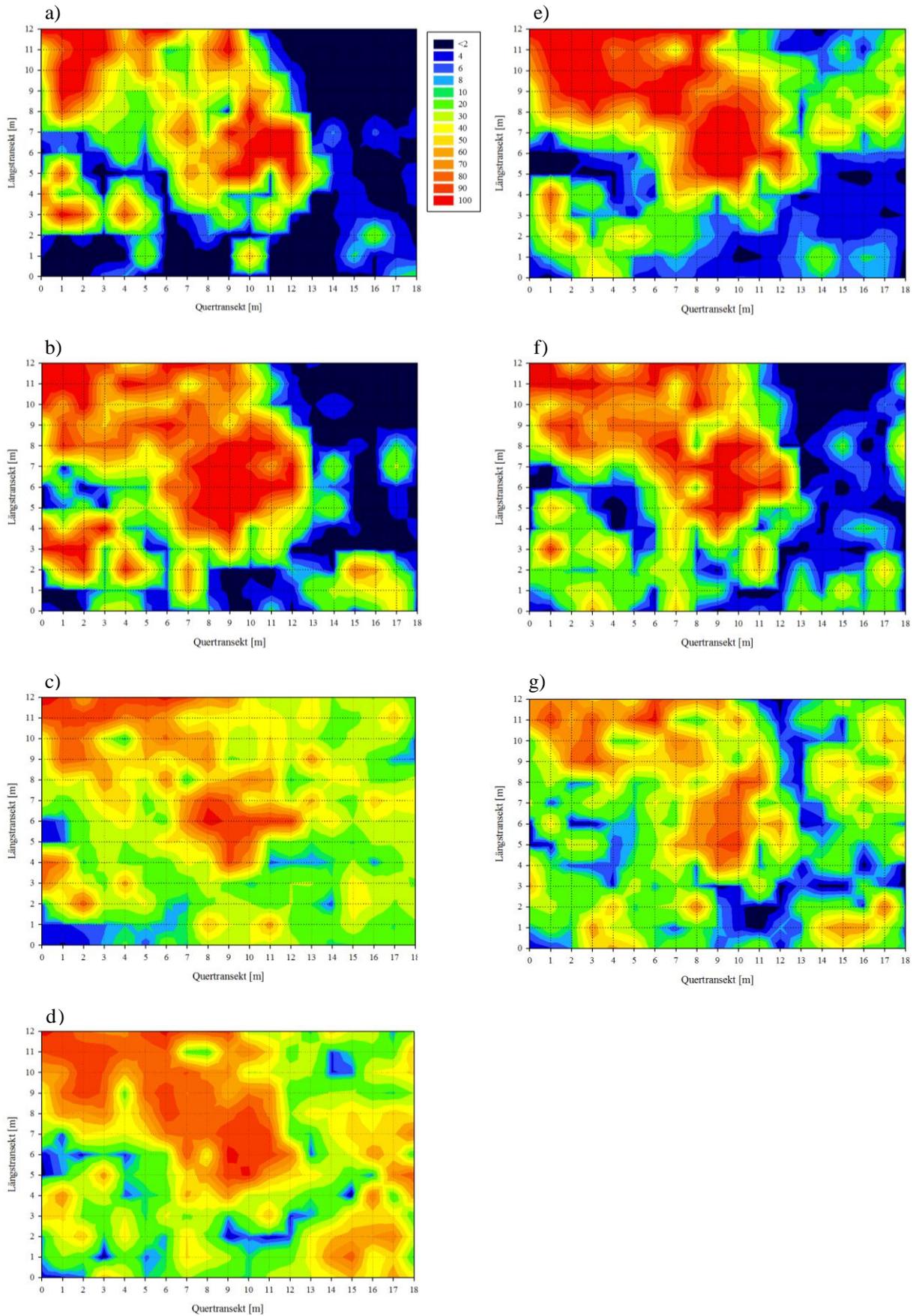


Abb. 32: CO₂-Konzentration [%] in 60 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Die oben formulierten Unterschiede in den jährlich aufgenommenen Kohlendioxidkonzentrationen sind in dem Untersuchungsgebiet keine Seltenheit. An vielen weiteren Messstandorten im Egerbecken wurden Schwankungen in den CO₂-Konzentrationen festgestellt, und zwar sowohl in trockenen, als auch in nassen Mofetten (Koch et al 2008; Faber et al. 2009; Bräuer et al. 2011; Weinlich et al. 2013). Die Variationen im Auftreten des Kohlendioxids können die Folge verschiedener Ursachen sein. Die auf die Kohlendioxidkonzentrationen einwirkenden Einflussgrößen entstammen mehreren Prozessen, die zudem unterschiedlich zu verorten sind. Zum Einen beeinflussen seismische Aktivitäten das Vorkommen des Mofettengases, zum Anderen konnte eine hohe Bandbreite an lokalen Vorgängen identifiziert werden, die Einfluss auf die CO₂-Konzentrationen ausüben können (Faber et al. 2009).

Die Interpretation der zeitlichen CO₂-Veränderungen in Verbindung mit den beeinflussenden Einflussgrößen erfolgt mithilfe drei verschiedener Vorgehensweisen, bei denen die gemessenen Werte unterschiedlich verwendet werden. Wegen der großen Menge an Aufnahmewerten können die Auswertungen nicht auf den Rohdaten der Gasmessungen basieren. Eine entsprechende Abbildung wäre zu unübersichtlich. Aufgrund des weiten Wertebereiches der CO₂-Werte ist es ebenfalls problematisch für die einzelnen Messtiefen arithmetische Mittel zu bilden. Ein Mittelwert mit den zugrunde liegenden Wertebereichen ist nicht ausreichend repräsentativ für die Darstellung und Begründung von Veränderungen in den Konzentrationen.

Die erste Auswertungsmethode basiert auf den Mittelwerten der CO₂-Konzentrationen der verschiedenen Aufnahmezeiträume in 20 cm Bodentiefe. Allerdings wurden nicht alle Werte in die Berechnung gegeben, sondern ausgesuchte. Dabei wurden zwei Auswahlkriterien berücksichtigt: Zum Einen gingen ausschließlich CO₂-Gehalte ab einer Konzentration von 10% in die Berechnung ein (in der Moosmofette ab 5%). Zum Anderen sollten nur konstant gasende Messpunkte einbezogen werden, aus denen sich eine konstant gasende Teilfläche zusammensetzt. Für die Zusammenstellung der Messpunkte wurden die Gasmessungen von März 2009 zugrunde gelegt. Auf diese Weise wurden Messstellen bestimmt, und die Mittelwerte der entsprechenden CO₂-Konzentrationen in 20 cm Messtiefe berechnet.

Die zweite Vorgehensweise beruht auf drei ausgesuchten Messpunkten. Bei der Auswahl dieser Einzelpunkte wurden die gleichen Auswahlkriterien festgelegt. Jedoch wurden dann keine Mittelwerte berechnet. Die Abbildungen zeigen demnach die Rohdaten der Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe, von 2008 bis 2014.

Der dritten Auswertungsmöglichkeit liegen die sporadisch auftretenden Exhalationen zugrunde. Zunächst wird mithilfe der jährlichen CO₂-Abbildungen überprüft, ob das kurzzeitige Auftreten weiterer Ausgasungsbereiche in der Birnenmofette auf Schwarmbebenaktivitäten zurückzuführen ist. Sollte dies der Fall sein, wird mit der Verwendung der Rohdaten genauso verfahren wie bei der ersten Auswertungsmethode. Ist jedoch kein Zusammenhang zu verzeichnen, wird die Interpretation der Ergebnisse mit dieser Vorgehensweise nicht fortgeführt.

Mögliche Auswirkungen verschiedener Wetterfaktoren auf die jährlichen CO₂-Variationen in der konstant gasenden Teilfläche

In Abb. 33 sind die Mittelwerte der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe für sieben Jahre dargestellt. Des Weiteren werden durch die anderen Graphen die Wetterverhältnisse für die jeweiligen Zeiträume gezeigt.

Durch die Abbildung wird schnell klar, dass sich die Niederschlagsmengen während der Märzmessungen sehr ähneln. Es sind keine Extremereignisse festzustellen. Dennoch sind leichte Abhängigkeiten der CO₂-Konzentrationen von den Niederschlags-Werten erkennbar. Im März 2009 gab es sehr wenig Niederschlag, gleichzeitig waren zu diesem Zeitpunkt die Kohlendioxidwerte hoch. Im Juli 2010 stiegen die Niederschlagsmengen an. Nach den erhöhten CO₂-Konzentrationen im März 2009 sanken sie im Juli 2010. Höhere Niederschlagsmengen könnten demnach zu niedrigeren Kohlendioxidwerten führen. Im März 2012 sind die Niederschlagswerte niedrig mit einer gleichzeitigen Erhöhung der Kohlendioxidkonzentrationen. Im März 2013 wurden die geringsten Niederschlagsmengen aufgezeichnet allerdings sanken die CO₂-Werte im Vergleich zu März 2012.

Obwohl die Schwankungen im Niederschlagsaufkommen über die Jahre gesehen sehr gering sind, ist dennoch eine Wechselwirkung zu vermuten. Die gegenläufigen Ausschläge im März 2009 und 2012 zeigen, dass bei geringen Regenwassermengen die CO₂-Konzentrationen höher sind als in den Märzmonaten 2011 und 2013, in denen der Niederschlag leicht variiert. Daraus ließe sich die Annahme ableiten, dass der Niederschlag als Einflussgröße auf den Grundwasserspiegel zugleich auf das Kohlendioxidvorkommen einwirkt. Sind die Hohlräume der Pedosphäre aufgrund eines hohen Grundwasserpegels wassergesättigt, stehen dem Bodengas nur niedrigere Porenvolumina zur Verfügung, was zu einer Verdrängung des Kohlendioxids führt und dementsprechend zu einem Anstieg (Weinlich et al. 2013). Ist der

Grundwasserstand niedrig, verteilt sich das Kohlendioxid in einem größeren Porenraum, wodurch die Konzentrationen niedriger sind.

Durch mehrere Untersuchungen in dem Untersuchungsgebiet wurde jedoch das Ergebnis erzielt, dass der Grundwasserspiegel an sich keinen Einfluss auf die CO₂-Werte hat (Koch et al. 2008; Gaždova et al. 2011).

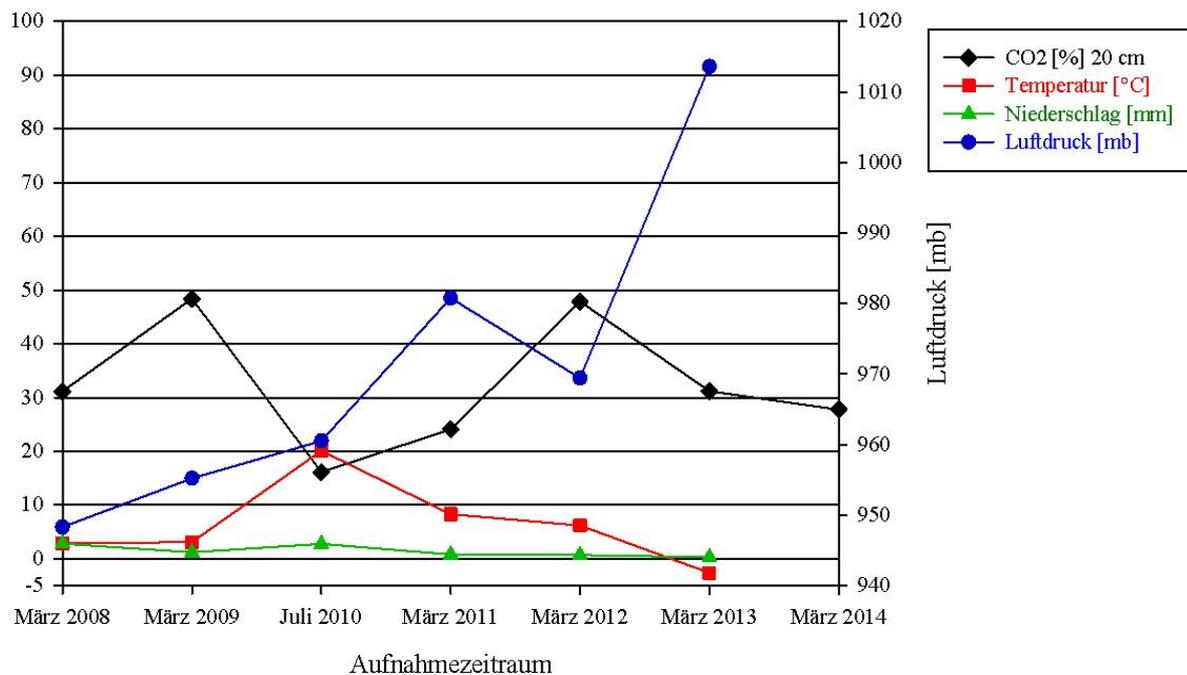


Abb. 33: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe einer konstant gasenden Teilfläche der Birnenmofette, in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte von 22 Messstellen. Die Angaben der Temperatur und des Luftdruckes basieren auf den Mittelwerten aller gemessener Tageswerte der Wetterstation in Cheb (Eger), die Niederschlagswerte beziehen sich auf den Tages-Höchststand (aus Internetquelle 2). Für die Abbildung wurden sie für den Aufenthaltszeitraum gemittelt. Die Werte des Luftdruckes sind auf der rechten Achse abzulesen, alle anderen Werte auf der linken. Die Jahresangaben beziehen sich auf den ersten Messaufenthalt in dem entsprechenden Jahr, da die Ergebnisse dieser Gasmessungen zugrunde liegen. Die genauen Zeiträume sind in Tab. 5 angegeben. (Für das Jahr 2014 sind noch nicht alle erforderlichen Wetterdaten verfügbar, außer Januar und Februar.) (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Der Niederschlag bedingt zu unterschiedlichen Phasen im Jahr den Stand des Grundwasserspiegels (Scheffer und Schachtschabel 2010). Infolgedessen wird auf den Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und den CO₂-Veränderungen nochmals in Kap. 3.1.2.2 eingegangen.

Bei hohem Luftdruck sind die CO₂-Konzentrationen niedriger, als bei gesunkenem (Abb. 33). Einzig in dem Messaufenthalt im März 2009 ist die entgegengesetzte Situation zu verzeichnen. Es könnte die Hypothese formuliert werden, dass der Luftdruck als vertikaler Druck der Atmosphäre auf eine Fläche, auf das ausströmende CO₂ einwirkt (Hupfer und Kuttler 2006; Horálek und Fischer 2008). Bei hohem Luftdruck könnte vermutet werden, dass

das Aufsteigen des Gases, aufgrund des Gegendruckes, erschwert wird, bei niedrigem Luftdruck nicht. Als Bedingungsvariable des Grundwasserspiegels könnte der Luftdruck indirekt Bodengasveränderungen bewirken. Ist der Luftdruck hoch, senkt sich der Grundwasserspiegel. Folglich hätte das Kohlendioxid ein höheres Porenvolumen zur Verfügung. Hingegen würde ein Rückgang des Luftdruckes eine Anhebung des Grundwasserspiegels verursachen, wodurch das Gas aus den Poren verdrängt würde (Weinlich et al. 2013). Wie längst vermutet, kann diese Hypothese für die konstant gasende Teilfläche in der Birnenmofette bestätigt werden. Jedoch erzielen die Messungen von Weinlich et al. (2006), Faber et al. (2009) oder Koch et al. (2008) ein anderes Resultat. Die jährlichen Kohlendioxidveränderungen sind nicht von der Temperatur abhängig (Abb. 33). Bis auf einen abweichenden Wert im Juli 2010 sind die Temperaturen während der unterschiedlichen Märzmessungen sehr ähnlich. Daher kann die Temperatur als bedingende Variable auf die jährlichen CO₂-Variationen vernachlässigt werden. Dieser Wechselwirkung wird in Kap. 3.1.2.2 genauer nachgegangen.

Tab. 5: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in einer konstant gasenden Teilfläche der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte aus 22 Messstellen. Die Angaben der Temperatur und des Luftdruckes basieren auf den Mittelwerten aller gemessener Tageswerte der Wetterstation in Cheb (Eger), die Niederschlagswerte beziehen sich auf die Tages-Höchststände (aus Internetquelle 2). Für die Tabelle wurden die Werte begrenzt auf die Aufenthaltszeiträume gemittelt. (k. A.=keine Angabe; Für das Jahr 2014 sind noch nicht alle erforderlichen Wetterdaten verfügbar, außer Januar und Februar.) (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Jahr	CO₂ 20 cm [%]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Luftdruck [mb]
März 2008	31,1	2,9	2,8	948,3
März 2009	48,4	3,1	1,2	955,2
Juli 2010	16,1	20,1	2,8	960,5
März 2011	24,1	8,3	0,8	980,8
März 2012	48,0	6,2	0,7	969,4
März 2013	31,2	-2,6	0,3	1013,6
März 2014	27,7	k. A.	k. A.	k. A.

Auswertung der jährlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 5/10, 6/10 und 7/9 mithilfe verschiedener Wetterfaktoren

Die Abb. 34-36 sowie Tab. 6 geben einen Überblick über die CO₂-Konzentrationen in 20 cm Bodentiefe drei ausgewählter Messpunkte (5/10, 6/10 und 7/9) in den Jahren 2008 bis 2014. Zusätzlich in Verbindung mit unterschiedlichen Wetterparametern.

An Punkt 5/10 (Abb. 34) verhalten sich die Kohlendioxidwerte in Verbindung mit dem Niederschlagsaufkommen ähnlich wie in Abb. 33; es sind die gleichen Abhängigkeiten erkennbar.

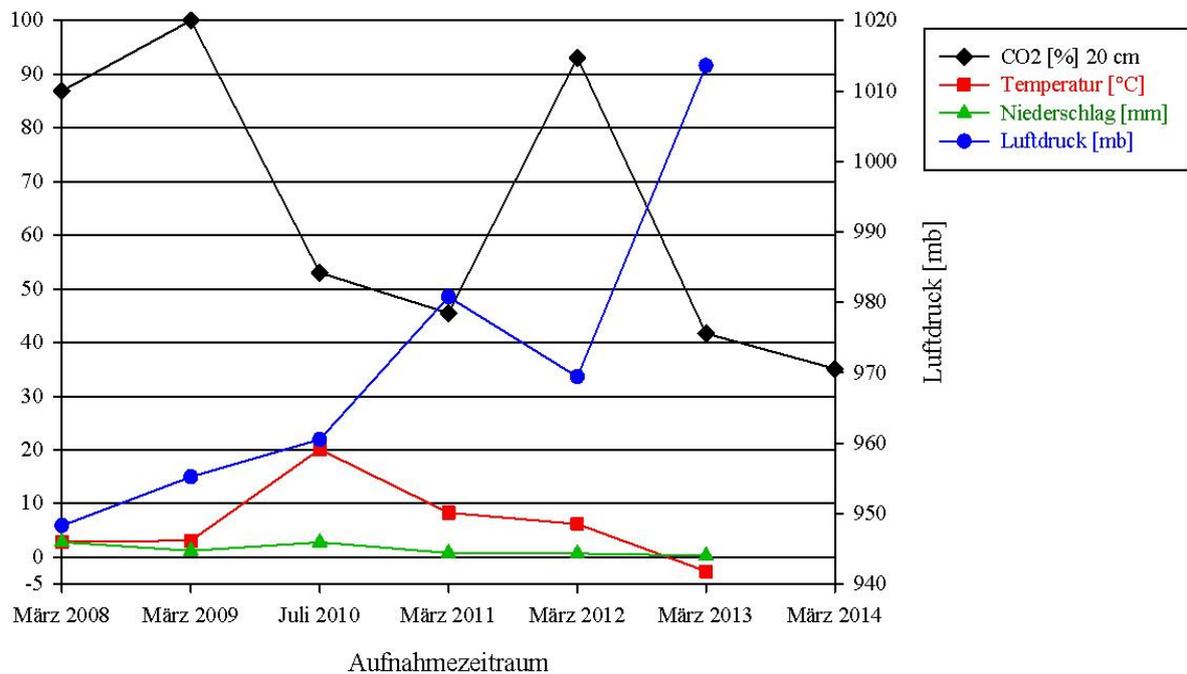


Abb. 34: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 5/10 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Rohdaten dieser Messstelle. Weitere Erklärungen sind der Abb. 33 zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Die Abb. 35 und 36 bestätigen ebenfalls die Wechselwirkung. Für die Interpretation der Resultate an den drei Einzelpunkten können folglich die gleichen Erklärungsansätze verwendet werden, wie bei der Auswertung der konstant gasenden Messstellen.

Auch der Luftdruck hat an der Messstelle 5/10 eine ähnliche Einwirkung auf die Kohlendioxidkonzentrationen, wie bei den konstant gasenden Punkten. Bei hohem Luftdruck sind die CO₂-Werte geringer als bei niedrigen Luftdruck-Werten.

Die Abb. 35 und 36 zeigen vergleichbare Zusammenhänge, allerdings gibt es Ausnahmen zu verzeichnen: An dem Messpunkt 6/10 steigen im März 2011 sowohl der Luftdruck, als auch die CO₂-Konzentrationen deutlich an. Im März 2013 ist eine deutliche Erhöhung des CO₂-Gehaltes an der Aufnahmestelle 7/9 zu verzeichnen, obwohl der Luftdruck in diesem März Aufenthalt seinen höchsten Wert hat.

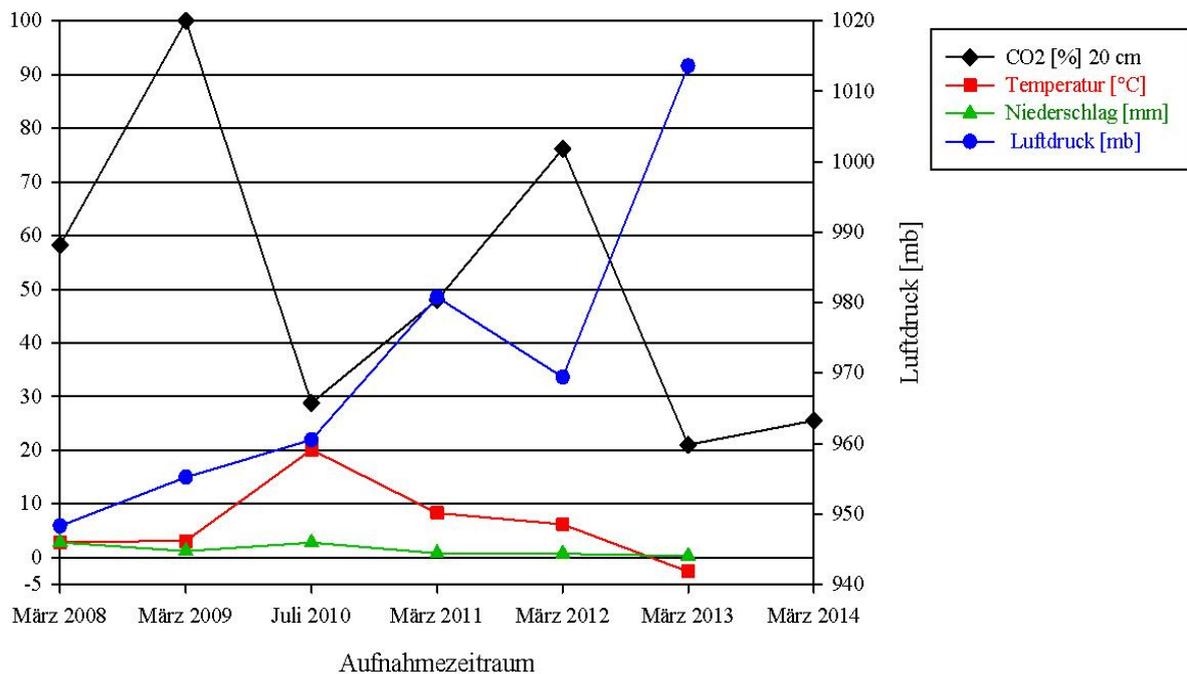


Abb. 35: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 6/10 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind der Abb. 34 zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Die möglichen Einwirkungen des Luftdrucks auf die zeitlichen Konzentrationsveränderungen an den einzeln betrachteten Punkten lassen sich auf die gleiche Weise erklären, wie bei den konstant gasenden Bereichen.

An den Messpunkten 5/10 und 6/10 sind keine Zusammenhänge zwischen der Temperatur und den Kohlendioxidausgasungen zu verzeichnen (Abb. 34 und 35). Unterzieht man jedoch die Abb. 36 einer genauen Betrachtung sind deutlichere Abhängigkeiten erkennbar. In den Märzaufenthalten 2009, 2012 und 2013 sind hohe CO₂-Werte gemessen worden und zugleich niedrige Temperaturen. Auch im März 2011 ist dieser Trend angedeutet, denn die CO₂-Werte steigen leicht an bei sinkender Temperatur. Im Juli 2010 sinken die Konzentrationen bei höherer Temperatur. Eine Ausnahme ist im März 2008 festzustellen.

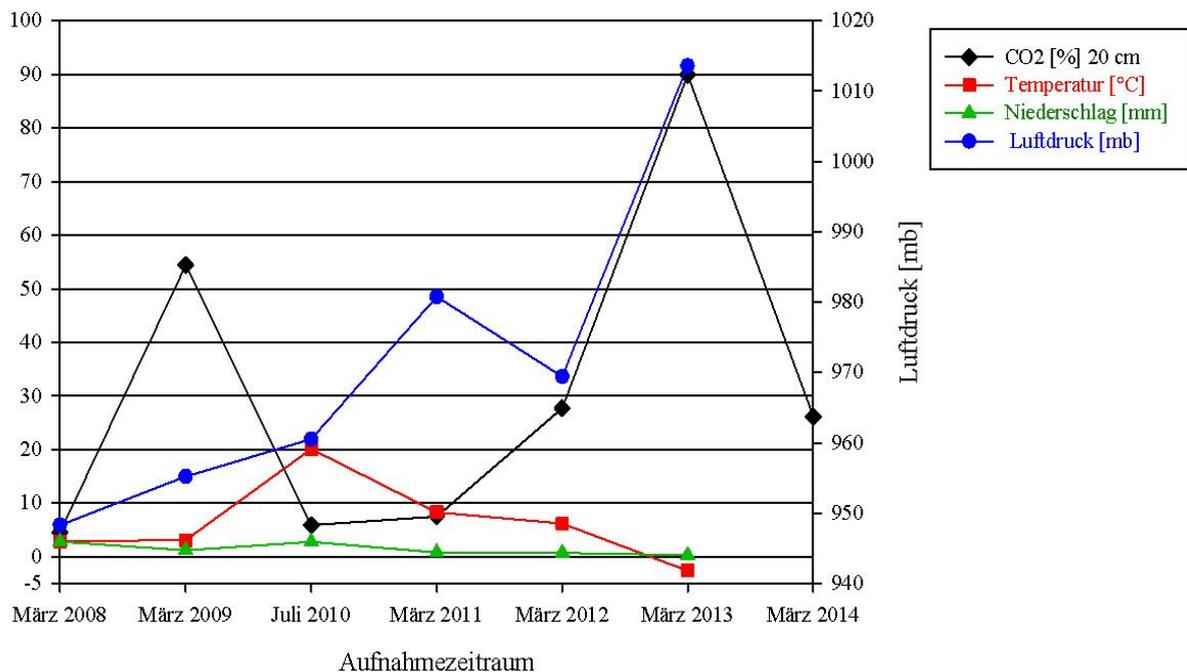


Abb. 36: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 7/9 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind der Abb. 34 zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Obwohl sich bei den jährlichen CO₂-Veränderungen bereits Zusammenhänge zwischen den Ausgasungen und den Temperaturen abzeichnen, wird dieser Wechselwirkung in Kap. 3.1.2.2 genauer nachgegangen.

Tab. 6: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der an den Messstellen 5/10, 6/10 und 7/9 in der Birnenmofette, sowie über verschiedene Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messstellen. Weitere Erklärungen sind der Tab. 5 zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Jahr	CO ₂ 20 cm [%] 5/10	CO ₂ 20 cm [%] 6/10	CO ₂ 20 cm [%] 7/9	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Luftdruck [mb]
März 2008	86,9	58,2	4,6	2,9	2,8	948,3
März 2009	100,0	100,0	54,4	3,1	1,2	955,2
Juli 2010	53,0	28,8	5,9	20,1	2,8	960,5
März 2011	45,5	48,0	7,5	8,3	0,8	980,8
März 2012	93,1	76,2	27,7	6,2	0,7	969,4
März 2013	41,7	21,0	89,9	-2,6	0,3	1013,6
März 2014	35,1	25,5	26,2	k. A.	k. A.	k. A.

Auswertung der sporadisch auftretenden gasenden Bereiche

Die Auswertung der Abb. 29-32 hinsichtlich der sporadisch auftretenden Ausgasungen führt zu dem Ergebnis, dass diese nicht in Zusammenhang mit den Wetterbedingungen oder den Schwarmbeben stehen. Infolgedessen wird dieser Auswertungsansatz nicht weiter verfolgt.

Einfluss der Schwarmbebenaktivitäten auf die jährlichen CO₂-Veränderungen in der konstant gasenden Teilfläche

In dem Falle, dass die maximalen CO₂-Werte unvermutet noch übertroffen werden, ist davon auszugehen, dass geogene Veränderungen stattgefunden haben (Weinlich et al. 2013). Geodynamische Prozesse können durch Veränderungen in den CO₂-Exhalationen zum Ausdruck kommen, in dem sich beispielsweise kurzfristig die Kohlendioxidkonzentrationen verändern (Weinlich et al. 2006, 2013; Koch et al. 2008; Faber et al. 2009; Bräuer et al. 2009; Weinlich 2014). Mittlerweile hat sich der Kenntnisstand sogar dahingehend erweitert, dass die aufsteigenden Fluide selbst dazu fähig sind, seismische Aktivität auszulösen (Bräuer et al. 2009; Heinicke et al. 2009; Weinlich 2014).

Eine ausführliche Beschreibung der geologischen Bedingungen und dieser geodynamischen Prozesse des Egerbeckens wurde in Kap. 2.1.2 vorgenommen.

Die Tab. 7 ermöglicht einen Überblick über die Schwarmbebenereignisse, mit einer Gegenüberstellung der gemittelten CO₂-Konzentrationen. Die Kohlendioxidkonzentrationen variieren über die Jahre gesehen (Tab. 7). Die gleiche Situation ist auch bei den Lokalbebenmagnituden [M_L] der Schwarmbebenereignisse vorzufinden. Allerdings sind die Schwarmbebenereignisse mit den höchsten Lokalbebenmagnituden immer in den Jahren vor den Anstiegen der Kohlendioxidkonzentrationen einzuordnen.

Zusätzlich zu der Tabelle sind die maximalen Magnituden eines Jahres im Zusammenhang mit den CO₂-Werten des Folgejahres in einem Säulendiagramm dargestellt, welches die oben geäußerte Aussage verdeutlicht (Abb. 37).

Im Winter 2007 konnte ein einzelnes Beben mit einer maximalen Lokalbebenmagnitude [M_L] von 3 aufgezeichnet werden, allerdings kann es keinem Schwarmbeben zugeordnet werden. Im Februar 2007 fand ein Schwarmbebenereignis mit Magnituden bis höchstens 1,5 M_L statt. Diese Aktivität führte direkt zu Erhöhungen in den Kohlendioxidkonzentrationen, unter anderem an der Messstation in Nový Kostel und im direkten Anschluss nach den Beben zu einem abrupten Rückgang der CO₂-Werte an dem gleichen Standort (Weinlich et al. 2013). Über die Auswirkungen der seismischen Aktivität im Jahr 2007 auf die CO₂-Exhalationen in

der Birnenmofette kann keine Aussage getroffen werden, da die Fläche erst im Jahr 2008 als Untersuchungsstandort ausgewählt wurde (Kap. 2.2.1).

Tab. 7: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2007 bis Juni 2014, und jährliche CO₂-Konzentration [%] der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe in der Birnenmofette (2008 bis 2014). Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte von 22 Messpunkten. (k. A.=keine Angabe; Kap. 3.1) (aus Internetquelle 1) (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Zeitraum	max. Stärke [M_L]	Anzahl Epizentren	Tiefe [km]	CO₂ 20 cm [%]
01.01.2007- 31.12.2007	1,5	1333	7-14	k. A.
01.10.2008- 31.12.2008	4,0	2602	6-10	31,5
01.01.2009- 31.12.2009	1,5	688	6-11	48,4
01.01.2010- 31.12.2010	1,5	372	7-12	16,1
01.01.2011- 31.12.2011	3,5	4185	6-10	24,1
01.01.2012- 31.12.2012	2,0	984	7-11	47,9
01.01.2013- 31.12.2013	2,5	1238	6-9	31,2
01.01.2014- 10.06.2014	4,5	1477	8,5	27,7

Der Oktober 2008 war bedeutungsvoll für die Erfassung der geogenen Prozesse und ihrer Ursprünge im Egerbecken. Seit den starken seismischen Aktivitäten in den Jahren 1985/1986 fand in diesem Zeitraum das massivste Schwarmbebenereignis in der Nový Kostel Störungszone statt (Horálek et al. 2009). Das Hypozentrum war identisch mit dem Hypozentrum der Schwarmbeben im Jahr 2000 (Fischer et al. 2014). Es wurden 2602 Epizentren gezählt, mit insgesamt 20000 Beben und einer maximalen Lokalbebenmagnitude von 3,8 (Horálek et al. 2009). Das vollständige Schwarmbeben dauerte gut zwei Monate. Am 6.10.2008 begann die Abfolge der Beben für wenige Stunden mit schwarmähnlich seismischer Aktivität mit Magnituden um 2 M_L. Gefolgt wurden diese von sporadisch auftretenden Beben in der gleichen Stärke. Dieser Phase schlossen sich Erdbeben mit maximalen Stärken von 2,5 M_L für ungefähr zwölf Stunden an. Am 9. Oktober nahm die seismische Aktivität weiter zu, so dass es zu Schwarmbeben mit Magnituden größer 3,5 M_L kam. Diese Phase hielt zwei Tage an. Es folgte ein Abschnitt mit außergewöhnlicher Intensität, sowohl in der Menge der Beben, als auch in der Stärke. Während dieser Phase wurde am 12. Oktober der stärkste Schock (3,8 M_L) gemessen. Anschließend wurden weitere Schwarmbeben aufgezeichnet, in denen nochmals Stöße mit Stärken um 3,7 M_L auftraten (Horálek et al. 2009).

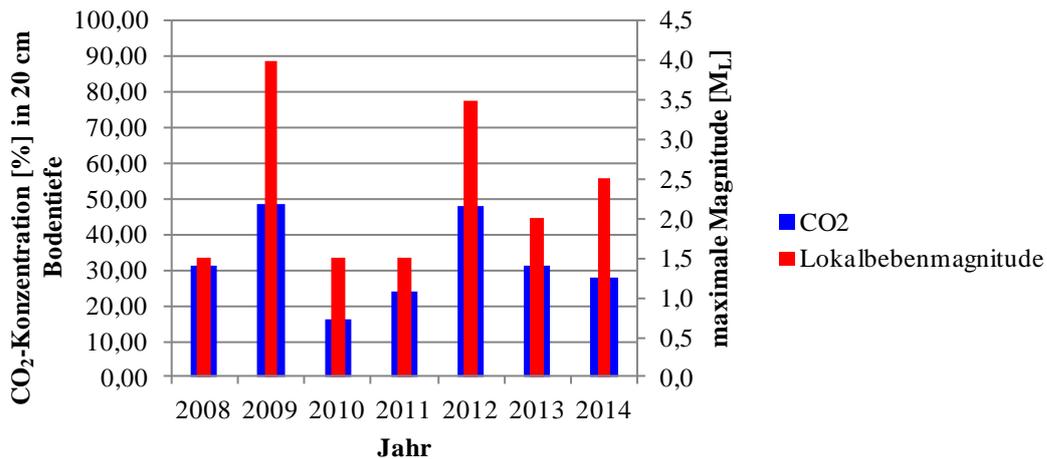


Abb. 37: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014) in Abhängigkeit von den Erdbebenstärken [M_L] von 2007 bis 2014 (aus Internetquelle 1). Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte aus 22 Messstellen. Es werden immer die Schwarmbebenereignisse des Vorjahres auf die CO₂-Messungen des Folgejahres bezogen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Dieses Schwarmbebenereignis ist auf aufsteigendes Magma aus dem Erdmantel zurückzuführen. Im Nachhinein konnten gemessene Erhöhungen der Heliumraten als Ankündigungen dieses Magmaeinflusses in die Gesteinsrisse interpretiert werden. Das verzögerte Auftreten der einzelnen Phasen und der starken Schocks sind auf unterschiedliche Fluidtransporte während des Ereignisses zurückzuführen. An gasenden Stellen die sich auf tiefreichenden Fluidwegen befinden, existiert eine direkte Versorgung mit aufsteigenden Fluiden, wodurch ebenfalls ein rasches Aufsteigen von Magma begünstigt wird. Hingegen werden Fluide von den Ausgasungsstellen weg, durch das Störungsnetzwerk in seismogene Zonen transportiert (Bräuer et al. 2009).

An den Abb. 29-32 war zu erkennen, dass die Kohlendioxidkonzentrationen in der Birnenmofette im März 2009, im Vergleich zu den Konzentrationen im März 2008, klar gestiegen sind. Am deutlichsten ist die Steigerung der CO₂-Gehalte in den zwei starken Ausgasungsbereichen auszumachen (Abb. 30), in denen die 22 berücksichtigten Messstellen lokalisiert sind.

Der Anstieg der CO₂-Konzentrationen kann statistisch bestätigt werden (Saßmannshausen 2010). Es ist demnach davon auszugehen, dass die Unterschiede in den Konzentrationen Folgen des Schwarmbebenereignisses sind.

In den Jahren 2009 und 2010 wurden keine seismischen Aktivitäten aufgezeichnet, was eine abrupte Abnahme der CO₂-Konzentrationen in den Jahren 2010 und 2011 zur Folge hatte (Abb. 37). Vereinzelt wurden maximale Lokalbebenmagnituden von 1,5 gemessen; allerdings lag der überwiegende Teil der geogenen Aktivitäten unter diesem Wert. Nach Weinlich et al.

(2013) sind derartig schwache seismische Bewegungen nicht in der Lage, Veränderungen hinsichtlich des Kohlendioxids zu erwirken. Im Vergleich mit den CO₂-Werten von Juli 2010 sind die Konzentrationen im März 2011 höher. Möglicherweise ist diese Konzentrationserhöhung als Vorankündigung der Schwarmbeben (Faber et al. 2009) im Spätsommer 2011 zu deuten.

Im Spätsommer (August bis September) 2011 konnten erneut Schwarmbeben dokumentiert werden. Zwar erreichten diese Ereignisse aufgrund ihrer Dauer nicht im Entferntesten die Intensität des Schwarmbebenereignisses von Oktober 2008, aber immerhin erreichten die höchsten Schocks eine maximale Magnitude von ungefähr 3,5 M_L (Fischer et al. 2014). Anschließend konnte im März 2012 ein Anstieg der Kohlendioxidkonzentration an der konstant gasenden Teilfläche in einer Bodentiefe von 20 cm gemessen werden.

Nach diesem Ereignis waren in den Jahren 2012 und 2013 nur moderate Beben, mit geringen Lokalbebenmagnituden zu verzeichnen. Der Abb. 37 ist zu entnehmen, dass im März 2013 die CO₂-Werte erneut eine starke Senkung erfuhren. Im März 2014 wurde in etwa der gleiche Wert wie im März 2011 erreicht.

Nach Weinlich et al. (2013) ist es problematisch, geogene Prozesse mit seismischen Ereignissen zu verbinden, solange nicht mehrere Untersuchungsstandorte miteinander verglichen werden können. Dennoch können extreme Abweichungen in den Kohlendioxidkonzentrationen mit seismischer Aktivität in Verbindung gebracht werden. Die Veränderungen können entweder zukünftige seismische Bewegungen ankündigen; sie können diese begleiten oder sie sind die Folge solcher Ereignisse (Faber et al. 2009).

Es dürfen bei der Frage, inwieweit seismische Aktivitäten das Bodengas beeinflussen, folgende Fakten nicht außer Acht gelassen werden:

- ❖ Die Existenz eines Magmareservoirs in 60 bis 30 km Tiefe, aus dem frisches Magma Richtung Erdoberfläche aufsteigt, konnte nachgewiesen werden (Geissler et al. 2005; Bräuer et al. 2009).
- ❖ Der Magmatransport verursacht eine Verdünnung der dehnbaren oberen Kruste, wodurch die Moho-Diskontinuität von 31 Tiefe auf 27 km angehoben wurde (Geissler et al. 2005).
- ❖ In einer Tiefe von 21 bis 29 km trennt sich das vom Erdmantel stammende Kohlendioxid vom Magma und setzt seinen Diffusionsweg durch kanalartige Gesteins- oder Mikrorisse an die Oberfläche fort (Bankwitz et al. 2003; Geissler et al. 2005).

- ❖ Während des Aufstiegs stößt das Kohlendioxid an Barrieren, die durch eine geringe Permeabilität des Gesteins gekennzeichnet sind. Unterhalb dieser Hindernisse wird das CO₂ zurückgehalten, was zu Druckstörungen in den Poren führt. Aufgrund des permanenten Nachschubs an aufsteigenden Fluiden, also beispielsweise Kohlendioxid oder Helium, kommt es zu aktiven Verdichtungen in der spröden Oberkruste. Diese Veränderungen in der Kruste führen zu einer verminderten Durchlässigkeit, die zunächst zu einer Druckzunahme führt, und anschließend zu Brüchen im Gestein. Dieser Prozess des Verdichtens und Wiederöffnens, als Ursache für wiederkehrende Druckerhöhungen im Störungssystem, resultiert aus dem konstanten Fluidfluss. Der zunehmende Porendruck ist ein Auslöser für seismische Aktivitäten in der Umgebung dieser Barrieren und nicht an diesen selbst (Bräuer et al. 2008, 2009; Schütze et al. 2012; Fischer et al. 2014).
- ❖ Auf der Erdoberfläche innerhalb der Nový Kostel-Störungszone sind bislang keine CO₂-Ausgasungen festgestellt worden. Das bedeutet zum Einen, dass sich dort solche Barrieren befinden (Bräuer et al. 2008, 2009) und zum Anderen, dass die Störungen unterhalb des Egerbeckens miteinander verbunden sein müssen (Weinlich et al. 2013). Dieses aus Störungen bestehende Netzwerk ist hydraulisch verbunden. Daraus resultiert, dass durch Veränderungen des geodynamischen Systems (zum Beispiel Verdichtungen oder Brüche) entstandene Druckimpulse entlang des hydraulischen Leitungssystems weitergeleitet werden können, auch über weite Distanzen. Auf diese Weise kann ein Stressaufbau ausgeglichen werden. Findet dieser Ausgleich nicht statt, kommt es zu Schwarmbeben (Weinlich 2014). Schon geringe Druckunterschiede sind in der Lage, dieses System aus dem Gleichgewicht zu bringen, was zu Stressaufbau und Permeabilitätsveränderungen führt. Der Stress wird im Übergangsbereich zwischen veränderten Schwachstellen und unveränderten Bereichen des Systems mit hohen Reibungskräften aufgebaut. Ein solcher Übergangsbereich befindet sich beispielsweise im Norden von Nový Kostel (Weinlich 2014).
- ❖ Die veränderten Schwachstellen entstehen durch Reaktionen des aufsteigenden, in Wasser gelösten Kohlendioxids mit den Gesteinsmineralien, an den Bruchflächen des Störungssystems. Diese Gesteinsveränderungen münden in mechanischer Instabilität (Heinicke et al. 2009). Die entstehenden Produkte der oben beschriebenen Reaktionen wirken wie Schmiermittel in dem Störungsnetzwerk. Sie verändern die Durchlässigkeit des Gesteins; folglich resultieren aus dieser Schwächung des Systems schwache oder starke Bewegungen (Weinlich 2014).

- ❖ Der Mischung aus Kohlendioxid und Wasser kann eine zweifache Wirkungsweise nachgewiesen werden: 1) als chemisches Lösungsmittel, und 2) als physikalisches Element überträgt es den Fluiddruck oder es ist an Veränderungen des Porendruckes beteiligt. Dabei ist es nicht von großer Wichtigkeit, ob sich das CO₂ in der Gasphase befindet, oder in der Wasserphase (Heinicke et al. 2009).

Diese geologischen Bedingungen und geodynamischen Prozesse unterhalb des Eger-Beckens zeichnen sich an der Erdoberfläche durch unterschiedlichste Auswirkungen ab (Bankwitz et al. 2003; Flechsig et al. 2008; Schütze et al. 2012). Unter anderem spiegelt das Kohlendioxid in seiner Verteilung und seinen Konzentrationen die im Untergrund ablaufenden Prozesse an der Erdoberfläche ab. Wie oben erläutert wurde, beeinflusst das aufsteigende CO₂ selbst die geodynamischen Prozesse in dem Störungssystem; die Gasdiffusion wird aber gleichzeitig auch von diesem limitiert oder verändert. Demzufolge ist es wahrscheinlich, dass Zu- oder Abnahmen der Kohlendioxidkonzentrationen aus seismischen Aktivitäten resultieren. Diese Variationen sind dann in der Pedosphäre nachzumessen. Nach Faber et al. (2009) sinken die CO₂-Werte graduell vor einem Schwarmbeben und während des Ereignisses werden schließlich Tiefstwerte in den Konzentrationen erreicht. Die Kohlendioxidausgasungen nach den Beben sind von den neuen Gegebenheiten im Untergrund abhängig. Liegen Verdichtungen vor, kann es zu einer abrupten Abnahme der CO₂-Gehalte kommen (Weinlich et al. 2013). Sind neue Brüche entstanden, verändert sich die CO₂-Verteilung oder es werden neue Ausgasungsstellen gebildet. Eine Erhöhung der Konzentrationen ist auch unter den Bedingungen möglich, dass die Leitungswege des aufsteigenden Gases, vor und während eines Bebens unterbrochen werden. Dadurch kommt es zu Diffusionswiderständen, die Konzentrationsanreicherungen in tieferen Bodenschichten zur Folge haben. Nach den Beben ist es denkbar, dass sich die Verdichtungen wieder öffnen, woraus eine abrupte Freisetzung des angesammelten Gases resultieren kann.

Mithilfe dieser Erklärungen können die gestiegenen Kohlendioxidkonzentrationen in der Birnenmofette im März 2009 und im März 2012 interpretiert werden. Der Tab. 5 ist zu entnehmen, dass die Wetterbedingungen in den Märzmonaten 2008, 2009 und 2012 ähnlich waren. Demnach bieten die Wetterfaktoren keine Erklärungsansätze für die CO₂-Unterschiede im März 2009 und 2012. Daraus kann die Schlussfolgerung formuliert werden, dass die seismische Aktivität die Ursache der gestiegenen Gaskonzentrationen darstellen könnte.

In der Abb. 37 sieht man, dass die CO₂-Gehalte auch in Zeiten seismischer Ruhe zunehmen. Der Mittelwert der Kohlendioxidkonzentrationen aus den konstant gasenden Messpunkten

steigt in 20 cm Bodentiefe im März 2014 auf 24% an, während im März 2013 16% gemessen wurden.

Zu dieser Feststellung gelangen auch Kämpf et al. (2013), anhand von wiederholt durchgeführten Messungen in den Mofettenfeldern von Hartoušov und Bublák.

Neben den beeinflussenden Wetterfaktoren können Variationen in den CO₂-Gehalten auch durch nicht-seismische Aktivitäten geogenen Ursprungs zustande kommen (Weinlich et al. 2013). Solche Störungsbewegungen entstehen durch Stressaufbau in den veränderten fluidleitenden Arealen des Störungssystems, der aber durch Druckimpulse in dem hydraulischen System weitergeleitet, und somit ausbalanciert werden kann. Der aufgebaute Stress führt unter diesen Bedingungen nicht zu intensiven seismischen Aktivitäten, sondern zu einem sogenannten „Störungskriechen“, wodurch Ausreißer in den CO₂-Konzentrationen verursacht werden können. Es ist andererseits auch möglich, dass diese nicht-seismischen Bewegungen zu kurzzeitigen Verdichtungen führen, die in plötzlichen Abnahmen der Gaskonzentrationen enden (Weinlich et al. 2013).

Die Erdgezeiten stellen eine zusätzliche Ursache für aufkommenden Stress in dem Störungssystem dar (Horálek und Fischer 2008; Faber et al. 2009; Weinlich et al. 2013). Die Anziehungskräfte von Sonne und Mond, die die Wasserstandschwankungen der Ozeane verursachen, haben auch Wirkungen auf die Erdkruste (Murawski und Meyer 2004). Zweimal täglich bewirken sie Schwingungen in der Erdkruste, die zu einer Bewegung von 52 cm führen. Diese kurzzeitigen Bewegungen bedingen Veränderungen der Permeabilität; aufgrund dessen verursachen sie Änderungen im Gastransport (Faber et al. 2009; Weinlich et al. 2013).

Auswertung der jährlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 5/10, 6/10 und 7/9 mithilfe der Schwarmbebenaktivitäten

Die Auswertungen der Abb. 38a-c, sowie der Tab. 8 führen zu einer Bestätigung der oben formulierten Schlussfolgerungen.

An allen drei Einzelpunkten verursachten die seismischen Aktivitäten in den Jahren 2008 und 2011 einen deutlichen Anstieg der Kohlendioxidkonzentrationen jeweils im März 2009/2012. Auch die abrupte Konzentrationsabnahme in den Märzmonaten 2010, 2011 und 2013 in Zeiten seismischer Ruhe, wie in den Jahren 2009, 2010 und 2012, ist bei allen Messpunkten prägnant.

Eine Ausnahme ist in Abb. 38c zu verzeichnen. An der Messstelle 7/9 steigen zwar die CO₂-Konzentrationen im März 2012 nach dem Schwarmbeben von 2011 an, jedoch wird eine deutlichere Erhöhung der Werte im März 2013 gemessen.

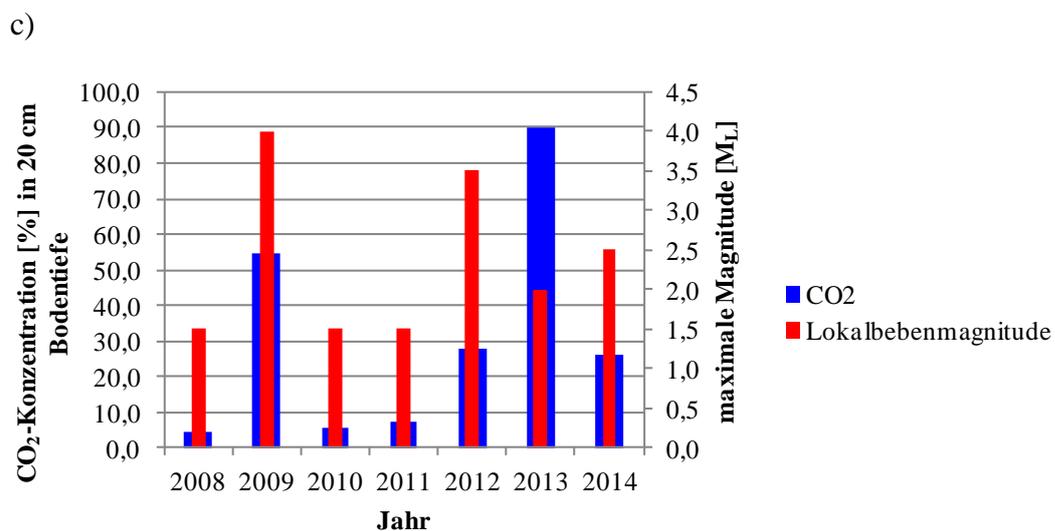
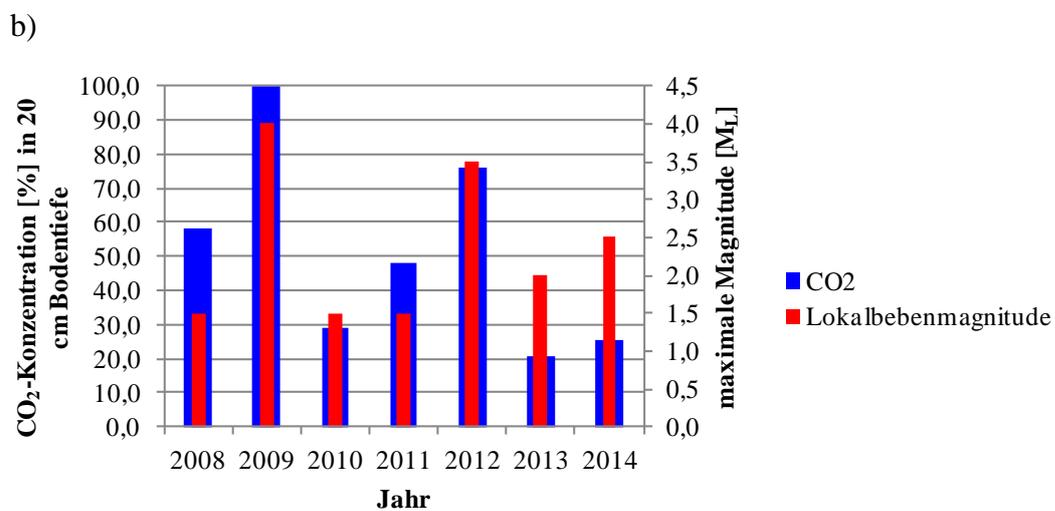
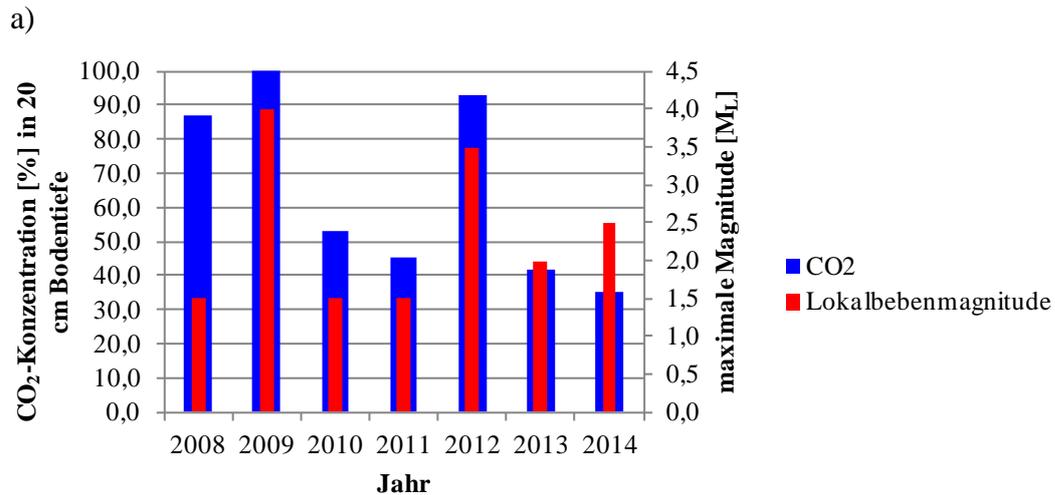


Abb. 38: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an den Messpunkten 5/10 (a), 6/10 (b) und 7/9 (c) in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014), im Zusammenhang mit den Erdbebenstärken [M_L] von 2007 bis 2014 (aus Internetquelle 1). Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messpunkte. Es werden immer die Schwarmbebenereignisse des Vorjahres auf die CO₂-Messungen des Folgejahres bezogen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

In Abb. 38b sind wiederholt steigende CO₂-Gehalte in Zeiten seismischer Ruhe festzustellen. Im März 2011 steigt die Kohlendioxidkonzentration auf 48% trotz fehlender Schwarmbeben vor der Messung an. Im März 2010 wurden nur 29% gemessen.

Die formulierten Beobachtungen an den einzelnen Messpunkten können, wie auch bei der Auswertung der festgelegten Teilfläche, mit den geodynamischen Bedingungen des Untersuchungsgebietes erklärt werden.

Tab. 8: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2007 bis Juni 2014 und jährliche Kohlendioxidkonzentration [%] an den Einzelpunkten 5/10, 6/10 und 7/9 in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014). Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messpunkte. (k. A.=keine Angabe; Kap. 3.1) (aus Internetquelle 1) (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Zeitraum	max. Stärke [M_L]	Anzahl Epizentren	Tiefe [km]	CO₂ 20 cm [%] 5/10	CO₂ 20 cm [%] 6/10	CO₂ 20 cm [%] 7/10
01.01.2007- 31.12.2007	1,5	1333	7-14	k. A.	k. A.	k. A.
01.10.2008- 31.12.2008	4,0	2602	6-10	86,9	58,2	4,6
01.01.2009- 31.12.2009	1,5	688	6-11	100,0	100,0	54,4
01.01.2010- 31.12.2010	1,5	372	7-12	53,0	28,8	5,9
01.01.2011- 31.12.2011	3,5	4185	6-10	45,5	48,0	7,5
01.01.2012- 31.12.2012	2,0	984	7-11	93,1	76,2	27,7
01.01.2013- 31.12.2013	2,5	1238	6-9	41,7	21,0	89,9
01.01.2014- 10.06.2014	4,5	1477	8,5	35,1	25,5	26,2

Fazit

Die Auswertungen der jährlichen Gasmessungen führen zu der Schlussfolgerung, dass die gasenden Bereiche der Birnenmofette konstant vorhanden sind, die CO₂-Konzentrationen jedoch variieren. Ferner haben Gegenüberstellungen der CO₂-Veränderungen mit den lokalen Wetterverhältnissen, sowie den geodynamischen Bedingungen gezeigt, dass die CO₂-

Variationen durch unterschiedliche Wetterfaktoren und seismische, sowie nicht-seismische Aktivitäten beeinflusst werden können.

Für die Darstellung und Interpretation der Rohdaten haben sich zwei Auswertungsansätze bewährt. Zum Einen die Bestimmung einer gasenden Teilfläche mithilfe konstant gasender Messpunkte. Zum Anderen das Festlegen und Analysieren verschiedener Einzelpunkte. Unter Zuhilfenahme beider Ansätze wurden vergleichbare Resultate erzielt, wodurch formulierte Schlussfolgerungen zweifach bestätigt werden konnten. Der dritte Auswertungsansatz führte zu keinem Ergebnis, da die sporadisch auftretenden Bereiche derzeit mit keinem beeinflussenden Parameter in Verbindung gebracht werden können.

3.1.2.2 Vierteljährliche Veränderungen der CO₂-Konzentrationen

Die unten folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der vierteljährlichen Kohlendioxidaufnahmen. Der erste Jahreszyklus beginnt im März 2012 und endet im März 2013. Auf diese Weise sind in dem Jahreszyklus vier Jahreszeiten enthalten. Der Frühling ist zweimal enthalten um 1) eine mögliche Rückentwicklung auf die anfängliche Ausgasungssituation festzustellen zu können, und 2) um zwölf Monate zu komplettieren. Das gleiche gilt für den zweiten Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014. Der dritte Jahreslauf konnte nicht mehr zu Ende geführt werden. Er beginnt im März 2014 und die letzten Messungen haben im September 2014 stattgefunden.

In einer Bodentiefe von 10 cm zeigen sich prägnante Konzentrationsunterschiede des Kohlendioxids im Jahreslauf (Abb. 39-41). In allen Aufnahmejahren ist eine deutliche CO₂-Abnahme vom Frühling zum Sommer festzustellen. In den Märzmonaten sind die Kohlendioxidgehalte höher als in den Sommer- oder Herbstmonaten. Im Winter steigen die CO₂-Werte wieder und übersteigen dabei sogar teilweise die anfänglichen Konzentrationen im März. Herausragend ist diese jahreszeitliche Veränderung in dem Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 festzustellen (Abb. 39). Abweichend ist während dieses Jahres nur der März 2013, in dem das Bodengas im Vergleich zum März 2012 sehr geringe CO₂-Werte aufweist.

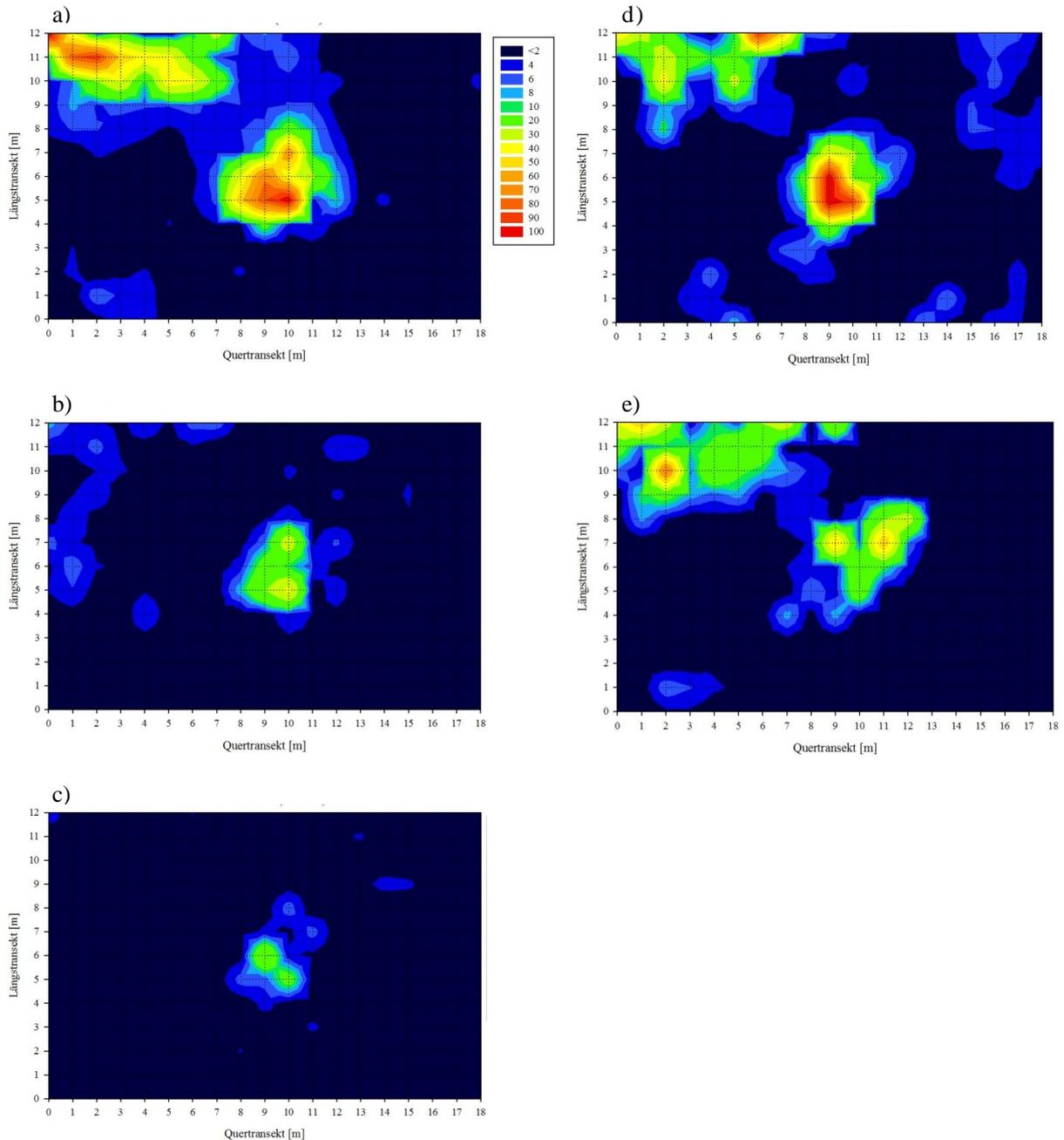


Abb. 39: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

In Abb. 40 ist der Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 dargestellt. Diese Aufnahmen zeigen zwar nicht so prägnante Veränderungen der CO₂-Konzentrationen mit den Jahreszeiten, wie in Abb. 39 zu sehen war; dennoch ist auch in diesem Jahreslauf eine stetige Abnahme von März bis zu den Sommer- und Herbstmonaten festzustellen. Dann erfolgt wieder eine Zunahme im Winter. Im März 2014 sind die Konzentrationen wieder vergleichbar mit der Wintermessung 2014. Im Juni 2014 sind die CO₂-Werte sehr gering; sie zeigen ein

ähnliches Bild wie im Juni 2013. Allerdings steigen die Gasgehalte im September 2014 an (Abb. 41).

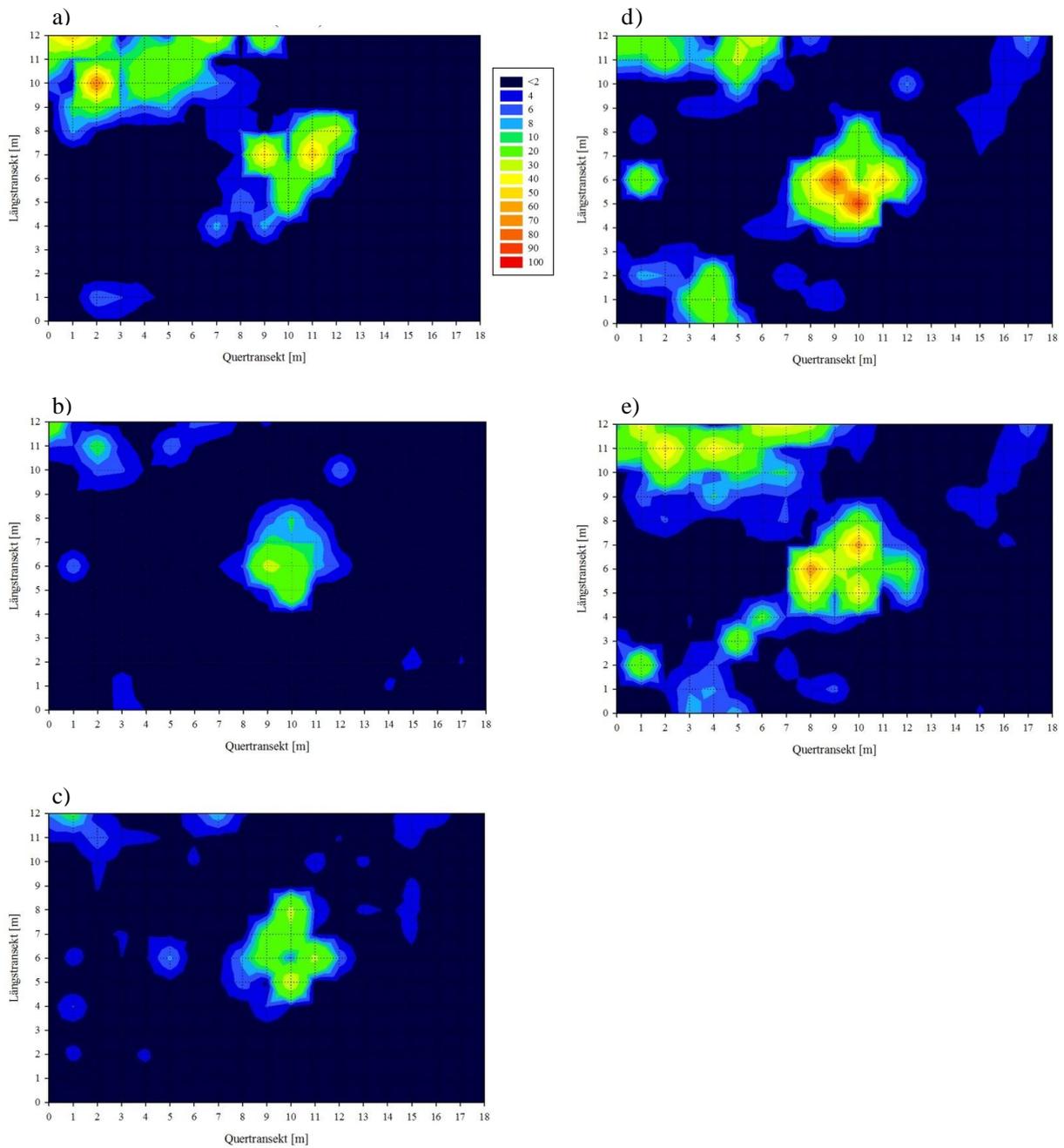


Abb. 40: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

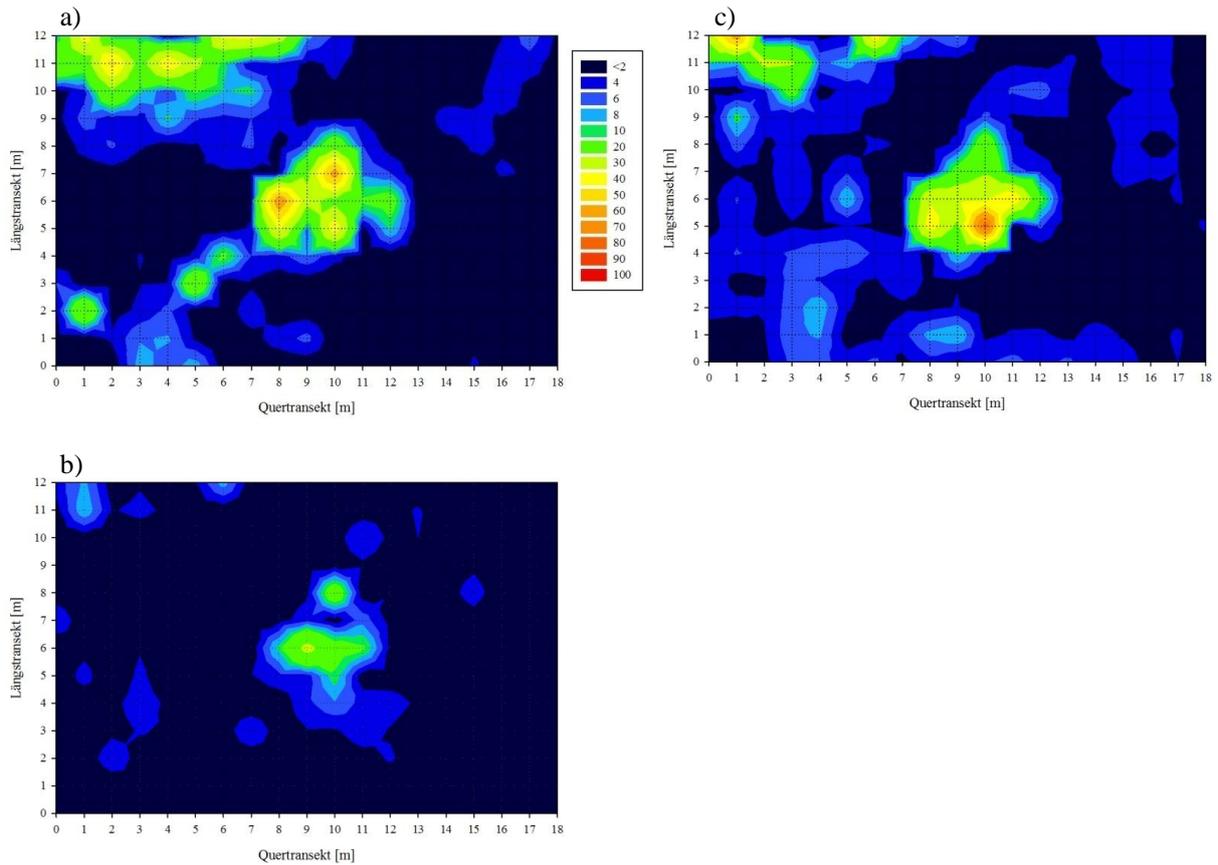


Abb. 41: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreslauf konnte nicht beendet werden) (Datenerhebung 2014)

Die oben geschilderten Beobachtungen setzen sich auch in einer Bodentiefe von 20 cm fort. Beispielhaft ist wiederholt der Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 (Abb. 42). Im Juni 2012 kommt es zu einer flächigeren Ausgasung innerhalb der Birnenmofette. Die CO₂-Werte fallen jedoch sehr gering aus; in den beschriebenen Exhalationszentren gehen die Konzentrationen im Vergleich zu denen im März 2012 sehr stark zurück. Der zweite und dritte Jahreslauf von März 2013 bis September 2014 (Abb. 43 und 44) ist insgesamt unsteter und nicht so klar. Es kann aber erneut vermerkt werden, dass die zwei Ausgasungszentren im Verlauf des Jahres zu keiner Zeit die Konzentrationen des März- oder Wintermonats erreichen.

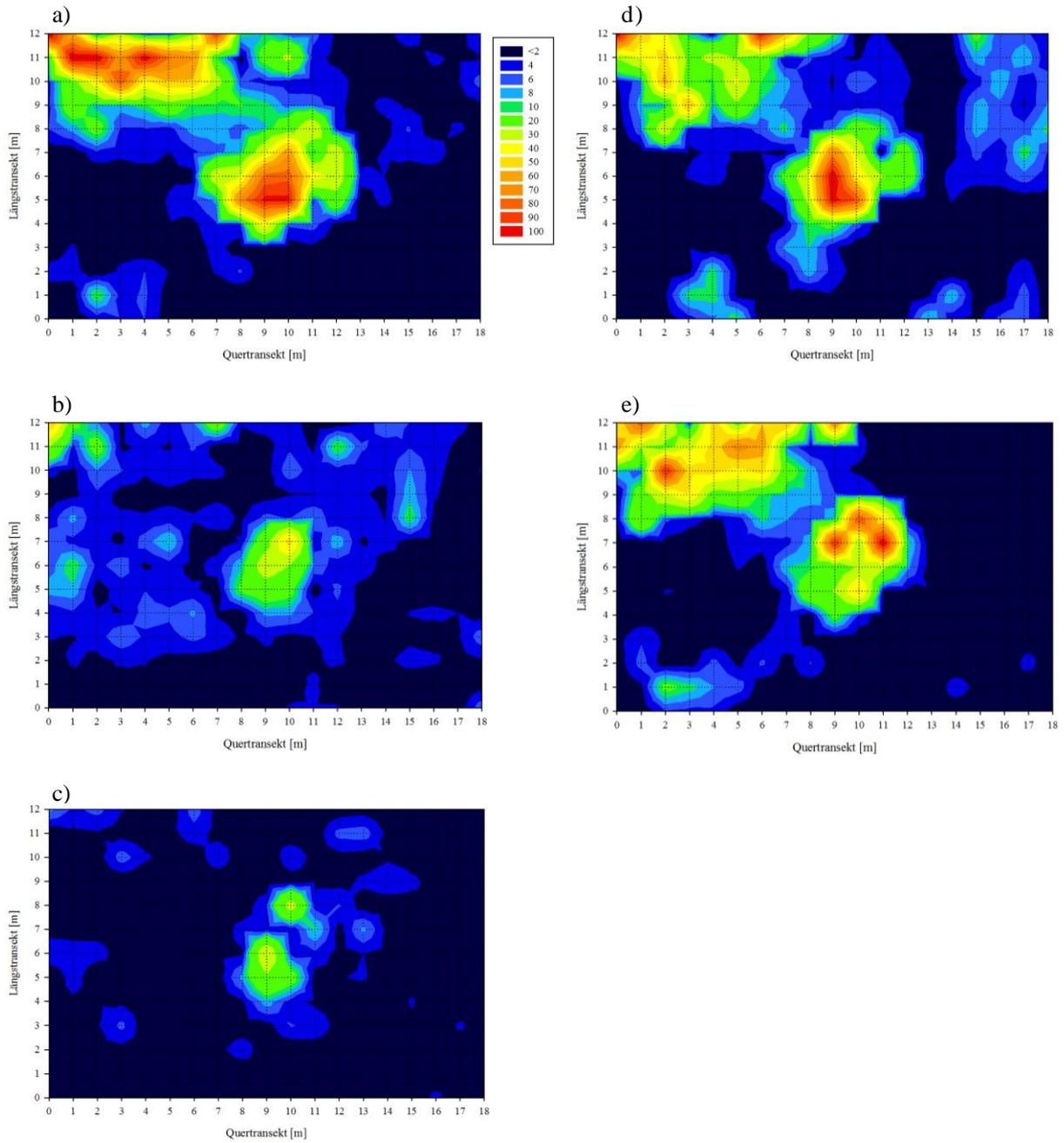


Abb. 42: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

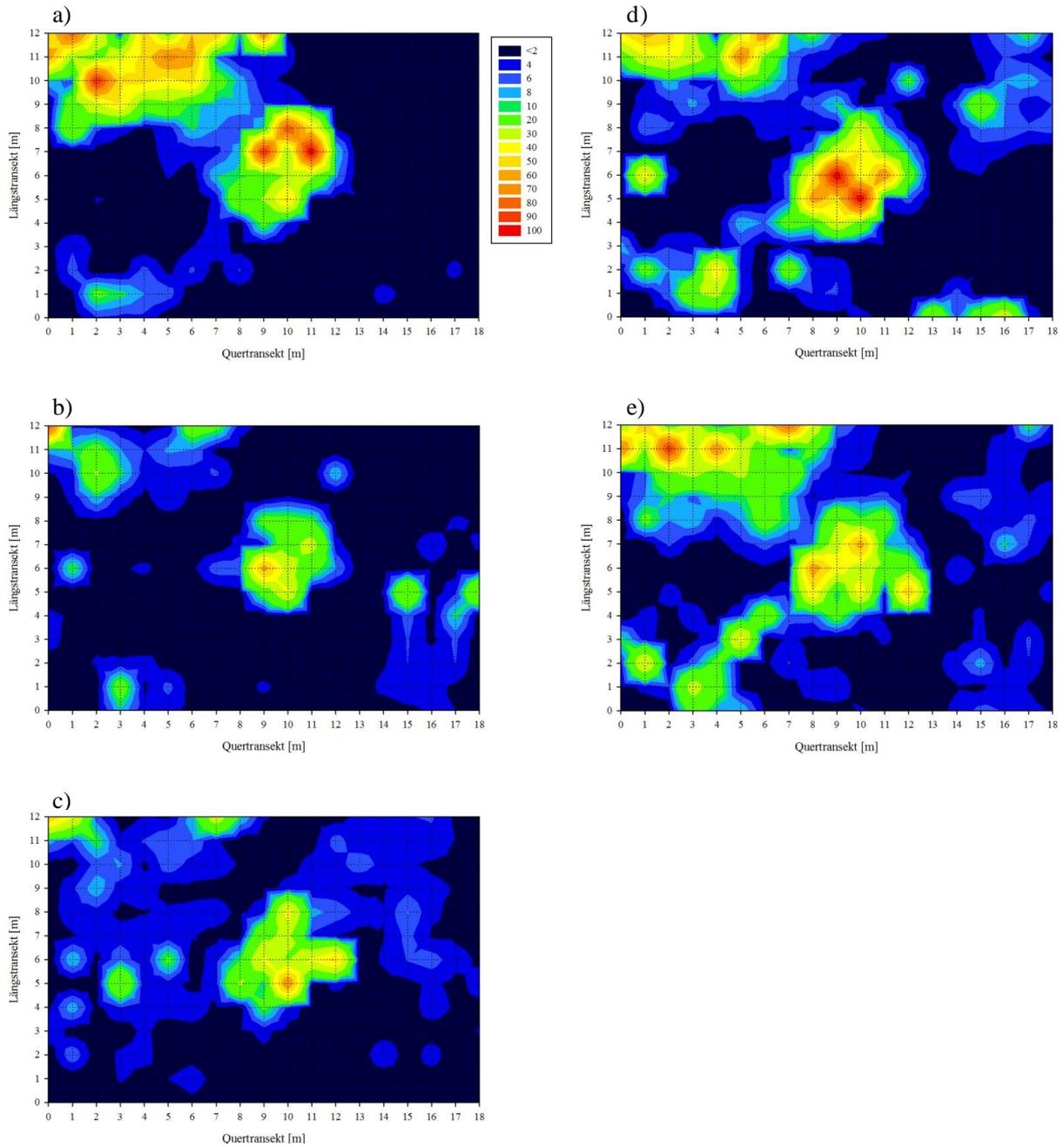


Abb. 43: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

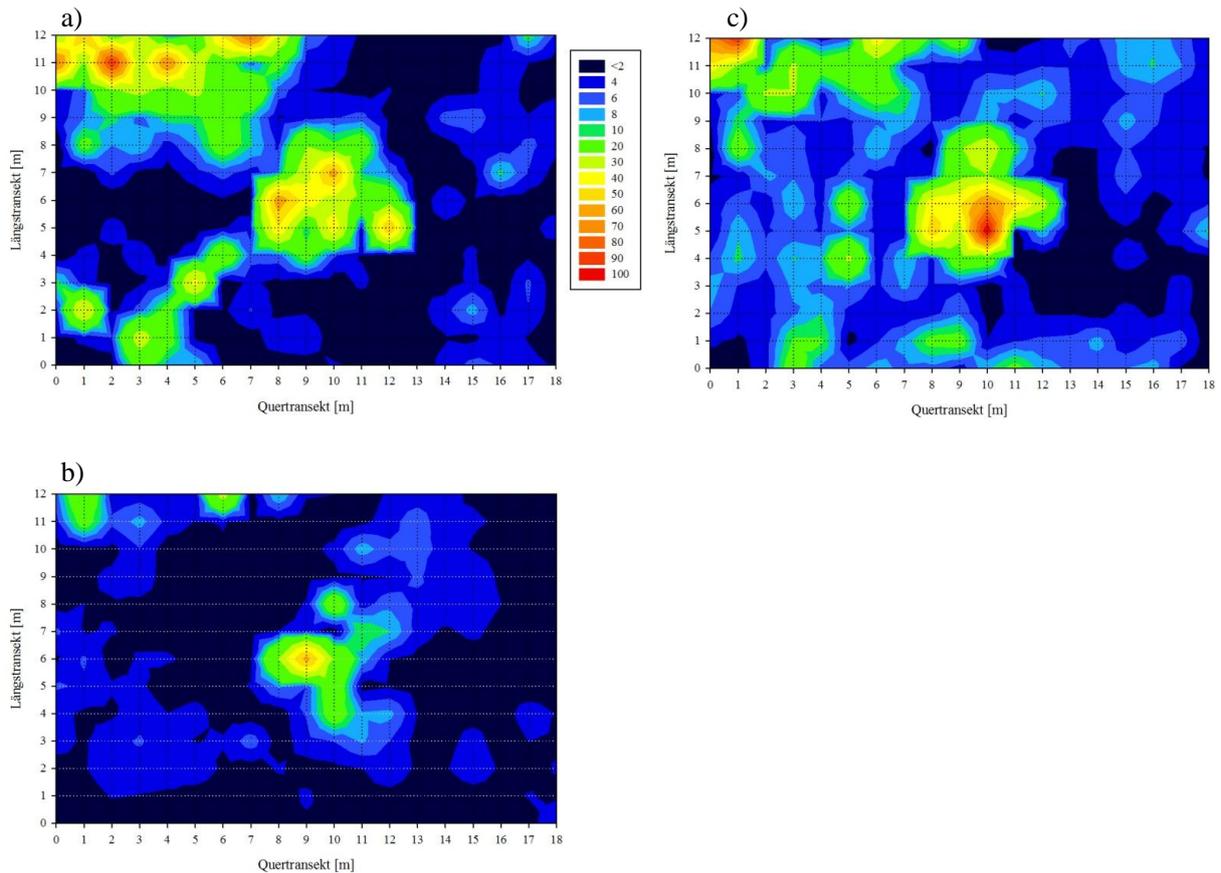


Abb. 44: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreslauf konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

Ab einer Bodentiefe von 40 cm sind die Kohlendioxidkonzentrationen in allen Jahreszyklen hoch und ausgeprägt (Abb. 45-50), so dass in den tieferen Bodenschichten die jahreszeitlichen Veränderungen nicht mehr in dem Maße offensichtlich sind, wie in den flachen. Dem ungeachtet ist die starke Abnahme in den Ausgasungsschwerpunkten wiederkehrend festzustellen. Ferner ragt das flächig verteilte Kohlendioxid besonders in den Sommermonaten von 2012 und 2013 heraus, das auch im September 2014 zu beobachten ist.

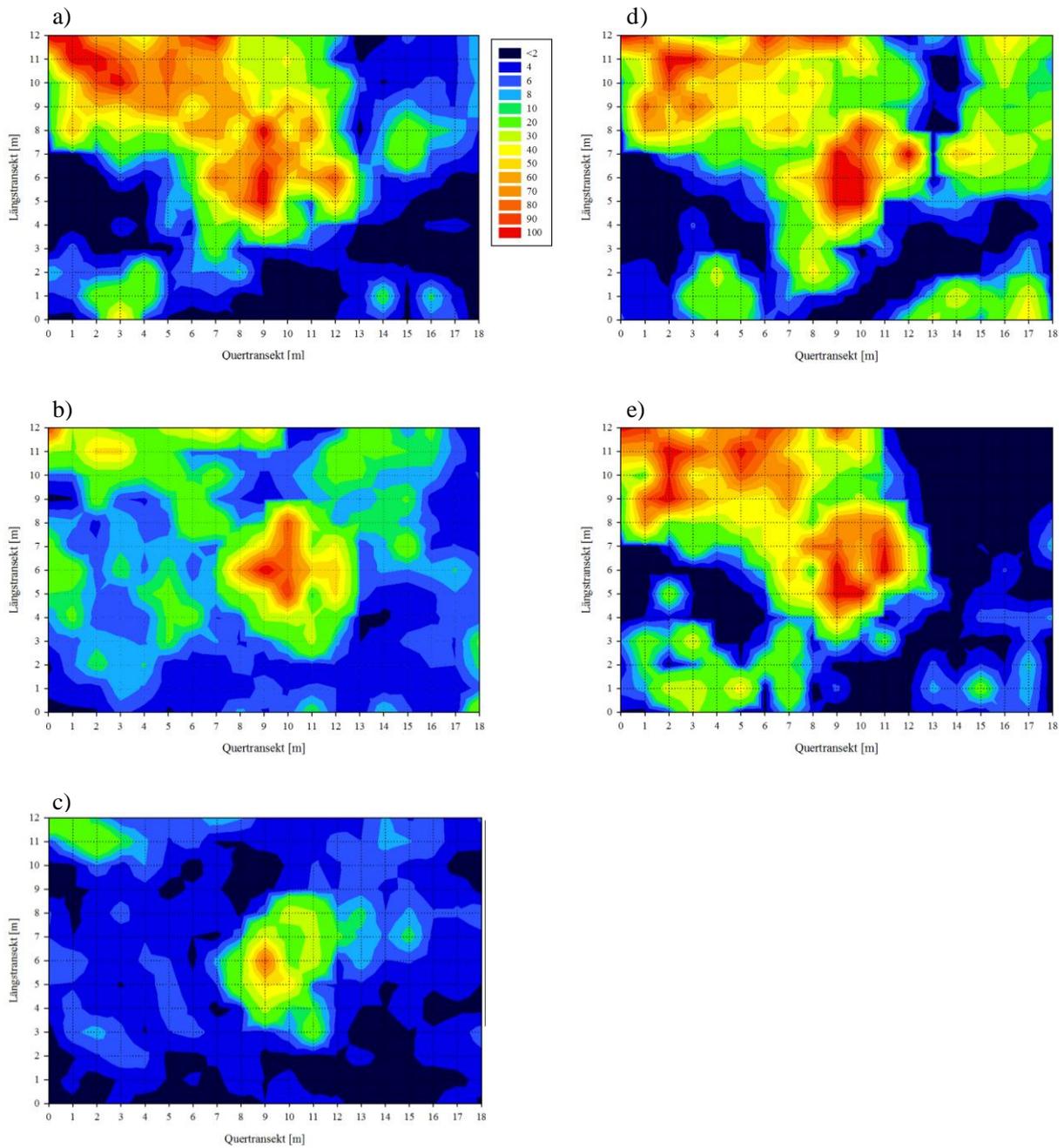


Abb. 45: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

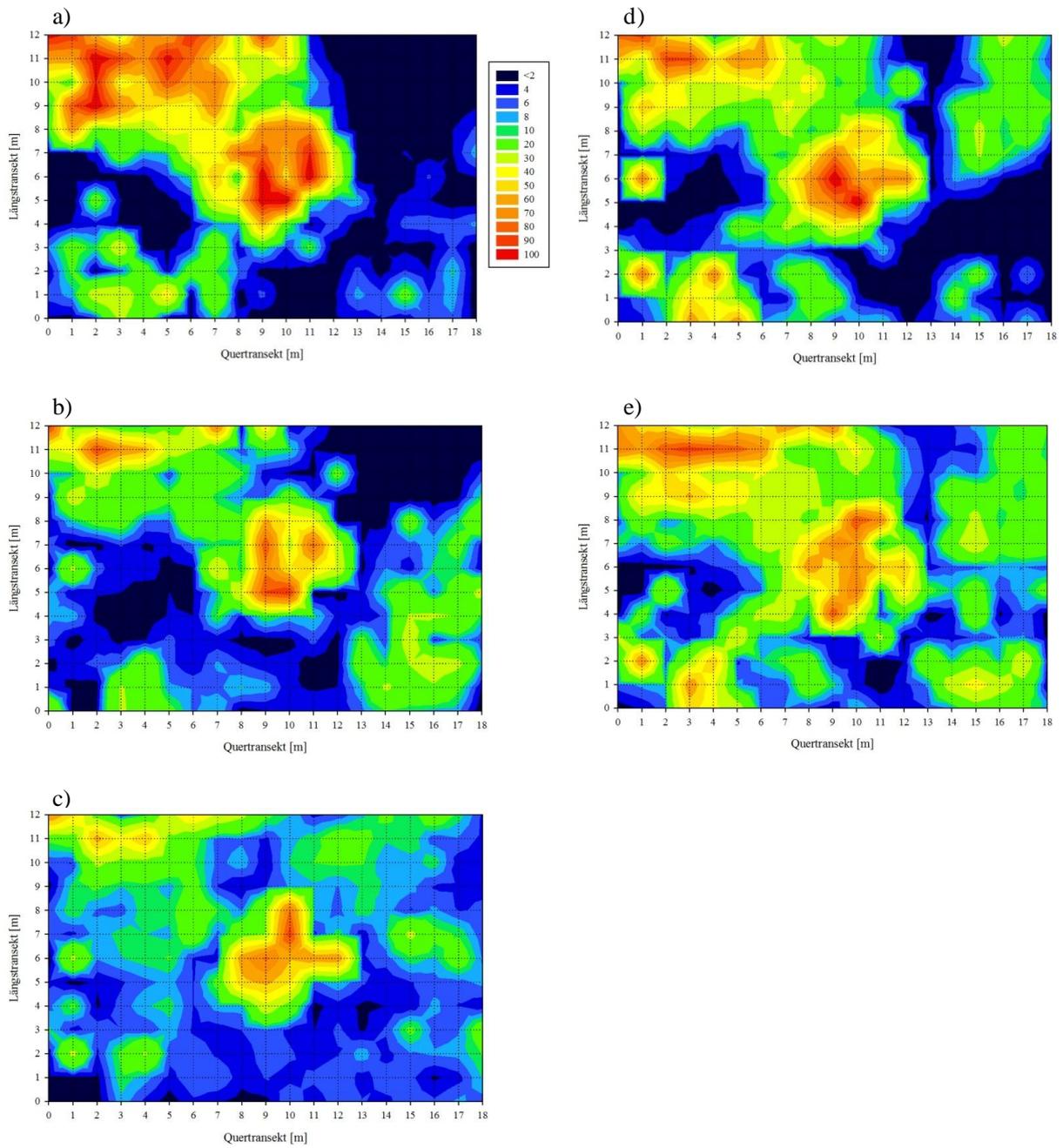


Abb. 46: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

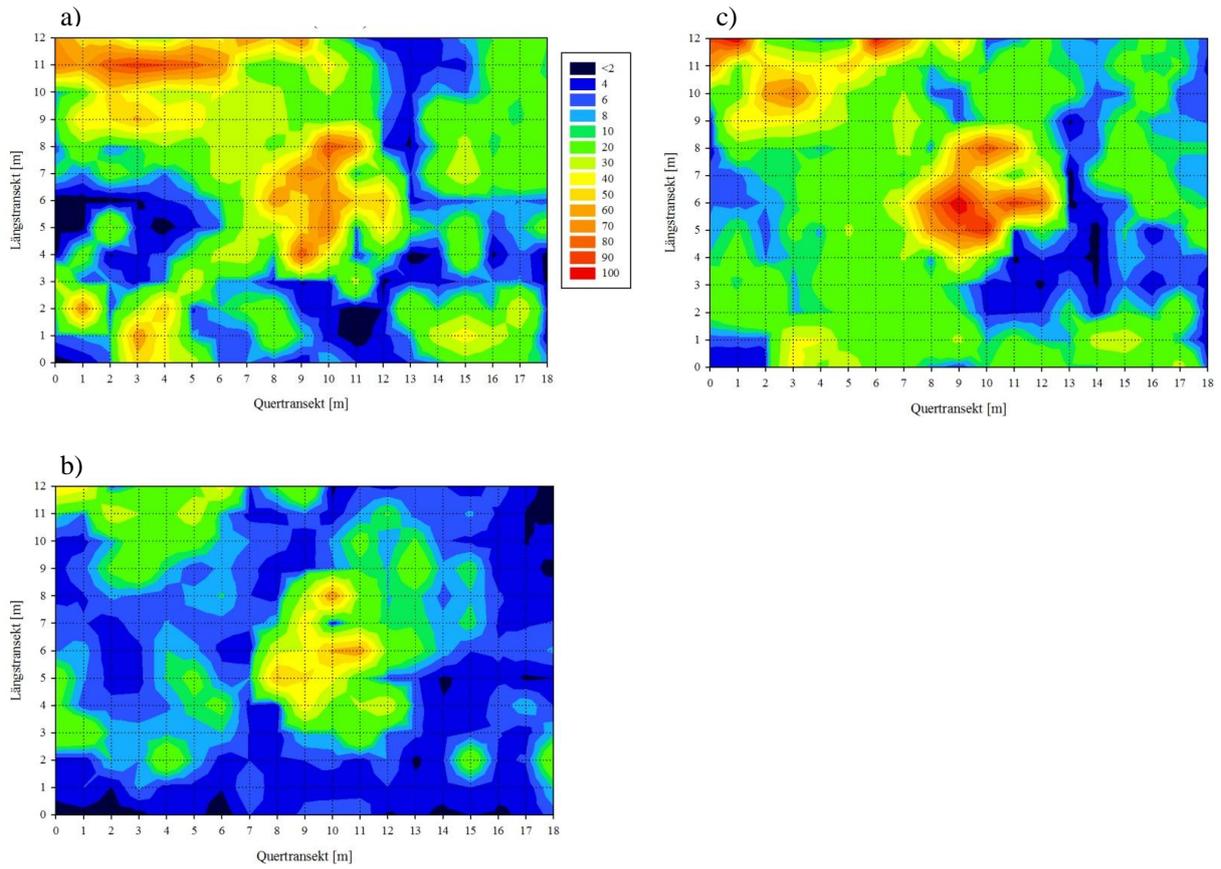


Abb. 47: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreszyklus konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

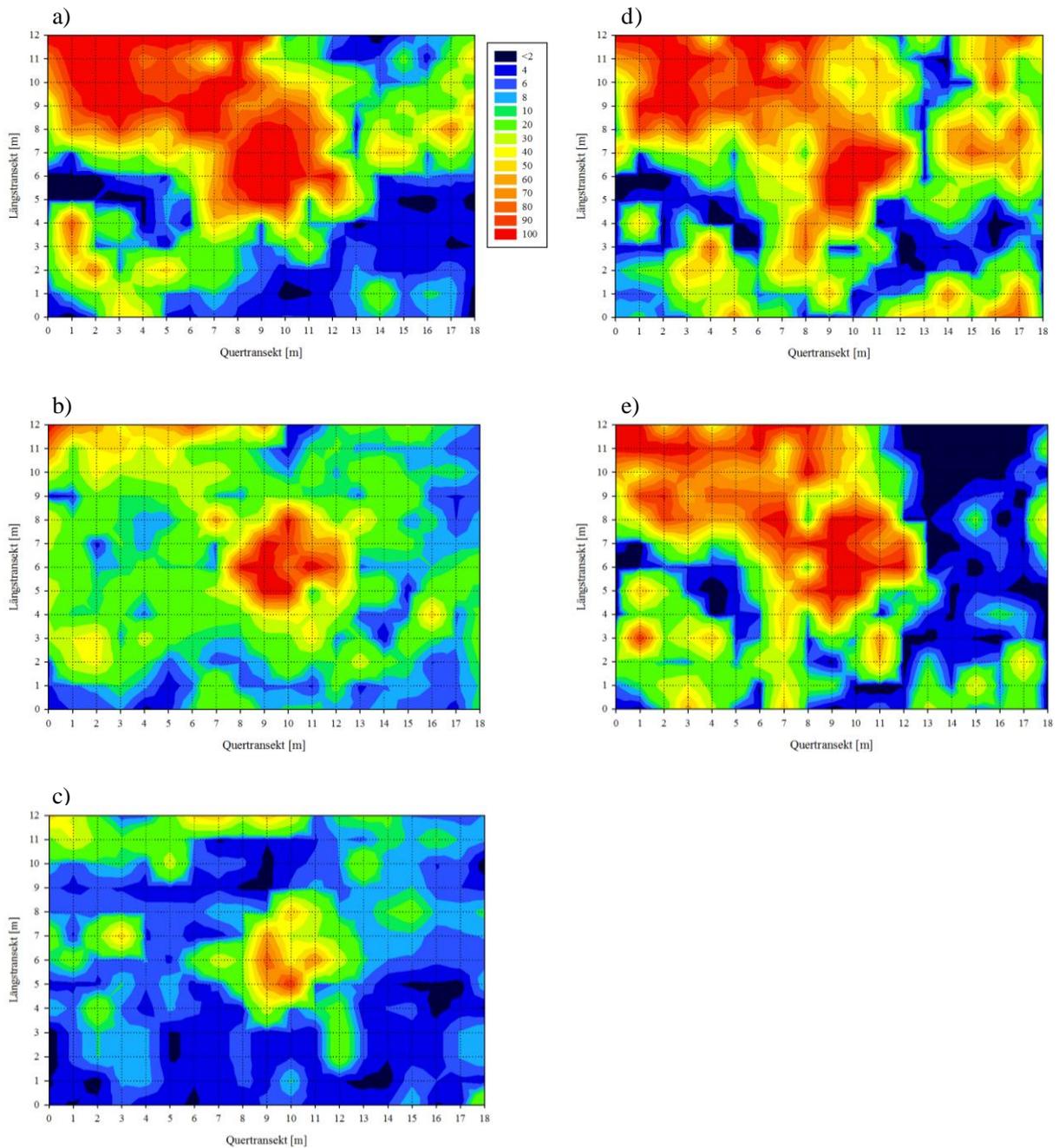


Abb. 48: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

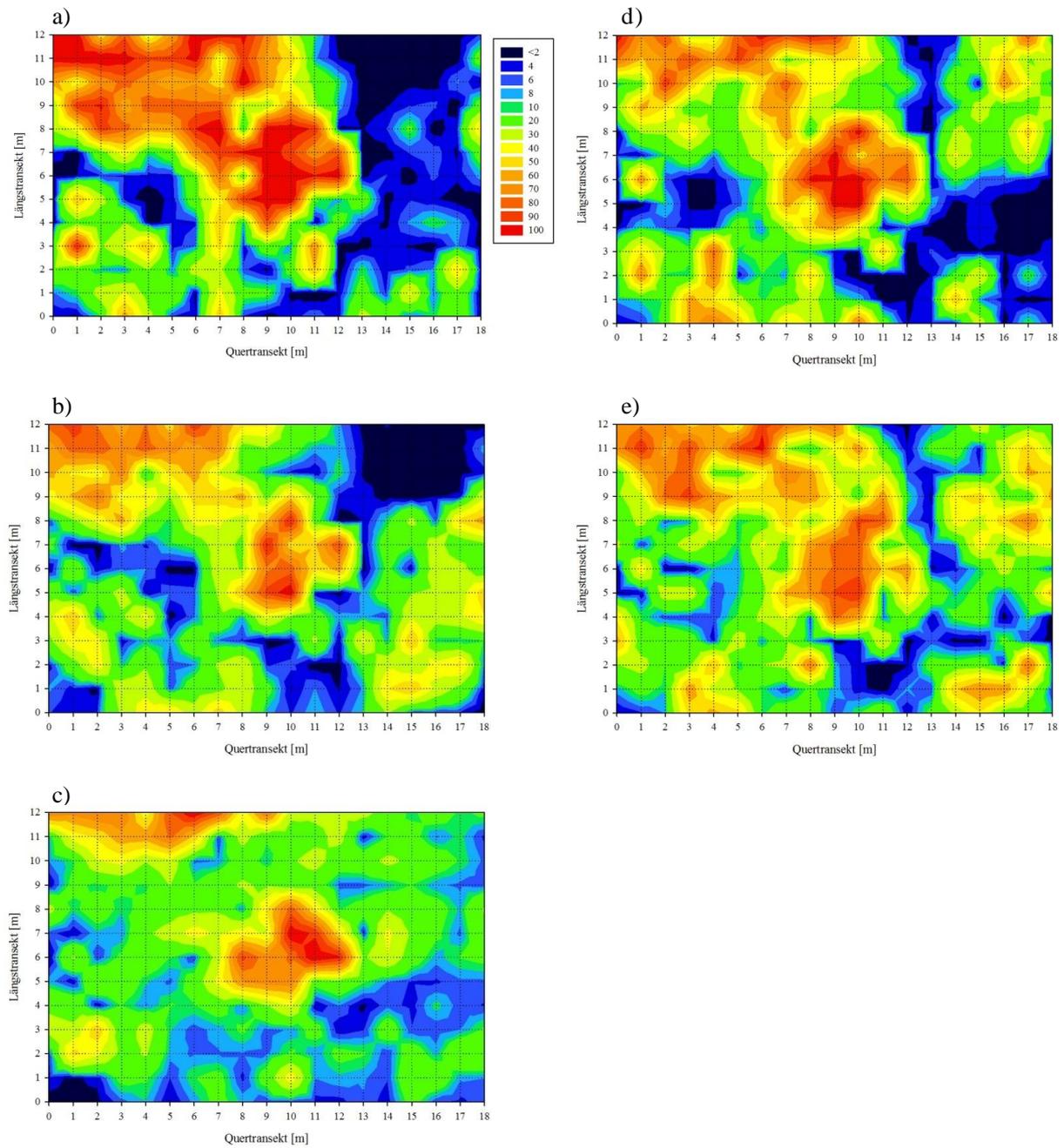


Abb. 49: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

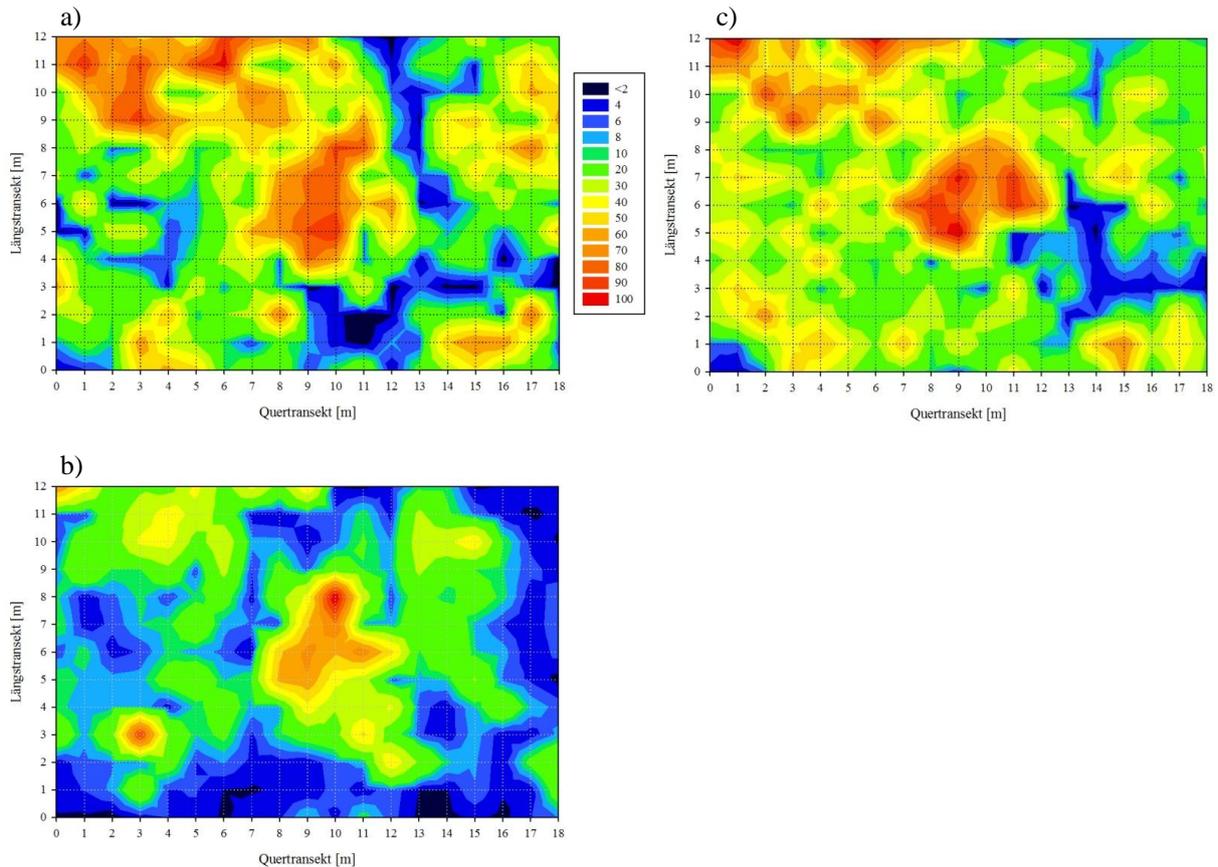


Abb. 50: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreslauf konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

Für die Interpretation der jahreszeitlichen Messungen wird nach den zwei Auswertungsweisen vorgegangen, die sich in Kap. 3.1.2.1 bewährt haben. Folglich wird die gasende Teilfläche einer genauen Betrachtung unterzogen, ebenso die drei Einzelpunkte. Dafür können teilweise die gleichen Erklärungsansätze angewendet werden wie bei den jährlichen Aufnahmen. Das trifft sowohl hinsichtlich der Beeinflussung durch das Wetter zu als auch im Bezug auf Veränderungen durch Schwarmbebenaktivitäten.

Möglicher Einfluss unterschiedlicher Wetterparameter auf die jahreszeitlichen CO₂-Veränderungen in der gasenden Teilfläche

Die Abb. 51 und die Tab. 9 zeigen die jahreszeitlichen Veränderungen der gasenden Teilfläche in Verbindung mit drei Wetterfaktoren. Jedoch existieren, abgesehen von den Monaten Januar und Februar, noch keine Angaben für das Jahr 2014.

In den Sommermonaten, also im Juni und August 2012, sowie im Juni 2013, sind die Temperaturen stabil, ebenso der Luftdruck. Die aufkommenden Niederschläge sind bis auf eine Ausnahme im August 2012 ebenfalls konstant. Unter diesen konstanten Bedingungen

sollten die Kohlendioxidkonzentrationen in diesen Monaten vergleichbar sein. Die Abb. 51 verdeutlicht diese Annahme beispielhaft. Die Gaskonzentrationen sind in den Sommermonaten durchgehend sehr gering, und am höchsten in den Wintermonaten (Abb. 51).

Der starke Rückgang der CO₂-Konzentrationen in Zusammenhang mit den Niederschlägen in den Sommermonaten konnte bei den jährlichen Veränderungen, ansatzweise mit der Absenkung des Grundwasserspiegels erklärt werden. Der Grundwasserpegel wird durch biotische und abiotische Faktoren beeinflusst: abiotisch in Form von Niederschlag und biotisch durch die Pflanzendecke. Daher variiert das Grundwasseraufkommen im Jahreslauf (Scheffer und Schachtschabel 2010). Im Winter ist der Boden aufgrund des fehlenden Pflanzenbewuchses wassergesättigt (Scheffer und Schachtschabel 2010). Wie in Kap. 3.1.1.4 erörtert, hat das aufsteigende CO₂ ein kleineres Porenvolumen zur Verfügung. Folglich entweicht es schneller aus der Pedosphäre in die Atmosphäre und in den oberen Schichten des Bodens steigen die Konzentrationen (Weinlich et al. 2013). Mit dem Beginn der Vegetationsperiode nimmt die Wassersättigung des Bodens ab (Scheffer und Schachtschabel 2010). Dafür gibt es zwei Gründe: 1) Als Folge der anlaufenden pflanzlichen Aktivitäten (Transpiration, Evaporation, Wasseraufnahme durch die Wurzeln) wird mehr Wasser aus dem Boden verbraucht und 2) dringt Regenwasser nicht tief in den Boden ein. Es verbleibt in den oberen Bodenschichten aus denen es sofort wieder verdunstet (Weinlich et al. 2013). Aufgrund dieser Umstände hat der Niederschlag in den Sommermonaten keinen Einfluss auf die Grundwasserpegel und somit wahrscheinlich auch nicht auf Kohlendioxidkonzentrationen, fehlende extreme Niederschläge vorausgesetzt (Weinlich et al. 2013).

In Kap. 3.1.2.1 konnten Auswirkungen des Luftdrucks auf das aufsteigende Gas vermutet werden. Bei den vierteljährlichen Messungen weichen die CO₂-Veränderungen in Verbindung mit dem Luftdruck ab. Ein hoher Luftdruck als Gegendruck für das aufsteigende Kohlendioxid könnte zu einer Erschwerung der Diffusion führen und folglich zu erniedrigten CO₂-Werten. Diese Schlussfolgerung kann mit der Abb. 51 nicht bestätigt werden. Es ergibt sich die Situation, dass der Luftdruck und das Kohlendioxid ähnliche Kurvenverläufe haben. Einzig im März 2013 und im Januar 2014 trifft die formulierte Annahme zu. Bei diesen Messungen sinken die Luftdruckwerte und die CO₂-Konzentrationen steigen an.

Die abweichenden Ergebnisse können durch denkbare Konkurrenzsituationen zwischen dem Luftdruck und dem Grundwasserspiegel, sowie dem Luftdruck und der Temperatur erklärt werden. Letztlich wären entweder das Grundwasser oder die Temperatur als dominierende Faktoren denkbar.

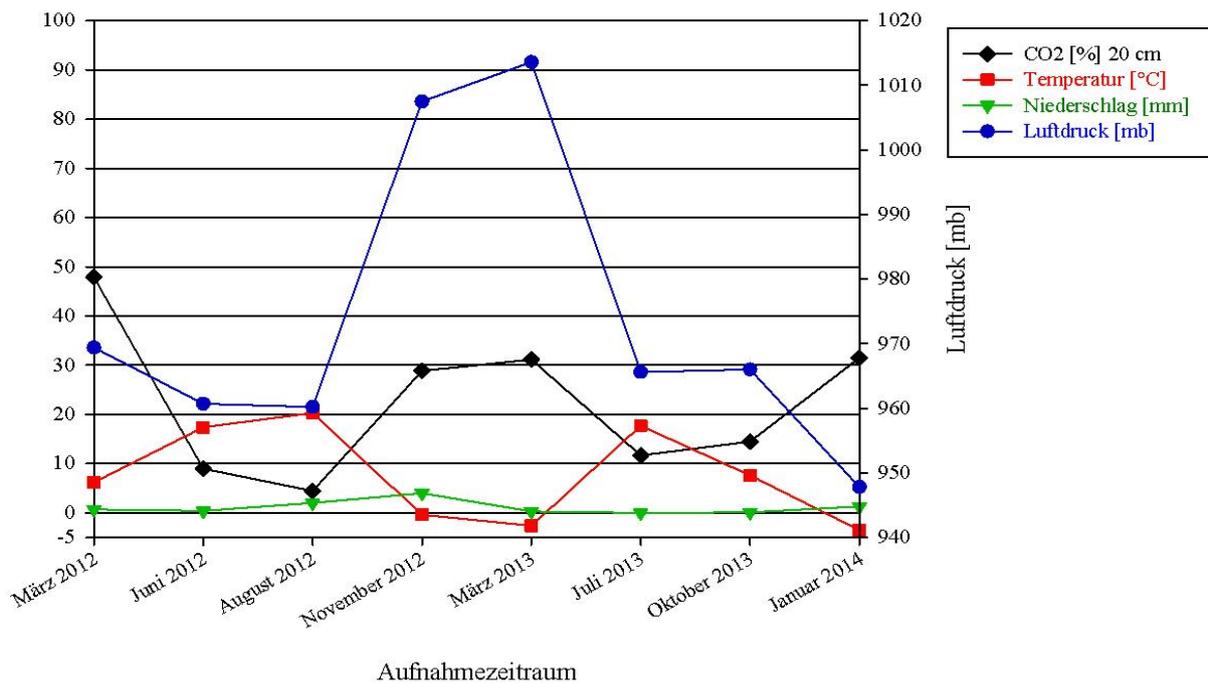


Abb. 51: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in der stabil gasenden Teilfläche der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind in Abb. 33 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Die Abb. 51 lässt eventuelle Abhängigkeiten des aufsteigenden Kohlendioxids von den Lufttemperaturen erkennen. In den Märzmonaten 2012 und 2013 sind die Lufttemperaturen niedrig, während sie in den Sommermonaten 2012 und 2013 hoch sind. Mit sinkenden Temperaturen fallen Anstiege der Kohlendioxidkonzentrationen zusammen, hingegen sinken die CO₂-Werte mit steigenden Temperaturen im Sommer. Die Wintermonate November 2012 und Januar 2014 bestätigen diese Beobachtung, ebenso die Kurvenverläufe im Oktober 2013. Diese Resultate könnten mit dem Temperatureffekt auf die Löslichkeit von Gasen im wässrigen Medium erklärt werden, denn die Temperatur des Bodenwassers folgt der Außentemperatur (Brown et al. 2011; Weinlich et al. 2013). Mit zunehmender Temperatur sinkt die Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser (Brown et al. 2011). Im Winter ist der Porenraum des Bodens nicht nur wassergesättigter; das Bodenwasser ist zudem kälter als in den Frühlings- und Sommermonaten (Scheffer und Schachtschabel 2010). Infolgedessen ist im Winter mehr CO₂ im Bodenwasser gelöst, wodurch höhere Konzentrationen gemessen werden können. Jedoch wird dieser Zusammenhang nicht durch andere Forschungsergebnisse bestätigt (Weinlich et al. 2013). Die Gegebenheit, dass die maximalen CO₂-Konzentrationen eines Jahres im Winter auftreten und die minimalen im Sommer, steht im Widerspruch zu den Resultaten von Weinlich et al. (2013). Durch Untersuchungen an wassergefüllten Mofetten im

Eger-Becken konnte festgestellt werden, dass die höchsten Kohlendioxidkonzentrationen im Sommer zu messen sind und im Winter die niedrigsten.

Weiterhin kann durch die Abb. 51 ausgeschlossen werden, dass das starke Absinken des CO₂ auf eine anhaltende Verdichtung der Diffusionswege zurückzuführen ist, als Folge des Schwarmbebenereignisses von 2011. Denn die Kohlendioxidkonzentrationen im März 2012 waren zunächst angestiegen.

Tab. 9: CO₂-Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen. Erläuterungen sind in Tab. 5 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Jahr	Monat	CO₂ 20 cm [%]	Temperatur [°C]	Luftdruck [mb]	Niederschlag [mm]
2012	März	47,9	6,2	969,4	0,7
2012	Juni	9,0	17,4	960,7	0,4
2012	August	4,4	20,4	960,2	2,0
2012	November	28,8	-0,4	1007,7	4,0
2013	März	31,2	-2,6	1013,6	0,3
2013	Juni	11,7	17,7	965,6	0,0
2013	Oktober	14,5	7,6	966,0	0,1
2014	Januar	31,5	3,5	947,8	1,3

Auswertung der jahreszeitlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 5/10, 6/10 und 7/9 mithilfe der drei Wetterparameter

Mithilfe der Abb. 52a-c sollen mögliche Wechselwirkungen zwischen den Wetterparametern und den Kohlendioxidkonzentrationen in 20 cm Bodentiefe der Messpunkte 5/10, 6/10 und 7/9 herausgestellt werden. Die Tab. 10 ermöglicht ergänzend einen Überblick über die Wetterverhältnisse zu den einzelnen Aufnahmezeiträumen in den Jahresläufen.

Die oben formulierten Schlussfolgerungen werden teilweise durch die Abb. 52 bestätigt, zugleich sind jedoch auch Abweichungen festzustellen.

An allen Messpunkten ist eine Abhängigkeit der CO₂-Exhalationen von den Temperaturen zu vermuten. Gleichzeitig sind Ausnahmen zu beobachten, zum Beispiel an Messpunkt 5/10 im März 2013. Bei dieser Messung sinken die CO₂-Konzentrationen trotz niedriger Temperaturen. Diese Abweichung ist wahrscheinlich mit dem zur gleichen Zeit hohen Luftdruck zu erklären.

An dem Messpunkt 6/10 ist die gleiche Ausnahme im März 2013 zu verzeichnen und im Oktober 2013. Bei diesen Messungen fallen sinkende CO₂-Werte mit niedrigen Temperaturen zusammen. Möglicherweise resultieren diese Ergebnisse auf der Verschließung von Diffusionswegen ausgelöst durch Erdbeben (Weinlich et al. 2013). Ebenfalls wären Auswirkungen des Luftdrucks zu vermuten, vor allem bei der Messung im März 2013.

Die Kurvenverläufe der Temperaturen und des Kohlendioxids an der Messstelle 7/9 hingegen sind mit denen in Abb. 51 vergleichbar.

Betrachtet man die Veränderungen der CO₂-Werte vor dem Hintergrund des Luftdruckes, werden die unlängst beschriebenen Beobachtungen bestätigt. Jedoch sind überwiegend in den Sommermonaten und teilweise in den Wintermonaten Abweichungen festzustellen, die allerdings mit Konkurrenzsituationen erklärt werden könnten. An allen drei Messpunkten steigen die CO₂-Konzentrationen im November 2012, trotz hohen Luftdruckes. Es ist sehr wahrscheinlich, dass zu diesen Zeitpunkten nicht der Luftdruck einen Einfluss auf das Kohlendioxid hatte, sondern entweder durch die jahreszeitlich bedingten niedrigen Temperaturen oder erhöhte Grundwasserspiegel begründet war. Des Weiteren wurden an allen Einzelpunkten in den Sommermonaten 2012 niedrige Kohlendioxidkonzentrationen gemessen und zugleich niedrige Luftdruck-Werte. Aufgrund niedriger Grundwasserspiegel im Sommer (Scheffer und Schachtschabel 2010) und fehlender starker Niederschläge, kann angenommen werden, dass in diesen Situationen die Lufttemperatur der entscheidende Wetterparameter war.

Wegen der geringen Variabilität in den Niederschlags-Werten, wird an dieser Stelle nicht auf die Abhängigkeit der CO₂-Veränderungen von diesem Wetterparameter eingegangen.

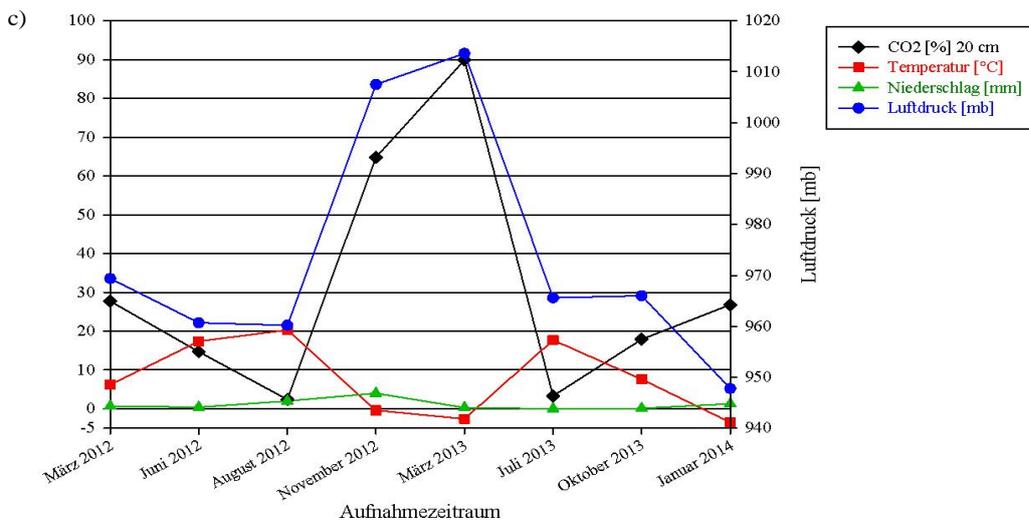
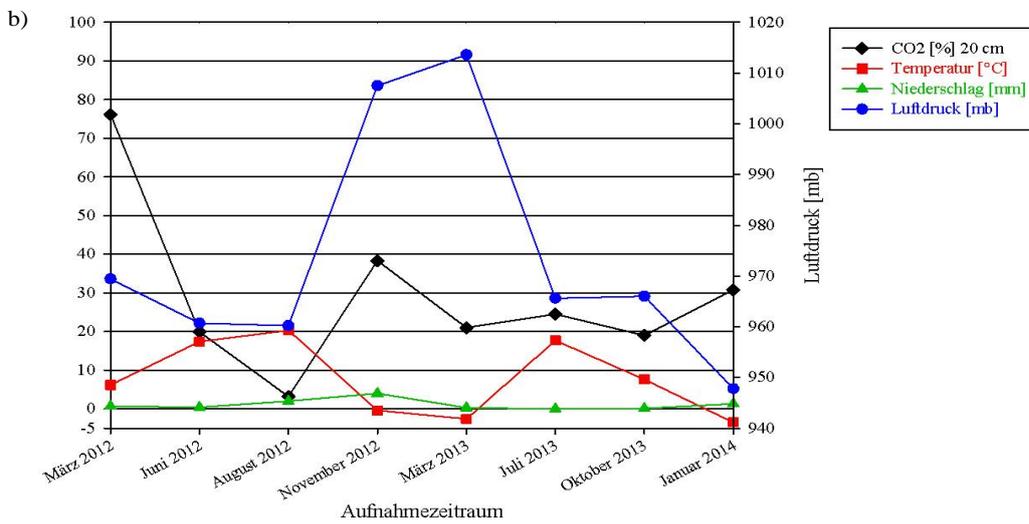
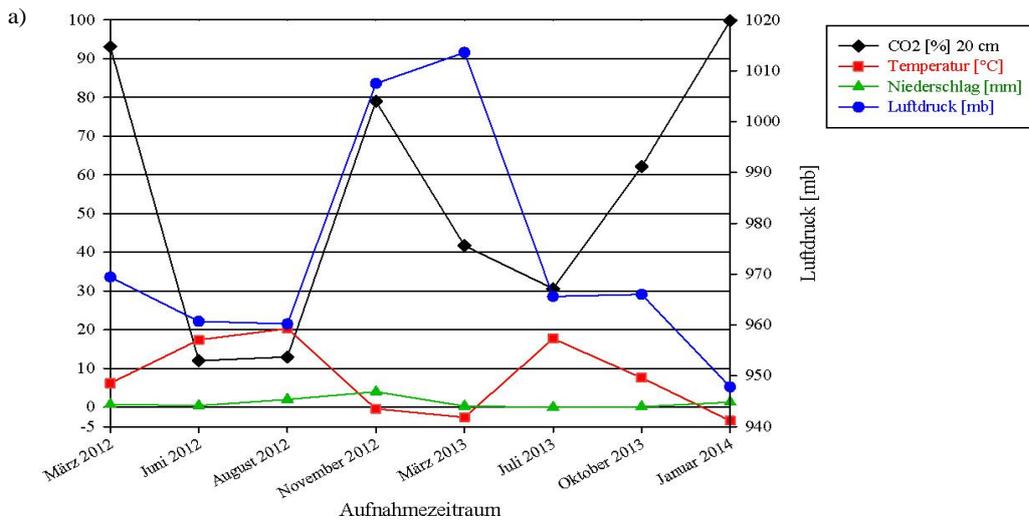


Abb. 52: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 5/10 (a), 6/10 (b) und 7/9 (c) der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Erklärungen sind der Abb. 33 zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Tab. 10: CO₂-Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe an den Messstellen 5/10, 6/10 und 7/9 in der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen. Weitere Erklärungen sind in Tab. 5 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Jahr	Monat	CO ₂ 20	CO ₂ 20	CO ₂ 20	Temperatur [°C]	Luftdruck [mb]	Niederschlag [mm]
		cm [%] 5/10	cm [%] 6/10	cm [%] 7/9			
2012	März	93,1	76,2	27,7	6,2	969,4	0,7
2012	Juni	12,0	19,9	14,7	17,4	960,7	0,4
2012	August	13,0	3,2	2,4	20,4	960,2	2,0
2012	November	79,0	38,3	64,8	-0,4	1007,7	4,0
2013	März	41,7	21,0	89,9	-2,6	1013,6	0,3
2013	Juni	30,6	24,5	3,3	17,7	965,6	0,0
2013	Oktober	62,1	19,0	17,9	7,6	966,0	0,1
2014	Januar	99,8	30,8	26,8	3,5	947,8	1,3

Im Weiteren werden noch zwei Überlegungen zu den flächigen Abb. 39-50 festgehalten:

1. Die festgestellten niedrigen, flächig auftretenden CO₂-Ausgasungen in 20 cm Bodentiefe, die im weiteren Jahreslauf wieder zurückgehen (Juni 2012 nach August 2012), können Folgen seismischer Aktivitäten oder der Erdzeiten sein (Kap. 3.1.2.1). Aufgrund der hohen Konzentrationen könnten Stoffwechselaktivitäten der Bodenlebewesen ausgeschlossen werden. Hinzu kommt, dass die Effekte der Bodenatmung auch noch im August festzustellen wären. Dieselbe Erklärung könnte generell für dieses Phänomen gelten, das auch in anderen Monaten in tieferen Bodenschichten auftritt. In diesem Zusammenhang wäre zusätzlich die Kenntnis über Veränderungen des Grundwasserspiegels hilfreich. In Kap. 3.1.2.1 wurde erklärt, dass eine plötzliche Anhebung des Grundwasserpegels zu einer verstärkten Ausströmung des Kohlendioxids durch horizontale Advektion sowie vertikale Konvektion führen kann. Auch wenn Koch et al. (2008) oder Gaždová et al. (2011) keine Auswirkungen des Grundwasserspiegels auf die Kohlendioxidkonzentrationen vermerkten, so wäre es dennoch aufschlussreich, ob sich verschiedene Konzentrationsveränderungen in der Birnenmofette mit Hilfe dieses Parameters erklären ließen.
2. Im Jahreslauf von März 2014 bis September 2014 stellt die Septembermessung eine Ausnahme dar. Vergleichbar mit den vorangegangenen beginnt der Jahreszyklus von 2014 ebenfalls mit höheren CO₂-Werten im März als im Juni. Im September allerdings steigen die Konzentrationen mit recht hohen Werten in der ganzen

Untersuchungsfläche an (Abb. 41, 44, 47 und 50). Auch wenn keine Wetterdaten für diesen Monat vorliegen, ist eher zu vermuten, dass die CO₂-Gehalte ähnlich gering sein müssten, wie im Spätsommer vorheriger Jahre. Aufgrund der Schwarmbeben im Juni 2014, mit maximalen Lokalbebenmagnituden von 4,5, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die erhöhten Konzentrationen eine Folge veränderter Gasbewegungen sind, beispielsweise hervorgerufen durch Permeabilitätsveränderungen im Störungssystem (Kap. 3.1.2.1).

Fazit

Die Abb. 39 bis 50 haben aufgedeckt, dass die CO₂-Konzentrationen jahreszeitenabhängig sind. Dieses Ergebnis konnte durch die mögliche Abhängigkeit der CO₂-Gehalte von verschiedenen Wetterparametern erklärt werden, die unterschiedliche Ausprägungen in den Jahreszeiten aufweisen. Die entscheidenden Wetterfaktoren könnten die Temperatur und der Luftdruck sein. Aufgrund der geringen Werteausprägung beim Niederschlag, stand dieser Wetterfaktor hinsichtlich der CO₂-Veränderungen im Hintergrund.

Auch bei der Auswertung der vierteljährlichen Ausgasungsveränderungen waren beide Vorgehensweisen hilfreich. Wiederholt konnten auf diese Weise die Resultate bestätigt werden.

Abschließend ist mithilfe der Abb. 39 bis 50 der Nachweis möglich, dass die vierteljährlichen Messungen keineswegs zu Veränderungen in den Konzentrationen führen. Auf Grund der Forschungstätigkeiten in der Birnenmofette könnte vermutet werden, dass die Gasmessungen Ausgasungsveränderungen auslösen. Wäre dies der Fall, würden stetig neue konstante Ausgasungsbereiche geschaffen. Oder an verschiedenen Messpunkten bestünde die Möglichkeit, dass sich hohe CO₂-Konzentrationen aufgrund erleichterter Diffusionswege nicht mehr ansammeln könnten. Der Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 lässt bestens erkennen, dass sich kurzzeitig lokale Ausgasungsstellen öffnen, sich aber auch wieder verschließen und in nachfolgenden Messungen nicht weiter festzustellen sind. Ferner würden an Messstellen, die bei einer Aufnahme niedrige Kohlendioxidkonzentrationen aufweisen, bei den anschließenden Messungen höhere Werte gemessen, und umgekehrt. Vodnik et al. (2006) kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die CO₂-Konzentrationen nicht durch wiederholte Bodenbohrungen beeinflusst werden.

3.1.3 Die Vegetation in der Birnenmofette

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über das Vorkommen der Pflanzen in der Birnenmofette im Zusammenhang mit den CO₂-Exhalationen. In dem west-tschechischen Untersuchungsgebiet gibt es verschiedene mofettentypische Zeigerarten. Diese wurden in zwei Gruppen unterteilt: Positive und negative Mofettenzeiger (Saßmannshausen 2010). Das bedeutet, dass alle Arten innerhalb dieser Gruppen ein übereinstimmendes synökologisches Verhalten gegenüber einem Standortfaktor (Frey und Lösch 2010), hier dem Kohlendioxid, zeigen. In dem Fall der positiven Mofettenzeiger ein positives Verhalten und im Falle der negativen Mofettenzeiger ein negatives Verhalten. Arten denen keine Zeigereigenschaft nachgewiesen werden konnte, wurden als mofettovag bezeichnet (Saßmannshausen 2010). Die positiven Mofettenzeiger werden, nach ihrer Verteilung in Bezug auf das Kohlendioxid, als mofettophil (CO₂-„liebend“) bezeichnet, während die negativen Mofettenzeiger das Adjektiv mofettophob (CO₂-„meidend“) erhalten.

Im Falle zu geringer Deckungsgrade werden nicht alle Zeigerarten dargestellt. Diese sind im Anhang zu finden. Gleichsam zu den vorherigen Kapiteln werden auch die Vegetationsabbildungen in Bezug auf die Kohlendioxidkonzentrationen in 40 cm Bodentiefe interpretiert. Die verwendete Skala der Deckungsgrade entspricht der Londo-Skala (Kap. 2.3.2).

3.1.3.1 Artenvielfalt und Stärke des pflanzlichen Bewuchses

Bei der Vegetationsaufnahme 2008 wurden in der Birnenmofette insgesamt 57 Gefäßpflanzenarten verzeichnet und acht Moose.

Die Abb. 53a zeigt, dass die Birnenmofette hinsichtlich ihres Artenreichtums zweigeteilt ist. Im Nordwesten bis zum Südwesten (Kap. 2.2) hat die Vegetationsdecke eine höhere Artenvielfalt als im Nordosten bis Südwesten, mit Werten von größtenteils acht Arten bis mehr als 17 Arten pro Aufnahmequadrat. Diese Zahlen sind höher als in dem anderen Teil der Fläche, in dem die Artenzahlen hauptsächlich bei vier bis acht liegen. Deutlich ausgeprägt sind Aufnahmequadrate im mittleren Bereich der untersuchten Fläche, der die Form eines Halbkreises aufweist. Dort sind zwischen zwölf und 17 Arten notiert worden. Betrachtet man die Abbildung nochmals vor dem Hintergrund der CO₂-Gehalte und ihrer Verteilung, ist zu erkennen, dass die höchsten Artenzahlen weder in den Kontrollbereichen noch in den Ausgasungszentren zu finden waren, sondern in den Übergangsbereichen zwischen erhöhten und stark erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen. Im Gegensatz dazu wurden die niedrigsten Artenspektren in den nicht-gasenden- oder Mofettenbereichen verzeichnet. Bis auf wenige

Ausnahmen ist diese Ausprägung offensichtlich, vor allem der halbkreisförmige Bereich bestärkt diese Annahme. Er grenzt sehr deutlich den Kontrollbereich von dem mittleren Exhalationszentrum ab. Im südöstlichen Ausgasungsbereich ist ein vergleichbarer Effekt festzustellen, wenn auch nicht mit der gleichen Prägnanz. Die artenarmen Aufnahmequadrate im Nordosten und in einem südöstlich nach Westen verlaufenden Teil des untersuchten Standortes, sind durch das Vorkommen einer mehr oder weniger reinen Monokultur aus wenigen Grasarten zu erklären, die in dieser Form nur in diesen Bereichen der Fläche zu finden ist. Weitere Aufnahmequadrate mit wenigen Artenzahlen sind ebenfalls durch die Bildung von Monokulturen verschiedener Arten gekennzeichnet.

In Abb. 53b ist der Gesamtdeckungsgrad des vollständigen Pflanzenbewuchses in der Krautschicht dargestellt. Es ist schnell ersichtlich, dass die Untersuchungsfläche durchgehend von einer starken Vegetationsdecke überzogen ist. Offensichtlich auch die Aufnahmequadrate die durch eine geringe Artenvielfalt gekennzeichnet sind, was auf die Bildung von Monokulturen hinweist. Ausnahmen sind im mittleren Bereich der Fläche einzuordnen, sowie im gesamten Süden und teilweise im Nordwesten (Kap. 2.2). Im Zusammenhang mit den Kohlendioxidkonzentrationen ist kein Muster in den Deckungsgraden festzustellen. Einzig im Südosten der Mofette ist zu beobachten, dass an den stark ausgasenden Stellen die Bedeckung des Bodens mit Pflanzen niedriger ist. Diese Beobachtung kann jedoch nicht für die gesamte Untersuchungsfläche gelten, denn unter dieser Prämisse können andere vegetationsfreie Aufnahmequadrate in den Kontrollbereichen nicht erklärt werden. Die weniger stark bedeckten Messstellen im Süden sind durch den bereits erwähnten Rohboden zu erklären (Kap. 3.1.1.4). Die Pedosphäre ist dort sehr grobporig; zusätzlich ist das Relief stark geneigt. Unter diesen Bedingungen sind das Pflanzenwachstum und die Ausbreitung der Pflanzen stark begrenzt. Hinzukommt eine teilweise sehr starke Beschattung durch Bäume (überwiegend *Pyrus pyraster* und *Quercus robur*) oder Sträucher (zum Beispiel *Crataegus monogyna*), wodurch ebenfalls die niedrigen Deckungsgrade im Südwesten, sowie im Norden der Fläche zustande kommen. Andere vegetationsarme Stellen sind beispielsweise durch Maulwurfshügel entstanden.

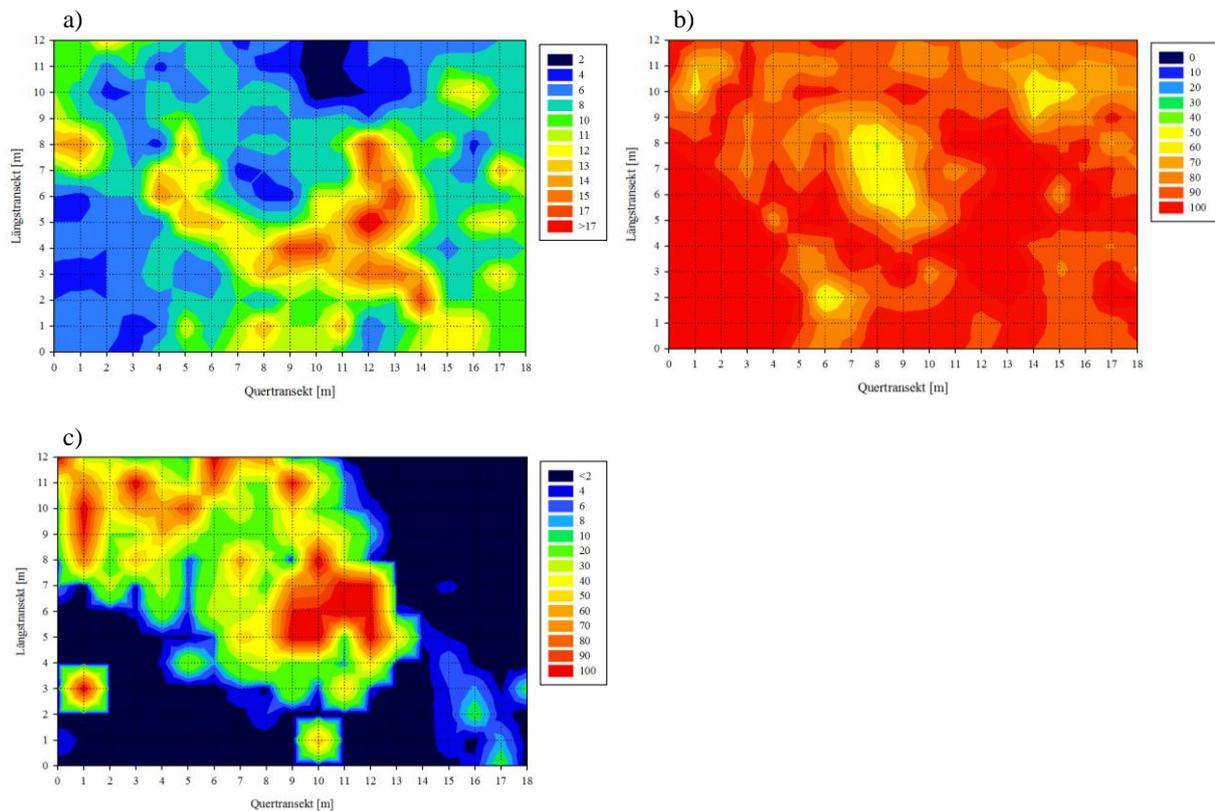


Abb. 53: Artenzahl (a), Gesamtdeckungsgrad [%] des Pflanzenbewuchses (b) pro Aufnahmequadrat und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c) der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Die Abhängigkeiten zwischen den Artenzahlen, dem Gesamtdeckungsgrad und dem Mofettengas wurden statistisch überprüft. Die Artenzahlen korrelieren nicht mit den CO₂-Gehalten. Das ist folgerichtig, denn wie oben festgestellt wurde, ist das breitere Artenspektrum nicht an das Kohlendioxid gebunden. Die Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Gesamtdeckungsgrad und den Kohlendioxidkonzentrationen zeigen konstant schwach negative Korrelationen an. Dieses Resultat wird auch bei Vodnik et al. (2009) oder Saßmannshausen (2010) erzielt. Bei Vodnik et al. (2009) wird der fehlende Zusammenhang auf eine mögliche Ungenauigkeit der Schätzung zurückgeführt. In der Birnenmofette ist die Vegetationsdecke konstant stark mit 100% Gesamtdeckung. Vereinzelt Aufnahmequadrate sind nur zu 75 bis 90% durch Pflanzen bedeckt. Im Norden und Südwesten sind zwei Stellen vorhanden die nur zur Hälfte (40 bis 55%) von Pflanzen überzogen werden. Die spärliche Vegetationsdecke in diesen Aufnahmequadraten steht nicht mit den CO₂-Konzentrationen im Zusammenhang. Dort wird die Fläche von Gehölzen beschattet, wie zu Beispiel *Pyrus pyraster*, *Betula pendula* und *Alnus glutinosa*.

Fazit

Die Interpretation der Artenzahlen und der Gesamtdeckungsgrade mündet in der Feststellung, dass der pflanzliche Bewuchs in der Birnenmofette trotz der CO₂-Exhalationen artenreich ist. Zusätzlich wurde die Bildung von fast reinen Monokulturen herausgestellt. Weiterhin kann vermerkt werden, dass die Pflanzendecke durchgehend stark ausgeprägt ist. Die vereinzelt Ausnahmen sind auf tierische Aktivitäten oder die Auswirkungen der Baumschicht auf die Krautschicht zurückzuführen.

3.1.3.2 Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Zeigergruppe, sowie der Gruppe der mofettovagen Arten in der Birnenmofette

Im Folgenden werden die Deckungsgrade der Indikatorgruppen vorgestellt. Als bedingender Einflussparameter auf die Vegetation wird zusätzlich die Kohlendioxidkonzentration in 40 cm Bodentiefe abgebildet. Das Gas ist für die Erforschung der Vegetation beziehungsweise ihrer Zusammensetzung und ihrer speziellen Eigenschaften auf Mofettenstandorten von vordergründigem Interesse. Die Tab. 11 ergänzt eine Übersicht über alle gefundenen Pflanzenarten die als Indikatoren bestimmt wurden.

In Abb. 54 ist die Verteilung der positiven und negativen Mofettenzeiger, sowie der mofettovagen Pflanzenarten dargestellt. Abgebildet wird der Gesamtdeckungsgrad der Indikatorgruppen pro Aufnahmequadrat.

Die Abb. 54a zeigt mit starker Prägnanz eine Deckungsgleichheit der Verteilung der positiven Zeigerarten mit den CO₂-Konzentrationen (Abb. 54d). In den CO₂-Ausgasungsbereichen sind die höchsten Deckungsgrade der mofettophilen Pflanzenarten zu finden. Dort bedeckt die mofettophile Vegetation die Fläche mit 40 bis 100%. In den Übergangsquadraten werden hingegen nur noch Werte von 20 bis 2% erreicht. Schwach- bis nicht-gasende Bereiche folglich die südwestlichen und nordöstlichen Teile der Birnenmofette sind mit weniger als 2% positiver Mofettenzeiger überzogen. Abweichungen sind im Nordwesten zu verzeichnen sowie vereinzelt im Norden und Nordosten (Kap. 2.2). Die Ausnahmen im Norden und Nordwesten könnten durch die Datenaufarbeitung (Kap. 2.5.1.1) entstanden sein, welche dann in den Abbildungen als Verschiebung in Erscheinung tritt.

Tab. 11: Indikatorarten in der Birnenmofette im Aufnahmejahr 2008.

positive Mofettenzeiger	negative Mofettenzeiger
<i>Calluna vulgaris</i> (L.)- Heidekraut	<i>Agrostis capillaris</i> (L.)- Rotes Straußgras
<i>Festuca ovina</i> (L.)- Schafschwingel	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.)- Wiesenkerbel
<i>Hieracium lachenalii</i> (Gmel.) - Gemeines Habichtskraut	<i>Brachythecium salebrosum</i> (Web. und Mohr.)- Glattstieliges Kurzbüchsenmoos
<i>Hieracium pilosella</i> (L.) - Mausohr-Habichtskraut	<i>Cirsium arvense</i> (L.)- Acker-Kratzdistel
<i>Luzula campestris</i> (L.)- Feld-Hainsimse	<i>Elymus repens</i> (L.)- Gemeine Quecke
<i>Nardus stricta</i> (L.)- Borstgras	<i>Galium aparine</i> (L.)- Klebkraut
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) - Rotstängelmoos	<i>Linaria vulgaris</i> (Mill.) - Gewöhnliches Leinkraut
<i>Pohlia nutans</i> (Hedw.) - Nickendes Pohlmoos	<i>Phalaris arundinacea</i> (L.)- Rohr-Glanzgras
<i>Rumex acetosella</i> (L.) - Kleiner Sauerampfer	<i>Polygonum bistorta</i> (L.)- Schlangenknöterich
	<i>Populus tremula</i> (L.)- Zitterpappel
	<i>Urtica dioica</i> (L.)- Große Brennnessel
	<i>Veronica chamaedrys</i> (L.) - Gamander Ehrenpreis

Konsequenterweise sind die negativen Mofettenzeiger hinsichtlich der Ausgasungen nahezu invers auf der Fläche verteilt (Abb. 54b). In den Exhalationsbereichen werden die Aufnahmequadrate überhaupt nicht von mofettophoben Arten bedeckt und die Randbereiche der Ausgasungsstellen mit höchstens 6 bis 8%. In den Kontrollquadraten sind dann hohe Deckungsgrade der negativen Indikatorarten aufgezeichnet worden, mit Werten von überwiegend 10 bis 40% und vereinzelt 70%. Wie bereits bei den positiven Mofettenzeigern gibt es auch in dem Vorkommen der negativen Mofettenzeiger, Ausnahmen. Im Nordosten tritt eine punktuell gasende Stelle in Erscheinung die in 40 cm Tiefe eine CO₂-Konzentration von 100% aufweist. Dennoch fällt der Rückzug der mofettophilen Arten von dieser Stelle nicht dermaßen massiv aus, wie er in den Ausgasungszentren zu beobachten ist. Das gleiche gilt für eine kleinflächige CO₂-Exhalation im Norden der Fläche. Diese beiden Ausnahmen, von dem ansonsten deutlichen Verteilungsmuster der negativen Indikatorarten, können durch folgende Gründe entstanden sein:

- ❖ Die Wurzeln der dort wachsenden mofettophilen Pflanzenarten dringen nicht tief in den Boden ein.
- ❖ Das Kohlendioxid diffundiert an diesen Messstellen sehr schlecht durch den Porenraum der Pedosphäre.
- ❖ Das Auftreten der isolierten Kohlendioxid-Exhalationen war ein einmaliges Ereignis, und durch die Kurzlebigkeit für die dort wachsende Vegetation nicht, oder nur von kurzfristiger Bedeutung.

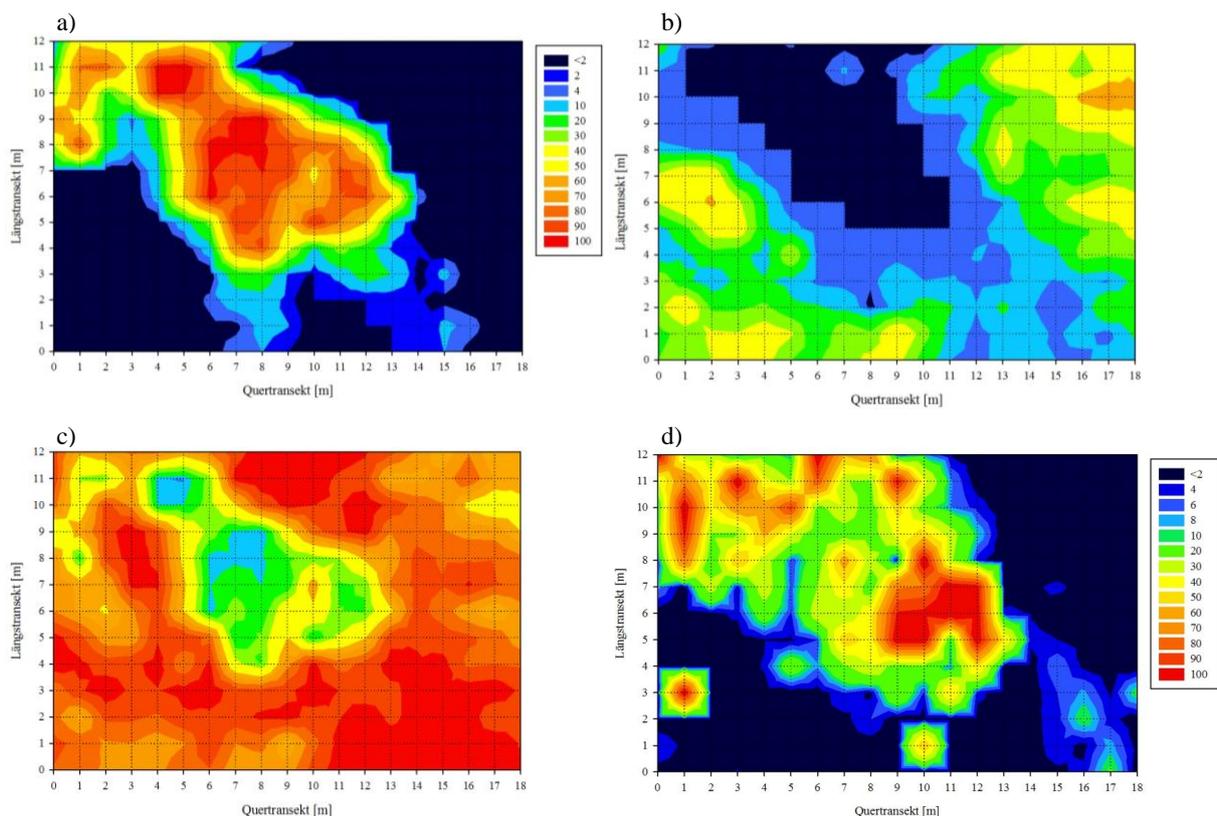


Abb. 54: Deckungsgrad [%] der positiven Mofettanzeiger (a), der negativen Mofettanzeiger (b) und der mofettovagen Arten (c) pro Aufnahmequadrat, im Vergleich mit der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Bei den jährlichen CO₂-Veränderungen (Kap. 3.1.2.1) ist festzustellen, dass beide gasenden Punkte einmalig vorkamen und erst ab einer Bodentiefe von 40 cm hohe Konzentrationen erreichten. In den obersten Messtiefen waren die Werte entweder unterhalb von 2%, oder geringfügig darüber. Die unteren zwei Punkte der oben aufgeführten Erklärungsansätze sind demnach für die Abweichungen zutreffend. Aus diesen Gründen hatte das Mofettengas keine Auswirkungen auf die Pflanzen.

In Abb. 54c sind die Deckungsgrade der Pflanzen dargestellt denen keine Indikatoreigenschaft hinsichtlich des CO₂ nachgewiesen werden konnte (Saßmannshausen

2010). Diese Gruppe beinhaltet alle gefundenen Pflanzen einer Aufnahme aber eben exklusive der Indikatorarten. Wie bereits erwähnt, werden sie als mofettovag bezeichnet. Anhand der Abbildung werden folgende Beobachtungen festgehalten:

- ❖ Mit starker Deutlichkeit ergeben die Verteilung und das Vorkommen der mofettovagen Arten ein genaues Spiegelbild der positiven Indikatorarten. Das betrifft vor allem den Verteilungsbereich der mofettophilen Arten mit den höchsten Deckungsgraden. In diesen Aufnahmequadraten sind mofettovage Arten notiert worden, und zwar mit Deckungsgraden von 20 bis 50%.
- ❖ Im Südwesten und Nordosten der Birnenmofette, wo die negativen Mofettenzeiger ihre primären Verbreitungsareale haben, bedecken die mofettovagen Pflanzenarten die Aufnahmequadrate mit 40 bis 60%. Dadurch ergibt sich auch vor diesem Hintergrund, im Vergleich zu den mofettophoben Arten, ein inverses Verteilungsmuster dieser Pflanzen.
- ❖ In den Aufnahmequadraten der Übergangsbereiche sind die Deckungsgrade der mofettovagen Arten am höchsten. In den nordwestlichen Aufnahmequadraten wurden sowohl für die mofettophilen als auch für die mofettophoben Pflanzenarten niedrige Deckungsgrade (8%) verzeichnet.

Eine statistische Überprüfung der Bindung der drei Pflanzengruppen an das Bodengas ergab folgende Ergebnisse:

Tab. 12: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] pro Aufnahmequadrat in der Birnenmofette. Die Deckungsgrade sind die Rohwerte der Aufnahme, die CO₂-Werte sind Mittelwerte. (Datenerhebung 2008)

	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
positive Mofettenzeiger	0,70	0,70	0,69	0,62
negative Mofettenzeiger	-0,46	-0,49	-0,52	-0,49
mofettovage Pflanzenarten	-0,57	-0,56	-0,53	-0,46

Die Korrelationskoeffizienten für die positiven Mofettenzeiger lassen auf eine schwache Korrelation in allen Bodentiefen schließen (Tab. 12). Saßmannshausen (2010) stellt einen engen statistischen Zusammenhang zwischen den CO₂-Gehalten und der Verteilung der positiven Indikatorarten fest. Zudem jedoch eine leichte Abnahme der Korrelation mit zunehmender Bodentiefe. Dies wird nochmals anhand Tab. 12 bekräftigt. Die Korrelation der negativen Zeiger mit den CO₂-Gehalten ist in allen Messtiefen schwächer, wobei sie mit

steigender Tiefe zunimmt. Das scheint logisch, da sich die CO₂-Konzentrationen in den tieferen Schichten des Bodens erhöhen. Demgegenüber ist der Zusammenhang zwischen den mofettovagen Pflanzenarten und Gaskonzentrationen stärker. Die Korrelationskoeffizienten sind zwar durchgehend schwach, allerdings sind die Werte im Gegensatz zu denen der mofettophoben Arten höher. Zusätzlich ist eine leichte Abnahme des Zusammenhangs mit zunehmender Bodentiefe festzustellen.

Gruppencharakteristisches ökologisches Verhalten der Indikatorgruppen und der mofettovagen Arten nach Ellenberg

Die Diskussion der oben beschriebenen Verteilungsmuster der Indikatorgruppen und den mofettovagen Pflanzenarten stützt sich neben der Bodengaszusammensetzung auch auf die ökologischen Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001) (Tab. 13-15).

Die Lichtzahl (L) als ökologischer Zeigerwert ermöglicht einen Hinweis darauf, welche Beleuchtungsstärke für eine Pflanzenart für die Gewährleistung eines guten Wachstums von Nöten ist. Alle Pflanzen benötigen dafür volles oder spärliches Tageslicht. Es existieren dennoch Pflanzen, deren Stoffwechselaktivitäten durch eine minimale Minderung der Beleuchtungsstärke eingeschränkt werden (Heliophyten). Gleichwohl gibt es Arten die Eigenschaften besitzen, die ihnen das Wachsen unter geringen Beleuchtungsstärken vereinfachen (Skiadophyten). Die Beleuchtungsstärke die für die Pflanzen maßgebend ist wird unter folgenden Prämissen gemessen: 1) Die sommergrünen Pflanzen sind vollständig belaubt, womit der Zeitraum Juli bis September zu berücksichtigen ist, 2) während der Messungen herrschte diffuses Licht (Ellenberg et al. 2001).

Die Temperaturzahl (T) bezieht sich nicht auf einen Temperaturwert, sondern auf den Wuchsstandort einer Pflanze in einem Areal. Entscheidend für Temperaturunterschiede sind die Höhengrenzen der Gebirge, sowie die Nordgrenze in Europa (Ellenberg et al. 2001).

Nach der Feuchtezahl (F) richtet sich das „*Vorkommen im Gefälle der Bodenfeuchtigkeit vom flachgründig-trockenen Felshang bis zum Sumpfboden sowie vom seichten bis zum tiefen Wasser*“ (Ellenberg et al. 2001). Hinsichtlich des Feuchtegehaltes ist die Spannbreite unter den aufgenommenen Arten breiter als bei den bisherigen ökologischen Zeigerwerten.

Die Reaktionszahl (R) gibt an ob Pflanzen vorzugsweise auf sauren, neutralen oder alkalischen Böden vorkommen. Die meisten höheren Pflanzen zeigen eine starke Reaktion hinsichtlich des pH-Wertes. „... *bei diesem Faktor engen Konkurrenten den Lebensbereich der Natur so weit ein, daß man das ökologische Verhalten vieler Arten mit Reaktionszahlen (R) bewerten kann*“ (Ellenberg et al. 2001).

Nach der Stickstoffzahl (N) richtet sich das Auftreten von Pflanzenarten nach „... der Mineralstickstoffversorgung während der Vegetationszeit“ (Ellenberg et al. 2001).

Nach den Zeigerwerten in Tab. 13 zu schließen, weist die Gruppe der positiven Mofettenzeiger ein gruppenspezifisches ökologisches Verhalten auf. Im Bezug auf das Bodenwasser, die Bodenazidität und die Stickstoffgehalte ist das Verhalten der Arten am ähnlichsten. Die meisten von ihnen sind Trocknis- bis Frischzeiger, Starksäure- bis Säurezeiger, und Stickstoffmangelzeiger. Zudem benötigt der größte Teil der Arten eine relative Beleuchtungsstärke von mehr als 30%. Ausnahmen sind *Hieracium lachenalii* und *Pohlia nutans*. Für die Temperaturzahl kann aufgrund fehlender Angaben keine klare Aussage getroffen werden.

Tab. 13: Übersicht über die Zeigerwerte für die positiven Mofettenzeiger in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001). L=Lichtzahl, T=Temperaturzahl, F=Feuchtezahl, R=Reaktionszahl, N=Stickstoffzahl, k. A.=keine Angabe, x=indifferentes Verhalten der Pflanze gegenüber dem Zeigerwert. (Datenerhebung 2008)

positive Mofettenzeiger	L	T	F	R	N
<i>Calluna vulgaris</i>	8	x	x	1	1
<i>Festuca ovina</i>	7	x	x	3	1
<i>Hieracium lachenalii</i>	5	5	4	4	2
<i>Hieracium pilosella</i>	7	x	4	x	2
<i>Luzula campestris</i>	7	x	4	3	3
<i>Nardus stricta</i>	8	x	x	2	2
<i>Pleurozium schreberi</i>	6	3	4	2	k. A.
<i>Pohlia nutans</i>	5	x	4	2	k. A.
<i>Rumex acetosella</i>	8	5	3	2	2

Bei den negativen Zeigerarten ist ebenfalls ein gruppencharakteristisches Verhalten festzustellen. Im Vergleich zu den positiven Zeigerarten ist das Spektrum der Zeigerwerte jedoch größer. Ein gleiches Verhalten der Arten ist bezüglich der Beleuchtungsstärke, des pH-Wertes und des Stickstoffgehaltes zu verzeichnen. Die meisten von ihnen sind Heliophyten und benötigen für das Wachstum mindestens eine relative Beleuchtungsstärke von 30%. Der überwiegende Teil der negativen Indikatorarten bevorzugt mäßig- bis schwachsaure, frische bis gut durchfeuchtete, sowie mäßig- bis stickstoffreiche Böden. Des Weiteren sind sie Mäßigwärmezeiger.

Als Folge der Größe der mofettovagen Gruppe werden an dieser Stelle Arten in die Diskussion einbezogen die auf der Birnenmofette eine starke Präsenz aufweisen. Die ausgewählten Arten zeigen ein ähnliches ökologisches Verhalten gegenüber der Beleuchtungsstärke, der Bodenfeuchte, und der Stickstoffverfügbarkeit. Sie sind überwiegend als Feuchte- und Stickstoffmangelzeiger einzustufen, sowie als Halblichtpflanzen. Über das Wachstum der fünf mofettovagen Arten in Abhängigkeit von der Temperaturzahl und der Bodenazidität kann keine Aussage getroffen werden, da die meisten in ihrem Verhalten indifferent sind.

Tab. 14: Übersicht über die Zeigerwerte für die negativen Mofettenzeiger in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001). Das Symbol ,~' zeigt an, dass die Pflanze starke Wechsel des Bodenwassers ertragen kann. Weitere Erklärungen sind in Tab. 13 zu finden. (Datenerhebung 2008)

negative Mofettenzeiger	L	T	F	R	N
<i>Agrostis capillaris</i>	7	x	x	4	4
<i>Anthriscus sylvestris</i>	7	x	5	x	8
<i>Brachythecium salebrosum</i>	6	4	4	6	k. A.
<i>Cirsium arvense</i>	8	5	x	x	7
<i>Elymus repens</i>	7	6	x	x	7
<i>Galium aparine</i>	7	6	x	6	8
<i>Linaria vulgaris</i>	8	6	4	7	5
<i>Phalaris arundinacea</i>	7	5	8	7	7
<i>Polygonum bistorta</i>	7	4	7	5	5
<i>Populus tremula</i>	6	5	5	x	x
<i>Urtica dioica</i>	x	x	6	7	9
<i>Veronica chamaedrys</i>	6	x	5	x	x

Tab. 15: Übersicht über die Zeigerwerte für verschiedene mofettovage Arten in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001). Weitere Erklärungen sind den Tab. 13 und 14 zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

mofettovage Pflanzenarten	L	T	F	R	N
<i>Alopecurus pratensis</i>	6	x	6	6	7
<i>Carex nigra</i>	8	x	8~	3	2
<i>Deschampsia cespitosa</i>	6	x	7~	x	3
<i>Potentilla erecta</i>	6	x	x	x	2
<i>Succisa pratensis</i>	7	5	7	x	2

Fazit

Aus der Diskussion der Verbreitung der positiven und negativen Mofettenzeiger, sowie der mofettovagen Pflanzenarten, sind verschiedene Schlussfolgerungen abzuleiten:

- ❖ Hinsichtlich der Licht- und Temperaturzahl zeigen die meisten Arten ein gleiches ökologisches Verhalten. Aufgrund eines fehlenden Gradienten von unbeschatteten in beschattete Bereiche der Untersuchungsfläche hat die Lichtzahl auf einer derartig kleinen Fläche keine Aussagekraft. Die Temperaturzahl steht vor dem Hintergrund arealgeographischer Grundlagen (Ellenberg et al. 2001), wodurch sie auf lokal begrenzten Standorten als ökologischer Zeigerwert in den Hintergrund tritt (Saßmannshausen 2010).
- ❖ Die Arten innerhalb einer Indikatorgruppe haben vergleichbare ökologische Zeigerwerte vor allem hinsichtlich der Reaktions- und Stickstoffzahlzahl, die zum Teil mit den Kohlendioxidkonzentrationen in Verbindung gebracht werden können (Kap. 3.1.1). Unter diesen Voraussetzungen bilden sich in Mofetten azonale Vegetationszusammensetzungen um die Exhalationsbereiche aus, die durch azidophile Pflanzen gekennzeichnet sind (Selvi und Bettarini 1999; Pfanz et al. 2008a).
- ❖ Die Standortanforderungen der Pflanzen in der mofettovagen Gruppe sind entweder mit denen der mofettophilen Arten vergleichbar oder mit denen der mofettophoben. Dieser Sachverhalt macht sie zu einer spannenden Gruppe, die weiterhin Gegenstand detaillierter Beobachtungen sein sollte. Diese Pflanzenarten stellen das Bindeglied zwischen den mofettophilen und mofettophoben Zeigern dar, da sie hauptsächlich die Übergangsbereiche zwischen den Mofetten- und Kontrollbereichen bevorzugen. Ihre Auffächerung nach einem Kohlendioxidgradienten könnte in einer Kohlendioxid- oder Sauerstoffzahl für das west-tschechische Mofettengebiet münden.
- ❖ Ellenberg et al. (2001) macht deutlich darauf aufmerksam, dass die Zeigerwerte einen Eindruck über das ökologische Verhalten einer Art unter Konkurrenzdruck ermöglichen, jedoch nicht aussagekräftig bezüglich des physiologischen Anspruches einer Pflanze sind. Dieser Sachverhalt ist an mehreren Arten festzustellen, wie zum Beispiel bei *Calluna vulgaris*, *Pleurozium schreberi* oder *Carex nigra*. Durch ihre speziellen Anpassungen an ihre natürlichen Standorte, haben diese Arten auf Mofettenböden unter Konkurrenzdruck einen Vorteil.

3.1.3.3 Das ökologische Verhalten der positiven Mofettenzeiger

Calluna vulgaris

Calluna vulgaris (Abb. 55) ist ein immergrüner Zwergstrauch aus der Familie der Ericaceae, der ein breites Spektrum an belichteten Standorten besiedelt, sowohl kollin als auch alpin (Baltisberger et al. 1997). Die Pflanzen sind auf Heiden oder Mooren genauso häufig zu finden wie in Silikatfelsen, auf Magerrasen sowie Küstenheiden. Ihr Hauptverbreitungsgebiet ist Europa, inzwischen aber auch Nordamerika oder Neuseeland. Das Heidekraut ist ein Rohhumuslieferant (Düll und Kutzelnigg 2011) und trägt durch diese Eigenschaft zur Bodenversauerung bei (Klötzli et al. 2010).

Auf der Birnenmofette ist diese positive Zeigerart überwiegend in dem Ausgasungsbereich im mittleren Teil der Fläche gefunden worden, mit einer Ausbreitungstendenz nach Südosten (Kap. 2.2). Die prozentualen Deckungsgrade betragen bis 50%, in den Aufnahmequadraten. Es fällt auf, dass das Heidekraut in dem zweiten südöstlichen Ausgasungsschwerpunkt kaum wächst.

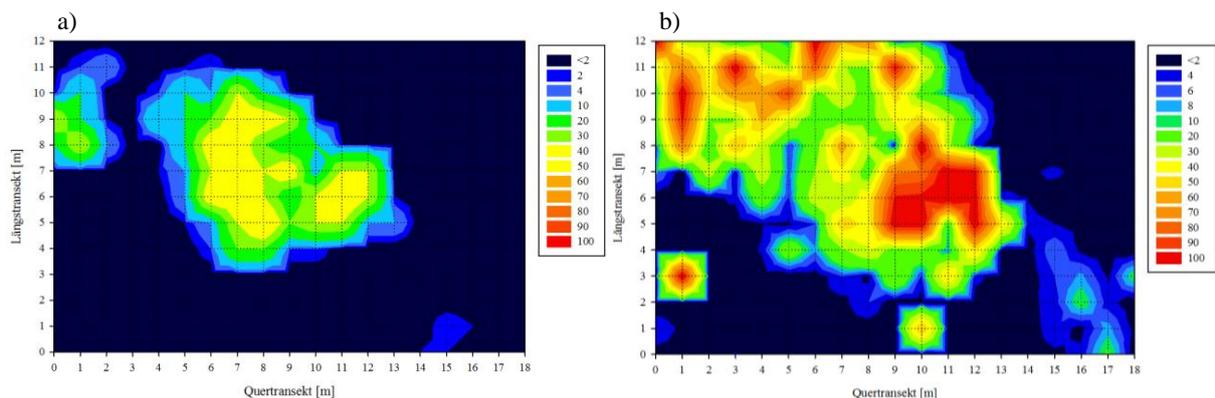


Abb. 55: Deckungsgrad [%] von *Calluna vulgaris* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Eine Überprüfung des statistischen Zusammenhangs zwischen der prozentualen Bedeckung der Birnenmofette mit Heidekraut und den Kohlendioxidkonzentrationen ergab eine durchgehend schwache Korrelation (Tab. 16). Die Korrelation nahm mit zunehmender Bodentiefe ab.

Die Abnahme der Korrelation im Bezug auf das Kohlendioxid könnte mit der Durchwurzelungstiefe des Heidekrautes erklärt werden. Nach Pfanzen et al. (2004) ist ein verkürztes Wurzelwachstum, als Folge des Sauerstoffmangels, häufig an natürlichen CO₂-Exhalationen zu finden. Zusätzlich haben Selvi und Bettarini (1999) bei Messungen in geothermalen Biotopen in Italien ein oberflächennahes Wurzelsystem bei *Calluna vulgaris*

festgestellt. Es wäre demnach möglich, dass die Wurzeln von *Calluna vulgaris* in der Birnenmofette verkürzt sind und den Boden ausschließlich in den obersten Bodentiefen durchwurzeln. Auf diese Weise kann eine Übersäuerung der Wurzeln als Folge hypoxischer Bedingungen verhindert werden.

Tab. 16: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Calluna vulgaris* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Für die Auswertung mit den CO₂-Werten wurde ein Mittelwert für jedes Aufnahmequadrat in allen Messtiefen gebildet. Aufgrund der Bodenprobengewinnung steht für die anderen Bodenparameter nur ein Wert in 10 cm Bodentiefe zur Verfügung (k. A.) (Kap. 2.3.3). (Datenerhebung 2008)

<i>Calluna vulgaris</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,53	0,53	0,50	0,44
pH	-0,35	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,06	k. A.	k. A.	k. A.

Den Zeigerwerten (Tab. 13) ist zu entnehmen, dass das Heidekraut eine Volllichtpflanze ist, die in ihrem Verhalten gegenüber der Temperatur und der Bodenfeuchte indifferent ist. Des Weiteren ist diese Pflanze eine wichtige Indikatorart für den pH-Wert des Bodens, denn sie ist ein Starksäurezeiger, und gleichzeitig zeigt sie Nährstoffarmut im Boden an (Baltisberger et al. 1997; Klötzli et al. 2010). Zusätzlich ist sie eine Klassencharakterart der *Nardo-Callunetea*, somit der Borstgras- und Zwergstrauchheiden (Ellenberg et al. 2001). Nach Saßmannshausen (2010) ist diese Klasse häufig im Mofettengebiet des west-tschechischen Plesnátales zu beobachten.

Es besteht eine schwach negative Korrelation zwischen dem pH-Wert des Bodens und dem Deckungsgrad des Heidekrautes, jedoch keine im Zusammenhang mit dem Bodenwasser (Tab. 16). Aufgrund des indifferenten Verhaltens des Heidekrautes gegenüber dem Feuchtegehalt des Bodens ist die fehlende Abhängigkeit zu erklären. Die Stickstoffgehalte haben ebenfalls keinen Einfluss auf die Ausbreitung von *Calluna vulgaris*.

Weiter oben wurde bereits festgestellt, dass die positive Indikatorgruppe eine bessere Verträglichkeit gegenüber der Bodenversauerung aufweist, als die negativen Zeiger. Dadurch haben sie einen Konkurrenzvorteil auf sauren Mofettenböden. Folgerichtig verdrängt *Calluna vulgaris* als Starksäure- und Magerkeitszeiger, konkurrenzschwächere Pflanzenarten von den Exhalationsbereichen, in die Rand- oder Kontrollbereiche. Gleichzeitig wird sie selber aus den nicht-gasenden Teilen der Fläche verdrängt, obwohl diese ebenfalls niedrige pH-Werte aufweisen. Die Verdrängung des Heidekrautes wird durch die mofettophoben und mofettovagen Arten vorgenommen, die beispielsweise durch ihre höhere Verträglichkeit

gegenüber der Bodenfeuchte in den betreffenden Aufnahmequadraten konkurrenzstärker sind (Saßmannshausen 2010).

Festuca ovina

In Abb. 56a sind die Verteilung und das Vorkommen des Schafschwingels in der Birnenmofette abgebildet. *Festuca ovina* ist ein polsterbildendes Horstgras (Poaceae). Es wächst bevorzugt auf Magerrasen aber auch in Felsspalten, sowie lichten Wäldern (Conert 2000). Die Böden der von *Festuca ovina* bedeckten Wuchsorte sind zumeist sauer, trocken, sandig, schwach humos und nährstoffarm (Kutschera und Lichtenegger 1982; Düll und Kutzelnigg 2011) Das Verbreitungsgebiet des Schafschwingels liegt in Europa und Asien. Nach dem Absterben verbleiben die Blätter am Halm, was zu einer Ummantelung der Pflanze aus abgestorbenen Blättern führt. Auf diese Weise ist sie vor Austrocknung geschützt (Düll und Kutzelnigg 2011).

Aus der Abb. 56a kann folgendes Verteilungsmuster von *Festuca ovina* in der Birnenmofette entnommen werden: Der Schafschwingel wächst konzentrisch um das in der Mitte der Fläche befindliche Ausgasungszentrum, mit Deckungsgraden zwischen 4 und 50%. Zusätzlich kommt es im südöstlichen Bereich vor (Kap. 2.2). In den Kontrollbereichen ist der Schafschwingel nicht zu finden.

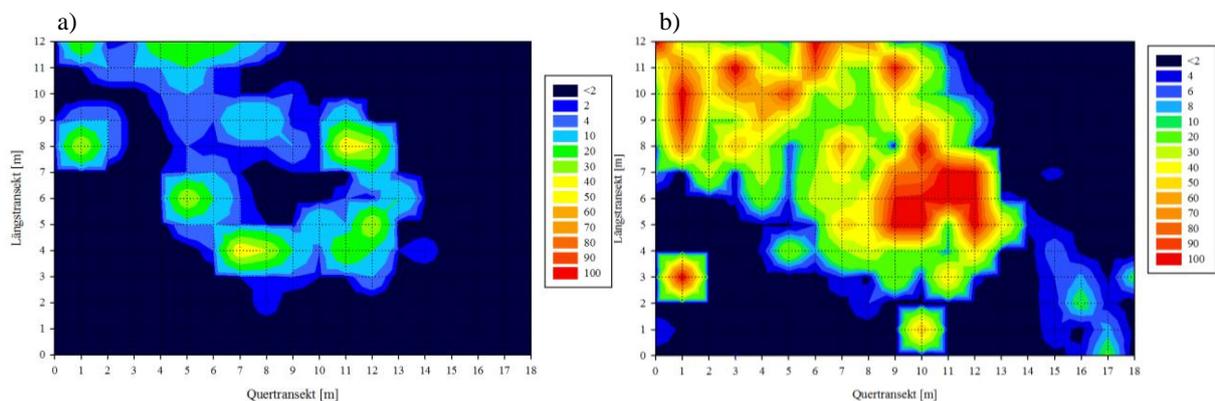


Abb. 56: Deckungsgrad [%] von *Festuca ovina* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Die Korrelationsanalyse (Tab. 17) führt zu durchgehend fehlenden Korrelationen bei allen analysierten Zusammenhängen. Das gleiche trifft auch auf eine Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt zu.

Tab. 17: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Festuca ovina* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Festuca ovina</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,19	0,23	0,22	0,20
pH	-0,08	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,26	k. A.	k. A.	k. A.

Die niedrigen Korrelationskoeffizienten können eine Folge der insgesamt niedrigen Deckungsgrade des Grasses sein.

Weiter oben sind die ökologischen Zeigerwerte für das Gras aufgeführt (Tab. 13). Dene zufolge ist der Schafschwingel eine Halblichtpflanze die gegenüber der Temperatur und der Bodenfeuchte indifferent ist. Zudem zeigt sie saure und stickstoffärmste Böden an. *Festuca ovina* ist eine bedeutende Art in der sozioökologischen Gruppe der Magerrasenarten *Nardetalia* (Klötzli et al. 2010). Viele Arten dieser Gruppe sind auf der Birnenmofette zu finden: *Hieracium pilosella*, *Potentilla erecta*, *Deschampsia flexuosa*, *Nardus stricta*, *Veronica officinalis* und *Viola canina*.

Ungeachtet der fehlenden Abhängigkeiten von den Eigenschaften des Mofettenbodens, befindet sich der Schafschwingel in einem Konkurrenzvorteil gegenüber den mofettophoben Arten. Er ist morphologisch an trockene, saure und nährstoffarme Böden angepasst. Diese Bedingungen sind in den mittigen Aufnahmequadraten innerhalb der Birnenmofette erfüllt. Höchstwahrscheinlich wird das Gras von einer anderen mofettophilen oder mofettovagen Art verdrängt, beispielsweise von *Pleurozium schreberi* oder *Carex nigra*.

Nach Saßmannshausen (2010) verbreitet sich der Schafschwingel im gesamten westtschechischen Mofettengebiet meistens als Begleitart von *Calluna vulgaris* oder *Nardus stricta*. Auf der Hartoušov-Wiese ist er ebenfalls an niedrig gasenden Stellen zu finden (Saßmannshausen 2010).

Hieracium pilosella

Die Deckungsgrade von *Hieracium pilosella* sind in Abb. 57a dargestellt. Diese mofettophile Art aus der Familie der Asteraceae ist eine ausdauernde Rosettenpflanze mit Ausläufern. Sie wird häufig auf Trockenrasen, mageren Wiesen, Heiden, Kiefernwäldern, Pflasterritzen oder auf Mauern gefunden (Kutschera und Lichtenegger 1982; Düll und Kutzelnigg 2011). Die bevorzugten Böden dieser Art sind meistens kalkarm, sandig oder lehmig, steinig bis felsig und sonnenexponiert (Kutschera und Lichtenegger 1982). *Hieracium pilosella* ist eine

eurosibirische Pflanze, die arealgeographisch betrachtet eine Vielzahl von Standorten besiedelt, von der kollinen bis in die alpine Stufe (Kutschera und Lichtenegger 1982).

Wie schon die beiden zuvor genannten ist auch diese positive Zeigerart an Trockenheit angepasst. Um sich vor Austrocknung zu schützen, haben die Blätter oberseits lange Borstenhaare und unterseits einen weiß-filzigen Überzug. Unter trockenen Bedingungen rollen sich die Blätter ein, so dass der Überzug nach außen tritt. Auf diese Weise wird das Sonnenlicht reflektiert, und die Erwärmung der Pflanze eingeschränkt (Düll und Kutzelnigg 2011). Der mechanische Effekt ist während der Sommermessungen auf der Birnenmofette häufig zu beobachten.

Auf der Birnenmofette ist *Hieracium pilosella* vor allem in den südöstlichen Aufnahmequadraten (Kap. 2.2), mit Deckungsgraden von 10 bis 70%, zu finden. Teilweise wächst *Hieracium pilosella* aber auch in der Mitte der untersuchten Fläche. In den Kontrollbereichen fehlt diese Art vollständig.

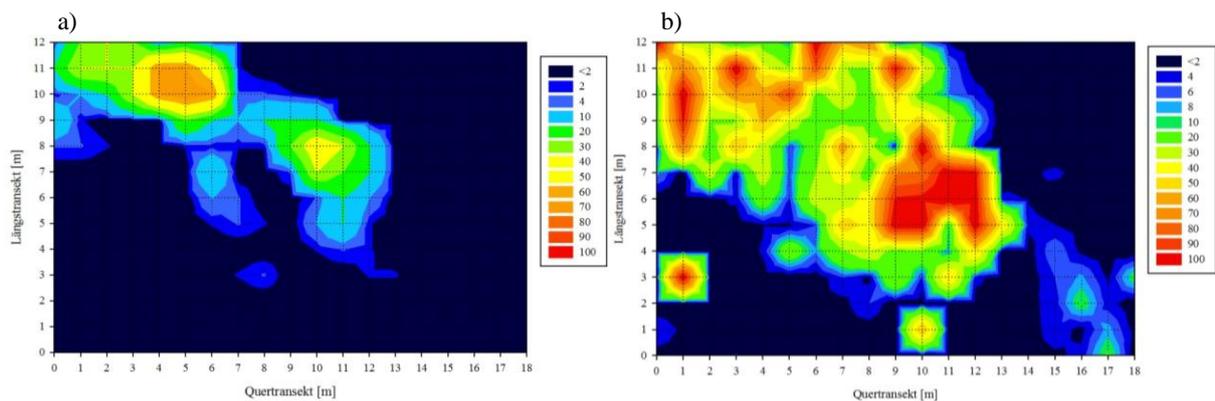


Abb. 57: Deckungsgrad [%] von *Hieracium pilosella* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Auch mit den Deckungsgraden von *Hieracium pilosella* wurden verschiedene Abhängigkeiten getestet (Tab. 18).

Tab. 18: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Hieracium pilosella* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Hieracium pilosella</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,40	0,48	0,48	0,41
pH	0,04	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,56	k. A.	k. A.	k. A.

Im Vergleich zu *Festuca ovina* sind die meisten Korrelationen bestätigt. Zwischen den Deckungsgraden und dem pH-Wert, sowie den Stickstoffgehalten (nicht in der Tabelle gezeigt) ist keine Korrelation festzustellen. Am aussagekräftigsten ist der Zusammenhang zwischen dem Bodenwasser und der prozentualen Flächenbedeckung. Das bestärkt die oben aufgeführten Eigenschaften der Trockenheitsanpassungen, und somit die überwiegende Ausbreitung in den trocken sandigen Rohboden-Bereichen. In den mittigen Aufnahmequadraten in denen der positive Zeiger auch zu finden ist, sind die Feuchtegehalte des Bodens höher und die Deckungsgrade folglich niedriger. Die Abhängigkeit der Verteilung von den Kohlendioxidkonzentrationen steigt zunächst mit zunehmender Bodentiefe bis 40 cm, dann fällt der Koeffizient wieder auf die Höhe des Wertes in 10 cm Bodentiefe. Diese Resultate stehen im Gegensatz zu der Annahme, dass die Mofettenvegetation mit ihren Wurzeln die Pedosphäre nicht tiefgehend durchdringen (Pfanzen et al. 2004). In diesem Fall scheint es, als würde das Mausohr-Habichtskraut längere Wurzeln ausbilden, wodurch die tief gemessenen CO₂-Gehalte die Verbreitung der Pflanze mehr beeinflussen als die oberflächennahen. Die Wurzeln des Mausohr-Habichtskrautes erreichen eine Länge von 10 bis 50 cm (Kutschera und Lichtenegger 1982). Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass *Hieracium pilosella* andere morphologische und physiologische Anpassungen besitzt, die in der Lage sind, eine Übersäuerung der pflanzlichen Gewebe zu verhindern. Eine Option wäre beispielsweise eine verstärkte Ausbildung von Stomata an den Blättern (Pfanzen et al. 2004).

Die wichtigsten Bodenvariablen für die Mächtigkeit und die Verteilung des Mausohr-Habichtskrautes sind demnach das CO₂ und die Bodenfeuchte.

Nach Ellenberg et al. (2001) ist *Hieracium pilosella* eine Halblichtpflanze, die gegenüber der Temperatur und dem Boden-pH-Wert ein unstetes Verhalten aufweist, und sich primär auf Trockenem bis mittelfeuchten und stickstoffärmsten bis stickstoffarmen Böden ausbreitet. Außerdem ist diese Habichtskraut-Art vornehmlich auf anthropo-zoogenen Heiden und Rasen auszumachen.

Das ökologische Verhalten gibt weiteren Aufschluss über die erzielten Ergebnisse. Die fehlende Abhängigkeit bezüglich der Bodenazidität kann auf zwei Faktoren basieren. Zum Einen ist das Verhalten dieser Art unter Konkurrenzdruck azidophil indifferent, zum Anderen ist der Wertebereich der gemessenen pH-Werte in der Birnenmofette sehr schmal. Infolgedessen ist die Datengrundlage für diese Analyse eventuell nicht ausreichend ausgeprägt und das Verhalten der mofettophilen Pflanze nicht genügend konstant. Im Vergleich mit der pH-Abbildung (Kap. 3.1.1.6) ist zu vermerken, dass *Hieracium pilosella* verstärkt die Aufnahmequadrante im mäßig sauren Bereich der Mofette überzieht. Von daher

gesehen ist es wahrscheinlich, dass es von anderen positiven Mofettenzeigern, die ausgewiesene Säurezeiger sind, wie zum Beispiel *Calluna vulgaris* oder *Pleurozium schreberi*, aus dem mittleren Exhalationsbereich in den südöstlichen verdrängt wird.

Diese positive Indikatorart ist Saßmannshausen (2010) zu Folge auch in den Mofettenkern-Bereichen der Hartoušov-Wiese aufgenommen worden. Dort wurde die Beobachtung gemacht, dass die Pflanzen, aufgrund erhöhter CO₂-Konzentrationen in der bodennahen Luftschicht, die Gräser als Fluchtmittel von der Bodenoberfläche nutzen.

Nardus stricta

In der nächsten Abbildung (58) werden die Deckungsgrade von *Nardus stricta*, einem Süßgras (Poaceae), dargestellt. Das Borstgras ist, wie *Festuca ovina*, ein horstbildendes Gras, welches auf seinen Wuchsorten bestandsbildend ist und regelrechte Borstgrasmatten ausbildet (Schmeil und Fitschen 2011). *Nardus stricta* ist ein rohhumuszehrender Bestandsbildner auf Magerrasen oder Heiden und bevorzugt kalk- und nährstoffarme, saure sowie humose Böden (Düll und Kutzelnigg 1994, 2011). Beheimatet ist diese *Nardus*-Art in Europa, Westasien und nordafrikanischen Gebirgen, wobei sie in der kollinen, montanen und subalpinen Stufe wächst (Kutschera und Lichtenegger 1982). Vergleichbar mit *Festuca ovina*, wird *Nardus stricta* durch seine abgestorbenen Blätter eingehüllt (Düll und Kutzelnigg 2011). Die Wurzeln durchdringen den Boden zwischen 17 und 100 cm (Kutschera und Lichtenegger 1982). Allerdings konnten auf mehreren gasenden Stellen des Untersuchungsgebietes des öfteren Wurzellängen zwischen 5 und 10 cm beobachtet werden (Jägers 2015).

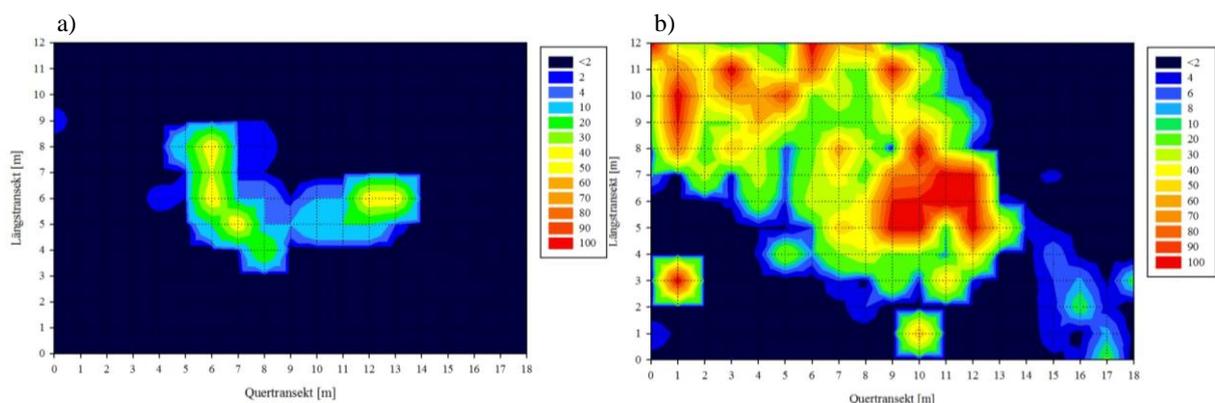


Abb. 58: Deckungsgrad [%] von *Nardus stricta* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Auf der Birnenmofette ist *Nardus stricta* ausschließlich in den Bereichen zu finden in denen die Vegetationsdecke von den mofettophilen Zeigerarten beherrscht wird. Allerdings ist die

Verbreitung auf den mittigen Ausgasungsschwerpunkt begrenzt, mit Deckungsgraden von 2 bis 50%. Im Vergleich zu *Festuca ovina* breitet sich *Nardus stricta* weniger stark aus. Innerhalb des CO₂-führenden Bereiches der Mofette beschränkt sich das Wachstum des Borstgrases auf die Aufnahmequadrante mit leicht erhöhten CO₂-Werten (Abb. 58). Als Folge der niedrigen Deckungsgrade steht das Verteilungsmuster statistisch betrachtet in keinem Zusammenhang mit den Kohlendioxidkonzentrationen, und auch nicht mit der Bodenfeuchte (Tab. 19). Es besteht zudem kein Zusammenhang zwischen den Stickstoffwerten und den Deckungsgraden.

Tab. 19: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Nardus stricta* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Nardus stricta</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,13	0,20	0,16	0,15
pH	-0,23	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	0,02	k. A.	k. A.	k. A.

Auch wenn der Korrelationskoeffizient für die Abhängigkeit von dem pH-Wert sehr klein ist, könnte er dennoch in die Richtung weisen, dass *Nardus stricta* saure Böden bevorzugt. Der Korrelationskoeffizient für die Beziehung zu dem Feuchtegehalt ist mit dem weiten Verträglichkeitsbereich von *Nardus stricta* hinsichtlich des Bodenwassers und der geringen Unterschiede im Bodenwasser der betroffenen Messquadrante zu erklären.

Nach der Tab. 13 kann das ökologische Verhalten der mofettophilen Art folgendermaßen beschrieben werden: *Nardus stricta* ist eine Lichtpflanze, die gegenüber der Temperatur und der Bodenfeuchte indifferent ist. Allerdings weist Ellenberg et al. (2001) darauf hin, dass das Gras starke Wechsel des Bodenwassers anzeigt. Vor dem Hintergrund der Bodenazidität befindet sich das Borstgras zwischen den Starksäure- und Säurezeigern. Zudem deutet es sehr stickstoffarme bis stickstoffarme Böden an. Der Name gibt schon einen Hinweis darauf, dass *Nardus stricta* eine Charakterart der *Nardetalia* ist (Conert 2000; Ellenberg et al. 2001), einer sozioökologischen Gruppe, die im gesamten Untersuchungsgebiet mit mehr oder minder starker Ausprägung zu verzeichnen ist (Saßmannshausen 2010).

Die geringe Konkurrenzstärke gegenüber den anderen mofettophilen Pflanzen basiert wahrscheinlich auf dem teilweise nicht festlegbaren ökologischen Verhalten des Grases unter Konkurrenzdruck.

Nardus stricta ist nicht nur auf der Birnenmofette gefunden worden, sondern ebenfalls auf der Hartoušov-Wiese (Saßmannshausen 2010), der Borstgrasmofette in der es bestandsbildend ist (Greiß 2008) und der Sumpfmofette. Es wird davon ausgegangen, dass Mahdereignisse, mittlere Bodenfeuchte- und Ausgasungsverhältnisse die Verbreitung des positiven Zeigers limitieren (Saßmannshausen 2010).

Pleurozium schreberi

Abschließend wird das Moos, *Pleurozium schreberi* als positiver Mofettenzeiger einer detaillierten Betrachtung unterzogen. Das Rotstängelmoos bildet lockere Hochrasen aus, die im Gelände gut zu erkennen sind. Es bevorzugt saure, schattige und trockene bis frische Standorte, in Nadelwäldern, Borstgrasrasen, Hochmoorbereichen oder Zwergstrauchheiden. Außerdem sollten die Böden humus- oder rohhumusreich sein. Das Moos selbst ist ebenfalls ein Rohhumuslieferant. Das allgemeine Verbreitungsgebiet umfasst Europa, die Azoren, Madeira, Asien, Nord- und Südamerika, sowie Grönland (Sauer und Philippi 2001).

Die Ausbreitung des Moooses auf der Birnenmofette ist nahezu deckungsgleich mit dem von *Calluna vulgaris* (Abb. 59a und 55a). Es dominiert in starkem Maße den Bereich der Fläche, der von dem mofettophilen Artenspektrum überzogen ist. Im Vergleich zu *Calluna vulgaris* sind die bedeckte Fläche und die Deckungsgrade geringfügig größer. Im Vergleich mit der Abb. 59b tritt hervor, dass das Rotstängelmoos die extremen Ausgasungsstellen meidet und sich vielmehr auf den Teilflächen ausbreitet in denen das Mofettengas hoch ist, aber nicht auf 80 bis 100% ansteigt.

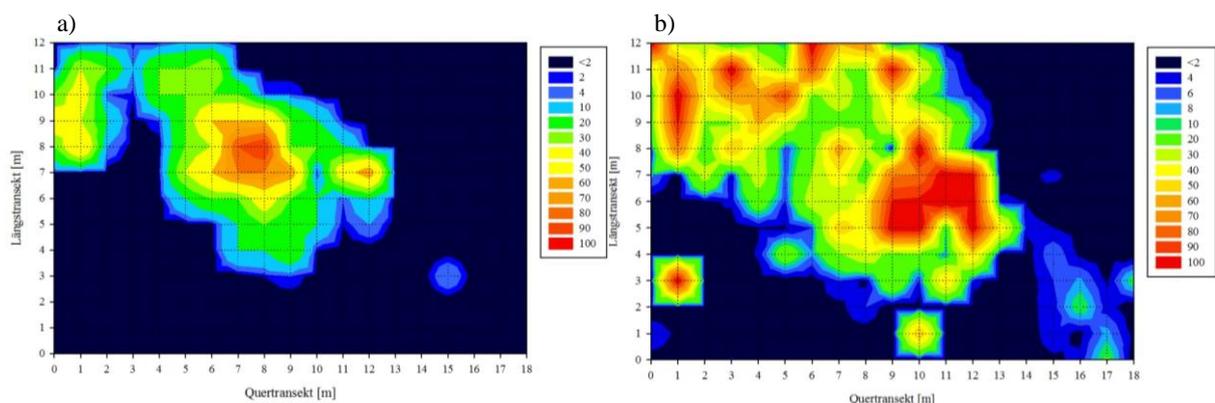


Abb. 59: Deckungsgrad [%] von *Pleurozium schreberi* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Die Resultate verschiedener Korrelationsanalysen mit den Deckungsgraden von *Pleurozium schreberi* und Eigenschaften der Pedosphäre, weisen schwache und fehlende Korrelationen

nach (Tab. 20). Die Abhängigkeit der Verteilung von den Kohlendioxidkonzentrationen ist durchgehend schwach, inklusive einer Abnahme mit zunehmender Bodentiefe. Die Abnahme beruht wahrscheinlich auf der Tatsache, dass Moose keine echten Wurzeln ausbilden. Da das Rotstängelmoos zusammen mit *Calluna vulgaris* auftritt, ist zu vermuten, dass es sich mit seinen Rhizoiden in den Heidekrautbeständen verfestigt. Infolgedessen wäre einzig die CO₂-Konzentration in 10 cm Bodentiefe als Einflussvariable zu werten. Ein Zusammenhang mit der Bodenazidität ist nicht gegeben. Allerdings grenzt der Wert stark an eine schwach negative Korrelation, wodurch zumindest eine Richtung angedeutet wird. Aus einem Vergleich mit der pH-Abbildung (Kap. 3.1.1.6) kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass *Pleurozium schreberi* den sauren Boden der Mofettenbereiche bevorzugt. In den sauren nicht-gasenden Aufnahmequadraten ist das Heidekraut nicht zu finden, wodurch sich das Rotstängelmoos an diesen Stellen nicht ausbreitet. Zudem werden diese Flächen beispielsweise von *Brachythecium salebrosum* oder *Plagiomnium affine* überzogen, gegen die sich *Pleurozium schreberi* nicht durchsetzen kann. Das Bodenwasser hat augenscheinlich keinen Einfluss auf die Ausbreitung des Moores, denn es wächst sowohl auf trockenen, als auch auf feuchten Aufnahmequadraten (siehe Kap. 3.1.1.4). Der Stickstoffgehalt ist ebenfalls als beeinflussender Faktor zu vernachlässigen.

Tab. 20: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Pleurozium schreberi* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Pleurozium schreberi</i>	10 cm		20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,59		0,46	0,48	0,45
pH	-0,25		k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,17		k. A.	k. A.	k. A.

Unter Einbeziehung der ökologischen Zeigerwerte (Tab. 13) wird das Verteilungsverhalten von *Pleurozium schreberi* noch verständlicher. Im Ellenberg'schen Sinne ist das Moos entweder im Halbschatten zu beobachten oder im Halblicht (Ellenberg et al. 2001). Aufgrund seines natürlichen Verbreitungsareals ist es ein Kühlezeiger, der auf trockenen bis frischen Böden wächst. Zusätzlich ist es ein Starksäure- bis Säurezeiger. Dieses beschriebene ökologische Verhalten ist äquivalent mit dem Ausbreitungsverhalten des Moores auf der Birnenmofette. Da es beschattete kühle Standorte bevorzugt, wächst es in Gesellschaft mit dem Heidekraut (siehe oben). Basierend auf der Reaktionszahl wächst es vermehrt auf saurem

Boden, wodurch die Vergesellschaftung mit dem Heidekraut weiterhin gegeben ist. Zusätzlich bieten die Heidekrautbestände das benötigte rohumusreiche Substrat.

Fazit

Die Arten der positiven Indikatorgruppe weisen ein ähnliches ökologisches Verhalten gegenüber den Bodeneigenschaften in der Birnenmofette auf. Bei verschiedenen Arten konnten morphologische Veränderungen der Blätter festgestellt werden. Diese Anpassungen sind meist peinomorphischen Ursprungs, wodurch diese Pflanzen befähigt sind, auf trockenen, nährstoffarmen und sauren Böden zu wachsen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch peinomorphische Veränderungen sowie Vergesellschaftung einzelne Arten derart konkurrenzstark sind, dass sie fast reine Monokulturen ausbilden können, trotz der CO₂-Anreicherungen. Die meisten positiven Indikatorarten meiden die extrem gasenden Bereiche, mit hohen Gasflüssen.

3.1.3.4 Das ökologische Verhalten negativer Mofettenzeiger

Agrostis capillaris

Abb. 60a zeigt die Pflanzendecke die von dem Roten Straußgras (Poaceae) auf der Birnenmofette gebildet wird. *Agrostis capillaris* ist ein Horstgras (Düll und Kutzelnigg 2011), das trockene bis frische, nährstoffarme, kalkarme bis mäßig saure, und humose Lehm- oder Sandböden präferiert (Conert 2000). Dieser mofettophobe Zeiger ist bestandsbildend auf Magerrasen, in Heiden und lichten Eichen- oder Kiefernwäldern (Düll und Kutzelnigg 2011). Das Gras ist euroasiatisch und ist sowohl in der kollinen als auch in der montanen und subalpinen Stufe gefunden worden (Conert 2000).

Innerhalb der Fläche ist *Agrostis capillaris* hauptsächlich im Südwesten über Nordwesten und im Norden (Kap. 2.2) aufgenommen worden, mit Deckungsgraden von 2 bis 10%. Zudem wächst es vereinzelt im Südosten und Süden, mit Deckungsgraden von 2 bis 50% (Abb. 60). Im Vergleich mit Abb. 60b ist schnell offensichtlich, dass das Gras den Mofettenbereich meidet, und die Kontrollquadrate bevorzugt.

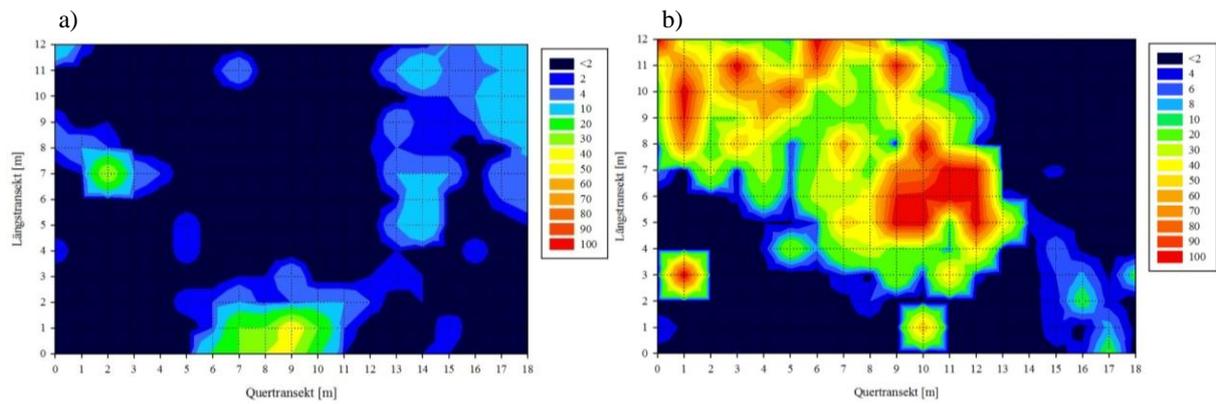


Abb. 60: Deckungsgrad [%] von *Agrostis capillaris* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Aufgrund der insgesamt geringen Präsenz von *Agrostis capillaris* können keine statistischen Zusammenhänge zwischen den Deckungsgraden und den Bodeneigenschaften ermittelt werden (Tab. 21).

Tab. 21: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Agrostis capillaris* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Agrostis capillaris</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	-0,18	-0,20	-0,20	-0,21
pH	-0,16	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,20	k. A.	k. A.	k. A.

Nach den Zeigerwerten (Ellenberg et al. 2001) ist das Rote Straußgras eine Halblichtpflanze, die unter Konkurrenzdruck ein ungleiches Verhalten gegenüber der Bodenfeuchte und der Temperatur offenbart. Zudem ist sie zwischen den Säure- und Mäßigsäurezeigern einzuordnen und bevorzugt auf stickstoffarmen bis stickstoffreichen Böden zu finden. *Agrostis capillaris* ist eine Charakterart auf anthropo-zoogenen Heiden und Rasen.

Im Vergleich mit der Abbildung des pH-Wertes (Kap. 3.1.1.6) ist zu vermerken, dass *Agrostis capillaris* sowohl in schwach sauren, mäßig sauren und sauren Aufnahmequadraten aufgenommen wurde; bezüglich des Bodenwassers wächst es eher in den feuchten Teilflächen. Zusammen mit der Abhängigkeit von dem Mofettengas stellt das Bodenwasser, eine mögliche Einflussgröße auf die Ausbreitung des Roten Straußgrases dar, ungeachtet der fehlenden Korrelation. Zusätzlich ist zu vermuten, dass die Rasenschmiele durch ihre

Dominanz *Agrostis capillaris* verdrängt. Auch andere mofettophobe oder mofettovage Pflanzen könnten eine Verdrängung bewirken, wie zum Beispiel *Anthriscus sylvestris*.

Anthriscus sylvestris

Die folgende Abb. 61a zeigt die Deckungsgrade von *Anthriscus sylvestris*. Der Doldenblütler (Apiaceae) ist eine Halbrosettenpflanze (Düll und Kutzelnigg 2011) die häufig auf beschatteten, frischen bis feuchten, humosen, tonreichen und nitratstickstoffarmen Böden zu finden ist. Der Wiesenkerbel ist fast in ganz Europa, in der kollinen und subalpinen Stufe, gefunden worden (Kutschera und Lichtenegger 1982), in Hochstaudenfluren und auf Fettwiesen (Düll und Kutzelnigg 2011).

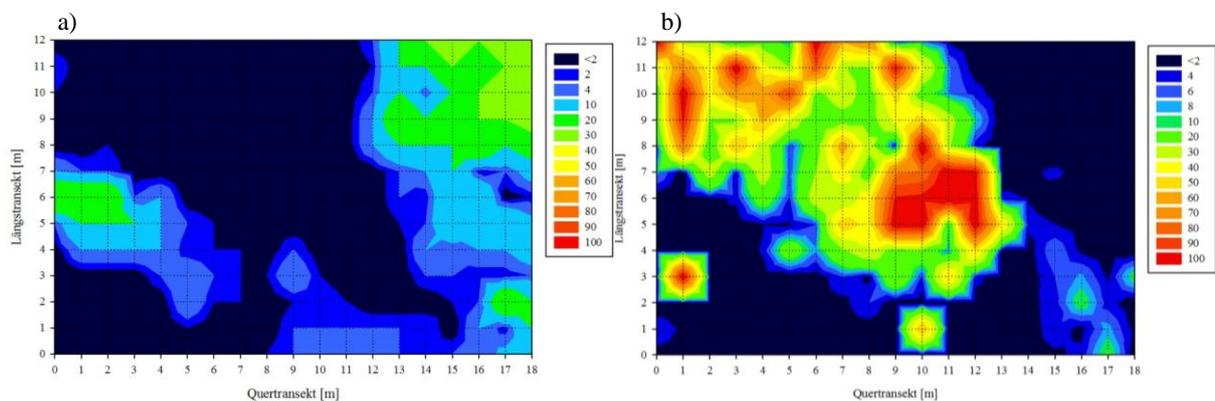


Abb. 61: Deckungsgrad [%] von *Anthriscus sylvestris* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

In der Birnenmofette deckt sich die Ausbreitung des negativen Zeigers in etwa mit der des Roten Straußgrases, mit Deckungsgraden von 2 bis 30%. Im Vergleich mit den CO₂-Werten, fügt sich der Wiesenkerbel nahezu exakt in die Aufnahmequadrante ein die nicht-gasend sind (Abb. 61b).

In Tab. 22 sind die Ergebnisse der verschiedenen Korrelationsanalysen aufgelistet. Abgesehen von der Abhängigkeit von dem pH-Wert, werden durchgehend schwache Korrelationen erzielt.

Im Vergleich mit der Abbildung des Bodenwassers (Kap. 3.1.1.4) zeigt sich, dass der Wiesenkerbel überwiegend in den feuchten Messquadraten wächst, wodurch diese Abhängigkeit in der statistischen Überprüfung gefestigt wird (Tab. 22). Die Stickstoffgehalte haben keinen Einfluss auf die Ausbreitung des Wiesenkerbels.

Tab. 22: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Anthriscus sylvestris* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Anthriscus sylvestris</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	-0,30	-0,33	-0,37	-0,35
pH	-0,10	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	0,40	k. A.	k. A.	k. A.

Die Tab. 14 enthält die ökologischen Zeigerwerte für *Anthriscus sylvestris*, die die oben beschriebenen Standortbedingungen widerspiegeln. Des Weiteren ist der Wiesenkerbel eine Halblichtpflanze, die bezüglich der Temperatur und der Bodenazidität indifferent ist. Außerdem ist der Wiesenkerbel eine Charakterart der *Arrhenatheretalia*. Die genannten Eigenschaften verleihen dieser Art einen hohen Konkurrenzdruck auf den Kontrollbereichen der Birnenmofette, auch gegenüber der dominierenden Rasenschmiele.

Nach Saßmannshausen (2010) ist der Wiesenkerbel auch auf der Hartoušov-Wiese zu finden.

Urtica dioica

Als nächste mofettophobe Art wird *Urtica dioica* (Urticaceae) vorgestellt. Dieser ausdauernde Hemikryptophyt wächst bevorzugt auf frischen bis feuchten, nährstoffreichen, lockeren Lehm- oder Tonböden (Düll und Kutzelnigg 2011), lichter Auwälder, von Schuttplätzen, oder Weiden. *Urtica dioica* ist bislang in der kollinen und subalpinen Stufe verzeichnet worden, und zwar auf der ganzen Welt, ausgenommen der tropischen und arktischen Gebiete (Kutschera und Lichtenegger 1982).

Auf der Birnenmofette ist *Urtica dioica* als negativer Zeiger ausschließlich in den nordöstlichen Aufnahmequadraten (Kap. 2.2) zu finden. Die Deckungsgrade erreichen Größen von 2 bis 50%. Vergleichbar mit den unlängst beschriebenen negativen Mofettenzeigern, breitet sich die Große Brennnessel genau in den Kontrollbereichen aus, allerdings an den Messstellen die von isolierten CO₂-Ausgasungen durchsetzt sind (Abb. 62).

Die Korrelationsanalysen führen zu einer schwachen Korrelation hinsichtlich des Boden-pH-Wertes. Die weiteren Ergebnisse zeigen aufgrund der schwerpunktartigen Ausbreitung der Brennnessel fehlende Zusammenhänge auf (Tab. 23). Außerdem besteht keine Abhängigkeit der Deckungsgrade von den Stickstoffwerten. Das gleiche gilt für die nächste mofettophobe Zeigerart *Veronica chamaedrys* (Tab. 24).

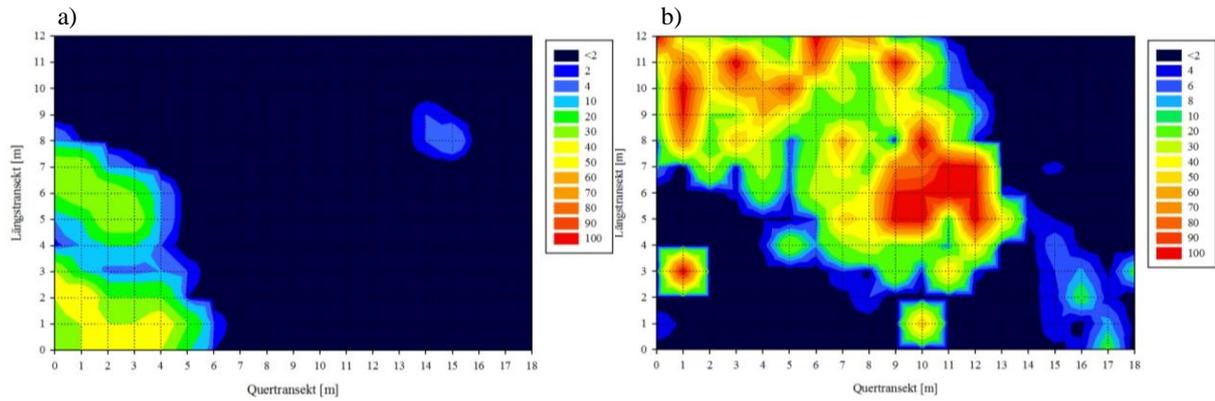


Abb. 62: Deckungsgrad [%] von *Urtica dioica* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Tendenziell wirken die CO₂-Konzentrationen in den tieferen Schichten des Bodens auf das Wachstum der Pflanze ein, was vermutlich auf eine tiefe Durchwurzelung des Bodens von *Urtica dioica* hinweist. Nach Kutschera und Lichtenegger (1982) erreichen die Wurzeln eine Länge von 80 bis 100 cm.

Tab. 23: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Urtica dioica* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Urtica dioica</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	-0,17	-0,23	-0,23	-0,21
pH	-0,57	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	0,12	k. A.	k. A.	k. A.

Vor dem Hintergrund des ökologischen Verhaltens unter Konkurrenzdruck weist die Große Brennnessel ein sehr unstabiles Ausbreitungsschema auf, vor allem hinsichtlich der Licht- und Feuchtezahl. Jedoch ist sie ein ausgewiesener Schwachsäure- und Stickstoffzeiger, auf mittelfeuchten bis gut durchfeuchteten Böden (Tab. 14) (Ellenberg et al. 2001). Zudem ist *Urtica dioica* eine Klassencharakterart der *Artemisietea*.

Im Vergleich mit der Abbildung der Bodenazidität (Abb. 23) wird die Abhängigkeit von dem pH-Wert nochmals deutlich, da sich die Bedeckung der Großen Brennnessel genau in dem Bereich vollzieht, der mäßig- bis schwach saure Messquadrate aufweist. Im Südwesten und Süden der Fläche wurden vergleichbare pH-Werte gemessen. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich die mofettophobe Art in den südwestlichen Teilflächen nicht gegen *Anthriscus sylvestris*

behaupten kann, und im Süden nicht gegen die konkurrenzstärkeren mofettophilen Zeigerarten.

Im gesamten Mofettengebiet ist die Große Brennnessel vor allem an stickstoffreichen Ruderalstandorten oder Grünlandbrachen gefunden worden. Besonders massiv ist ihre Ausbreitung in der Sumpfmofette, und kleinere Bestände sind auf der Hartoušov-Wiese nachgewiesen worden (Saßmannshausen 2010).

Veronica chamaedrys

Veronica chamaedrys ist ein wintergrüner, rasig wachsender Chamaephyt der Familie Scrophulariaceae. Er kommt meistens auf frischen und nährstoffreichen Lehmböden, von Wiesen, Wegrändern, Fettwiesen, Magerrasen oder Unkrautfluren vor (Düll und Kutzelnigg 2011). Dabei breitet sich die Pflanze aus der Ebene bis ins Hochgebirge aus, und zwar fast in ganz Europa, Westsibirien und Zentralasien (Kutschera und Lichtenegger 1982; Düll und Kutzelnigg 2011).

Die Abb. 63a stellt die Verteilung des Gamander Ehrenpreises dar, die sich ausschließlich auf den Nordwesten (Kap. 2.2) der Birnenmofette beschränkt, wobei die Pflanzendecke Deckungsgrade von 2 bis 30% erreicht. Ferner wird deutlich, dass sich der Wuchsort hauptsächlich in den Kontrollflächen dieses Bereiches befindet.

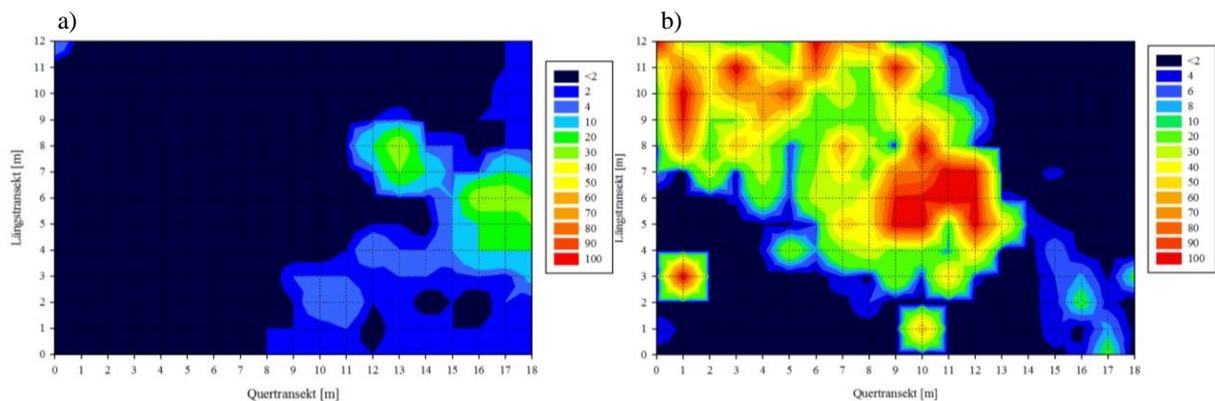


Abb. 63: Deckungsgrad [%] von *Veronica chamaedrys* pro Aufnahmequadrat (a) und CO_2 -Konzentrationen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

In den anderen betroffenen Aufnahmequadraten sind geringfügig erhöhte CO_2 -Konzentrationen zu verzeichnen (Abb. 63b), und die Deckungsgrade werden niedriger.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Tab. 24) wurden im Zusammenhang mit der Verbreitung von *Urtica dioica* gedeutet.

Tab. 24: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Veronica chamaedrys* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Veronica chamaedrys</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	-0,16	-0,16	-0,18	-0,20
pH	-0,05	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	0,14	k. A.	k. A.	k. A.

Hinsichtlich des ökologischen Verhaltens ist *Veronica chamaedrys* in jeglicher Hinsicht indifferent, abgesehen von der Lichtzahl, die sie im Ellenberg'schen Sinne zwischen den Halbschatten- und Halblichtpflanzen platziert. Außerdem zeigt sie im Bezug auf das Bodenwasser ein konstantes Verhalten; sie ist als Frischezeiger zu bezeichnen ist (Tab. 14) (Ellenberg et al 2001).

Dem Vergleich der pH-Wert Abbildung (Kap. 3.1.1.6) mit Abb. 63a ist zu entnehmen, dass diese mofettophobe Art in sauren, sowie mäßig sauren Aufnahmequadraten gefunden wurde. Diese Beobachtung bestätigt das indifferente Verhalten der Pflanze gegenüber der Bodenazidität. Durch eine Gegenüberstellung der Abb. 63a mit Abb. 17 (Kap. 3.1.1.4) kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Gamander Ehrenpreis in gut feuchten oder mäßig feuchten Teilflächen wächst, was seinem ökologischen Verhalten unter Konkurrenzdruck entspricht. In anderen Messquadraten mit ähnlichen Bodeneigenschaften ist *Veronica chamaedrys* vermutlich nicht ausreichend konkurrenzstark.

Neben der Birnenmofette, wurde *Veronica chamaedrys* ebenfalls in der Borstgrasmofette aufgenommen und wenige Individuen auf der Hartoušov-Wiese (Saßmannshausen 2010).

Fazit

Das Artenspektrum der negativen Mofettenzeiger zeigt ebenfalls ein übereinstimmendes ökologisches Verhalten der einzelnen Arten unter Konkurrenzdruck. Die negativen Indikatorarten sind in den Kontrollbereichen der Mofette konkurrenzstärker und verdrängen andere Arten entweder in die Mofetten- oder Randbereiche.

3.1.3.5 Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettovager Arten

Carex nigra

Als erstes wird *Carex nigra*, die Wiesensegge, aus der Familie der Cyperaceae, vorgestellt. Diese lockerrasig wachsende Seggenart ist häufig auf nassen Wiesen, Gräben oder Ufern, zu finden, sowie auf kalkreichen, nährstoffreichen und anmoorigen Torfböden (Aichele und

Schwegler 1998). Sie ist kälteunempfindlich und daher von der kollinen bis in die alpine Stufe vorkommend. Das Hauptverbreitungsgebiet liegt vornehmlich in Europa, Nordafrika, Zentralasien und Nordamerika (Kutschera und Lichtenegger 1982).

In der Birnenmofette hat die Wiesensegge über dem mittigen CO₂-Zentrum mit Deckungsgraden von 2 bis 50% eine recht starke Pflanzendecke gebildet, die nach Nordwesten (Kap. 2.2) ausläuft. Nur in wenigen Teilflächen kommt die mofettovage Art im Kontrollbereich vor (Abb. 64).

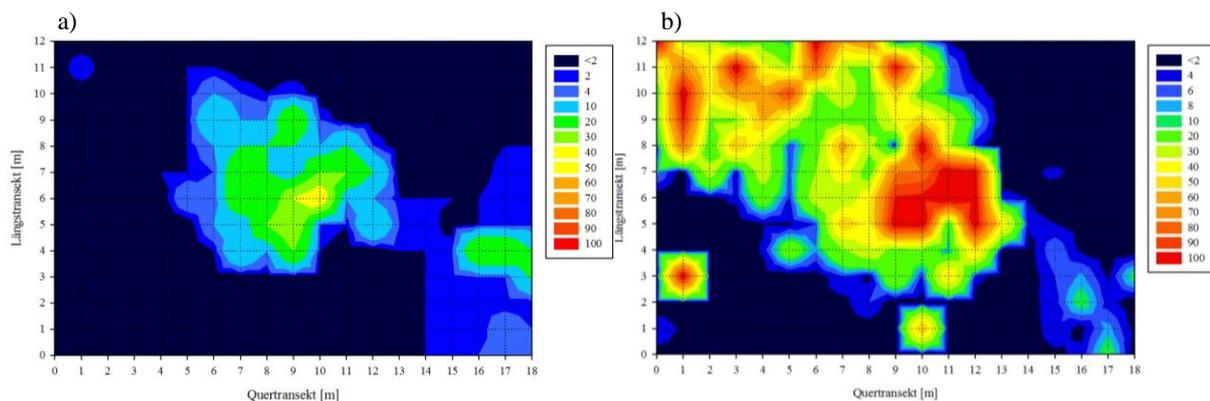


Abb. 64: Deckungsgrad [%] von *Carex nigra* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Die Abhängigkeit der Wiesensegge von den Kohlendioxidkonzentrationen, die optisch bereits gut zu erkennen ist, manifestiert sich zusätzlich in durchgeführten Korrelationsanalysen (Tab. 25).

Tab. 25: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Carex nigra* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Carex nigra</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	0,45	0,58	0,49	0,38
pH	-0,16	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,02	k. A.	k. A.	k. A.

Der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang mit dem CO₂ zeigt durchgehend eine schwache Korrelation an. Bis zu der Messtiefe von 20 cm steigt der Wert, dann nimmt er konstant ab. Das deutet vermutlich daraufhin, dass die Wurzeln den Boden höchstens bis 40 cm Tiefe durchdringen. Auf nicht-gasenden Böden bildet *Carex nigra* ein tiefreichendes

Wurzelsystem aus (55 bis 80 cm) (Kutschera und Lichtenegger 1982). Andere Mechanismen könnten ebenfalls eine Akkumulation des Kohlendioxids in der Pflanze vermeiden (Pfanzen et al. 2004).

Der Feuchtegehalt und die Azidität des Bodens bedingen die Ausbreitung der Wiesensegge nicht. Der Stickstoff hat ebenfalls keine Bedeutung für die Verbreitung. Dies ist bei allen vier mofettovagen Arten der Fall (siehe auch Tab. 26).

Anhand der Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (2001) (siehe Tab. 15) ist das ökologische Verhalten von *Carex nigra* unter Konkurrenzdruck wie folgt darzustellen: Das Gras ist eine Lichtpflanze, die Wechselfeuchte oder Wechsellässe anzeigt, sowie stickstoffärmste bis stickstoffarme Böden. Außerdem ist sie ein Säurezeiger, und wird nach ihrem soziologischen Verhalten den *Caricetalia nigrae* zugeordnet.

Nach einem Vergleich mit der Bodenfeuchte-Abbildung (Kap. 3.1.1.4) ist zu schließen, dass die Birnenmofette kein günstiger Standort für die Wiesensegge ist. Zumindest nicht die Wuchsorte, die von ihr auf der Fläche bevorzugt bedeckt werden. Das Ausgasungszentrum, auf dem *Carex nigra* größtenteils zu finden ist, zeichnet sich durch geringe Bodenwassergehalte aus. Jedoch ist dieser Mofettenbereich sehr sonnenexponiert, was einer Lichtpflanze zu Gute kommt, und der pH-Wert liegt dort im sauren Bereich, was zusätzlich dem ökologischen Verhalten entspricht. Weiterhin ist zu vermuten, dass die Wiesensegge aufgrund ihrer bevorzugten Standortbedingungen an schlecht durchlüftete Böden mit Sauerstoffmangel angepasst ist. Diese Eigenschaft verschafft ihr in den stark CO₂-führenden Aufnahmequadraten einen Konkurrenzvorteil. Der Grund für das Fehlen im südöstlichen Ausgasungsbereich könnte zum Einen, der trockenere Rohbodenbereich sein, oder zum Anderen der etwas höhere pH-Wert.

Nach Saßmannshausen (2010) wurde *Carex nigra* nahezu auf allen Mofetten des gesamten Untersuchungsgebietes aufgenommen, wie zum Beispiel auf der Hartoušov-Wiese oder in der Borstgrasmofette. Vergleichbar mit der Verteilung in der Birnenmofette zeigt sie eine hohe CO₂-Toleranz und wächst in die Mofettenbereiche hinein.

Deschampsia cespitosa

In Abb. 65a wird die Verbreitung der mofettovagen Art *Deschampsia cespitosa* auf der Birnenmofette gezeigt. Die Rasenschmiele ist wie viele andere Süßgräser in der Birnenmofette ein Horstgras, das nasse, mäßigsaure und stickstoffarme Böden präferiert, von Wiesen, Sümpfen oder Wäldern (Conert 2000; Düll und Kutzelnigg 2011). Wie auch *Carex nigra* ist dieses Gras unempfindlich gegenüber Kälte und wurde sowohl in der kollinen, als

auch in der montanen, bis in die subalpine Stufe verzeichnet. Das Verbreitungsgebiet umfasst Europa, Nordamerika, Südostasien, Australien, Neuseeland, Tasmanien und vereinzelte Teile Afrikas (Kutschera und Lichtenegger 1982; Conert 2000). Die Blätter weisen Rippen auf der Oberseite auf, in denen die Spaltöffnungen liegen. Das stellt eine Anpassung an Trockenheit dar. Indem die Blätter eingerollt werden, wird die Transpiration eingeschränkt. Des Weiteren ist *Deschampsia cespitosa* an eine vorübergehende Austrocknung des Oberbodens angepasst (Kutschera und Lichtenegger 1982).

In der Birnenmofette ist *Deschampsia cespitosa* nahezu in jedem Aufnahmequadrat mit hohen Deckungsgraden von überwiegend 20 bis 90 % zu verzeichnen. Einzig in mittigen Teilflächen fehlt sie und in einem kleinen Bereich im Nordosten (Abb. 65a). Im Vergleich mit der Abb. 65b ist offensichtlich, dass sich die Rasenschmiele nah an die stark gasenden Zonen der Birnenmofette ausbreitet aber nicht in sie hineinwächst. Die nicht-gasenden Stellen werden zwar von der mofettovagen Art überzogen, jedoch nicht in dem Maße wie die Übergangsbereiche zwischen den Ausgasungszentren und den Kontrollbereichen.

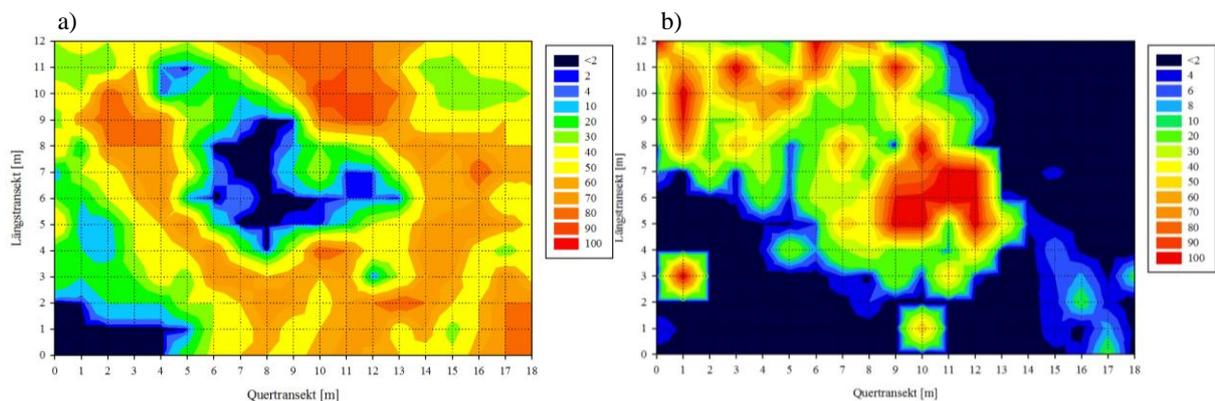


Abb. 65: Deckungsgrad [%] von *Deschampsia cespitosa* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

In Tab. 26 sind die Ergebnisse der verschiedenen Korrelationsanalysen aufgelistet, die eine durchgehend negativ schwache Korrelation hinsichtlich der Kohlendioxidkonzentrationen aufdecken. Anders als bei den bislang analysierten Arten ist der Koeffizient für alle Messtiefen stabil. Auf die Abhängigkeit von der Bodenfeuchte und Bodenazidität wurde bereits bei *Carex nigra* eingegangen.

Neben dem ökologischen Verhalten als Wechselfeuchtezeiger und Säurezeiger, ist die Rasenschmiele in ihrem Ausbreitungsverhalten unter Konkurrenzdruck sehr indifferent (Tab. 15). Deswegen kann sie auch keinem soziologischen Verhalten zugeordnet werden. Aber dennoch verleihen ihr die verschiedenen Anpassungen und ihre Azidophilie einen starken

Konkurrenzvorteil gegenüber anderen Arten, was sich in ihrer Dominanz in dem Pflanzenbestand äußert. Aus den starken Ausgasungsstellen wird sie vermutlich von *Calluna vulagris* oder *Pleurozium schreberi* verdrängt, die aufgrund ihrer stärkeren pH-Verträglichkeit dort Konkurrenzvorteile haben.

Tab. 26: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von *Deschampsia cespitosa* und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette. Weitere Erklärungen sind in Tab. 16 zu finden. (Datenerhebung 2008)

<i>Deschampsia cespitosa</i>	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
CO ₂ [%]	-0,30	-0,30	-0,31	-0,32
pH	-0,17	k. A.	k. A.	k. A.
Feuchtegehalt [%]	-0,09	k. A.	k. A.	k. A.

Ähnlich wie *Carex nigra* ist *Deschampsia cespitosa* ebenfalls in allen Mofetten des Untersuchungsgebietes zu finden, wobei sie schwach bis mäßig gasende Bereiche bevorzugt, sowie nährstoffarme Kontrollflächen mit Halbschatten (Saßmannshausen 2010).

Potentilla erecta

Die Abb. 66a zeigt die Verteilung der mofettovagen Art *Potentilla erecta* aus der Familie der Rosaceae. Diese in Büscheln wachsende Pflanze wird meistens auf Magerrasen, Moorwiesen, Heiden oder Rotkiefern- und Stieleichenwäldern gefunden. Die Böden der Wuchsorte sind dann überwiegend nährstoff- und basenarm, sauer, wechselfrisch bis wechselfeucht, und modrig-humos. Der Blutwurz verbreitet sich in Europa bis nach Nordafrika und kommt auf der Ebene (kollin) bis in die subalpine Stufe vor (Kutschera und Lichtenegger 1982).

Das Verbreitungsmuster der Blutwurz zeigt, dass er sowohl die Ausgasungszentren meidet, als auch die Kontrollbereiche. Vergleichbar mit *Deschampsia cespitosa* breitet sich die Pflanze bevorzugt in den Randbereichen der stark CO₂-führenden Aufnahmequadrate aus. Demzufolge in einem diagonal verlaufenden Areal von Südosten nach Nordwesten (Kap. 2.2), mit Deckungsgraden von 2 bis 30% (Abb. 66a,b).

Eine statistische Überprüfung, sollte zeigen welche Wirkungsgröße für die Ausbreitung von *Potentilla erecta* von Bedeutung ist. Die Resultate ergaben durchgehend, dass mit keiner der erhobenen Bodenvariablen eine Wechselbeziehung besteht. Die insgesamt niedrigen Deckungsgrade könnten ein Grund dafür sein.

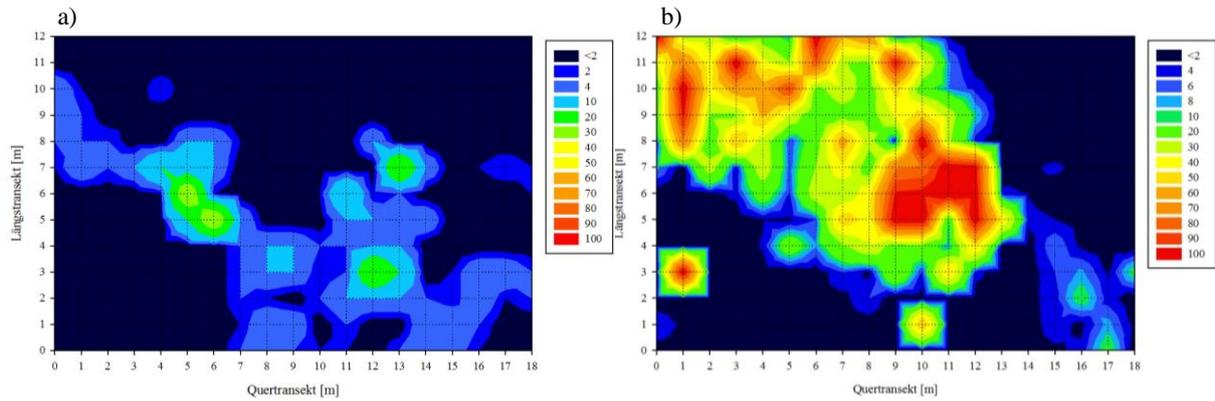


Abb. 66: Deckungsgrad [%] von *Potentilla erecta* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Einen weiteren Erklärungsansatz könnten die Zeigerwerte erbringen (Tab. 15). Danach ist der Blutwurz gegenüber vielen Einflussgrößen in seinem Verhalten indifferent, zum Beispiel gegenüber der Reaktions-, Feuchte- und Temperaturzahl. Es kann die Vermutung formuliert werden, dass *Potentilla erecta* in die Mofettenbereiche hineinwachsen würde, er aber von den konkurrenzstarken mofettophilen Arten, die womöglich geeignetere Anpassungen an diesen Extremstandort haben, verdrängt wird. Aus den Kontrollflächen wird diese Art von den mofettophoben Pflanzen verdrängt, da diese wiederum besser an feuchte nährstoffreichere, Böden angepasst sind, und somit ebenfalls Konkurrenzvorteile haben.

Abgesehen von der Birnenmofette ist der Blutwurz auch in anderen Mofetten beobachtet worden, in denen er sich in vergleichbaren Wuchsorten ausbreitet (Saßmannshausen 2010).

Succisa pratensis

Vergleichbar mit dem Verbreitungsverhalten von *Potentilla erecta* ist das von *Succisa pratensis* aus der Familie der Dipsacaceae (Abb. 67a). Diese mofettovage Art ist eine Halbrosettenpflanze, die sich auf wechselfeuchten Magerwiesen ausbreitet, sowie auf mäßig sauren, humosen lehmigen oder tonigen Böden. *Succisa pratensis* ist relativ resistent gegenüber Kälte und wächst von der kollinen Stufe bis in die subalpine Stufe, und zwar vor allem im europäischen und westasiatischen Raum (Kutschera und Lichtenegger 1982).

Auf der Birnenmofette ist *Succisa pratensis* eine Begleitart von *Potentilla erecta*, jedoch wurde sie in weniger Aufnahmequadraten vermerkt, und mit geringeren Deckungsgraden, mit Werten von 2 bis 10% , und punktuell 20 bis 30%. Demzufolge bevorzugt der Teufelsabbiss ebenfalls die schwach gasenden Randbereiche (Abb. 67a,b).

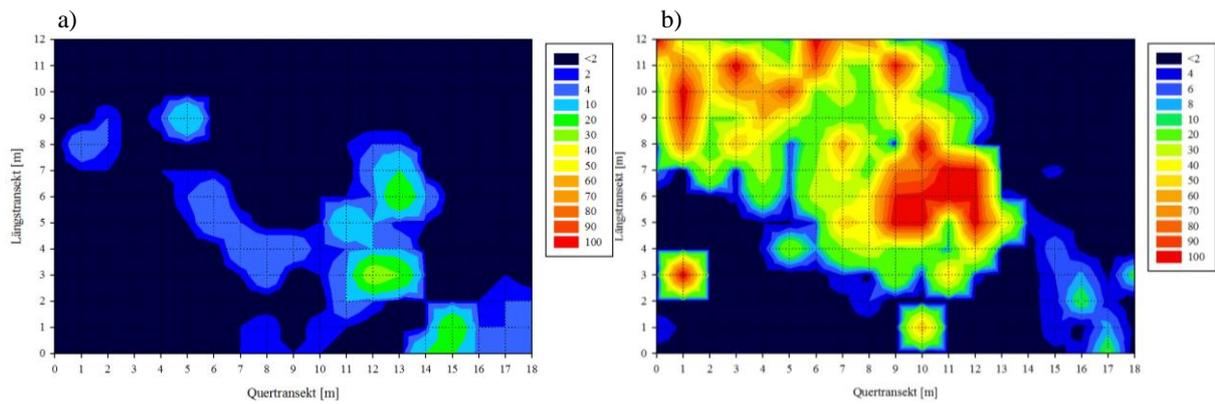


Abb. 67: Deckungsgrad [%] von *Succisa pratensis* pro Aufnahmequadrat (a) und CO₂-Konzentrationen [%] in 40 cm Bodentiefe (b), in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008)

Die Ergebnisse und Deutung der statistischen Analyse sind bei *Potentilla erecta* nachzulesen. Nach Ellenberg et al. (2001) ist der Teufelsabbiss eine Halblichtpflanze, sowie ein ausgewiesener Mäßigwärme- und Feuchtezeiger, der stickstoffärmste oder stickstoffarme Böden bevorzugt, aber sich gegenüber dem pH-Wert indifferent verhält. Außerdem ist *Succisa pratensis* eine Ordnungskennart der *Molinieta*.

Wie auch bei *Potentilla erecta* unlängst vermutet wurde, ist der Teufelsabbiss nicht konkurrenzstark genug, um sich zum Einen gegen die mofettophilen Arten in den Ausgasungsbereichen zu behaupten, und zum Anderen gegen die mofettophoben Arten, in den Kontrollbereichen. Ferner könnte die Dominanz von *Deschampsia cespitosa* zur Verdrängung dieser mofettovagen Art beitragen.

Fazit

Aus den Interpretationen und Analysen der Verteilung und Deckungsgrade ausgewählter mofettovager Arten, in der Birnenmofette, können verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden: Die ausgesuchten mofettovagen Pflanzen haben zum Teil verdeutlicht, dass manche von ihnen die gleichen ökologischen Zeigerwerte zugewiesen bekommen haben, wie die positiven Mofettenzeiger. Dadurch sind auch sie dazu befähigt, sich in den stark CO₂-führenden Bereichen auszubreiten. Andere Pflanzen aus dieser Gruppe offenbaren ein indifferentes Ausbreitungsverhalten innerhalb der Mofette und bedecken die Übergänge zwischen den Mofetten- und Kontrollbereichen. Es ist anzunehmen, dass ihre Ausbreitung innerhalb der Birnenmofette durch die Konkurrenzstärke der Indikatorarten limitiert wird. In den Exhalationszentren werden sie von den mofettophilen Arten verdrängt und in den nicht-gasenden Bereichen von den mofettophoben.

3.1.4 Auswertung der Vegetation mit dem Verfahren der kanonischen Korrespondenzanalyse

In diesem Kapitel soll die statistische Auswertung des Pflanzenbestandes in der Birnenmofette, hinsichtlich der lokalen Standortbedingungen, noch vertieft werden. Dazu wurden mit verschiedenen Datensätzen kanonische Korrespondenzanalysen (CCA), beziehungsweise multivariate, oder auch univariate, direkte Gradientenanalysen (Leyer und Wesche 2007) durchgeführt, deren Ergebnisse in 2-dimensionalen CCA-Diagrammen dargestellt werden. Das Verfahren wurde in Kap. 2.5.2.2 ausführlich erläutert und die richtige Interpretation anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Die Datensätze der folgenden Diagramme sind unterschiedlich aufgebaut. Die Abb. 68-71 stellen CCA-Diagramme dar, in denen der Pflanzenbestand in zwei Gruppen eingeteilt wurde. Eine Gruppe enthält alle gefundenen dikotylen Pflanzenarten, die andere alle Monokotylen, wobei die Arten die im Durchschnitt mit weniger als 2% Deckungsgrad in der Fläche vorkamen, aus dem Artenspektrum ausgeschlossen wurden, da sie nicht ausreichend repräsentativ sind (Leyer und Wesche 2007). In die Analysen wurden die Mittelwerte der Bodenparameter eingegeben, die untereinander eine Abhängigkeit aufweisen. Demnach beinhaltet der zugrunde liegende Datensatz in Abb. 68 die Mittelwerte der Bodenfeuchte, des organischen Bodenanteiles, des Stickstoffgehaltes und die der Leitfähigkeit. Die Abb. 69 zeigt zwei CCA-Diagramme univariater Korrespondenzanalysen, da die Datensätze neben den Pflanzen, nur den pH-Wert enthalten. Aufgrund der Tatsache, dass die Bodenazidität in keiner Wechselwirkung mit einem anderen Bodenfaktor steht (Kap. 3.1.1.6), wird die Auftrennung der Arten entlang des pH-Gradienten separat analysiert. Das gleiche gilt für die Dispersion der Pflanzenarten entlang des Konzentrationsgradienten des Kohlendioxids (Abb.70).

3.1.4.1 Auftrennung der dikotylen und monokotylen Arten entlang der Gradienten verschiedener Bodeneigenschaften

Die Korrespondenzanalysen der ersten zwei Abbildungen beruhen auf der Fragestellung, welche Abhängigkeiten zwischen den Arten und den Bodenparametern aufgedeckt werden, ohne die Beeinflussung durch das Mofettengas. In den Diagrammen sind die positiven Mofettenzeiger rot umrandet und die negativen blau, damit eine Fokussierung auf bestimmte Arten gewährleistet ist.

Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, dem organischen Gehalt an der Festphase, dem Stickstoffgehalt und der Leitfähigkeit

Aus der Betrachtung der Abb. 68 können einige Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Schwerpunkte nahezu aller negativen Mofettenzeiger befinden sich auf der Seite des Koordinatenursprungs mit der Pfeilspitze. Folglich stehen sie in einer stärkeren Abhängigkeit zu hohen Gehalten des Bodenwassers, des organischen Anteiles an der festen Bodensubstanz, des Stickstoffgehaltes sowie zu einer hohen elektrischen Leitfähigkeit. Ausnahmen sind *Phalaris arundinacea* und *Elymus repens*. Hinsichtlich der Bodenfeuchte bestätigt die Analyse das ökologische Verhalten der negativen Mofettenzeiger, dass schon anhand der Zeigerwerte nach Ellenberg beschrieben wurde (Kap. 3.1.3.2).

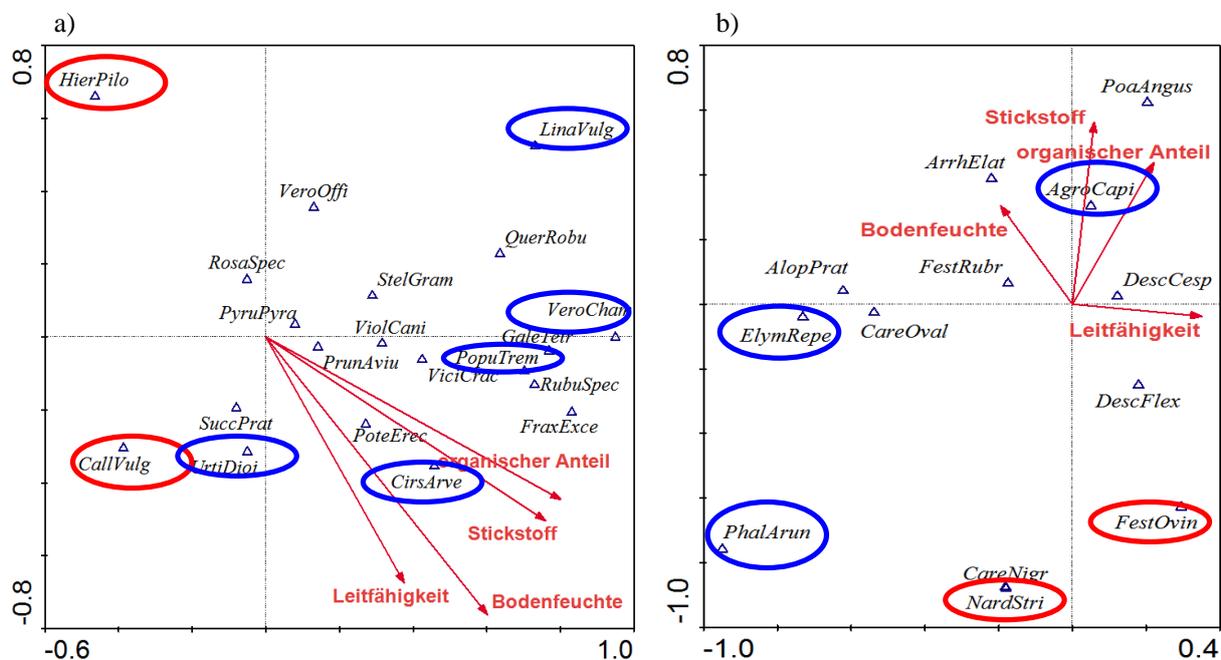


Abb. 68: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,504) und monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,186) mit den Bodenvariablen aus einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm (Vektorpfeile). Die rot umrandeten Arten sind positive Mofettenzeiger, die blau umrandeten negative. (Datenerhebung 2009 und 2010)

Im Schnitt präferieren sie unter Konkurrenzdruck zumindest mittelmäßig bis gut durchfeuchtete Böden. Beide Diagramme bestätigen den starken Zusammenhang zwischen den Stickstoffwerten und den organischen Mengenanteilen, der in Kap. 3.1.1.7 gezeigt werden konnte. Die Vektorpfeile der zwei Parameter sind nahezu identisch positioniert. Daher ist zu vermuten, dass sich hinter der Abhängigkeit vom organischen Bodenanteil das ökologische Verhalten als Stickstoffzeiger verbirgt (Kap. 3.1.3.2). Aufgrund dessen wird in

den folgenden Korrespondenzanalysen der organische Gehalt durch den Stickstoffgehalt ersetzt.

Die Schnittpunkte der Lote der mofettophilien Arten liegen auf der anderen Seite der Pfeile, was ein entgegengesetztes Verhalten hinsichtlich dieser Parameter (exklusive des CO₂) andeutet. Die Arten sowohl der Dikotyledonen als auch der Monokotyledonen ordnen sich den niedrigen Werten dieser Bodeneigenschaften zu. In diesem Ergebnis spiegeln sich ebenfalls die ökologischen Zeigerwerte wider, nach denen das Vorkommen der Arten an einem Standort auf einen nährstoffarmen und trockenen Boden schließen lässt (Kap. 3.1.3.2). Die Einordnung von *Calluna vulgaris* ist nicht so eindeutig wie die von *Hieracium pilosella*, *Nardus stricta* oder *Festuca ovina*, jedoch ist die Tendenz deutlich vorhanden.

Die unlängst vorgestellten mofettophilen Arten ordnen sich den Bodenfaktoren (außer dem Kohlendioxid) entweder auf ähnliche Weise wie die mofettophilien Arten zu oder sie befinden sich in der Nähe des Koordinatenursprungs. *Succisa pratensis* gleicht in der Zuordnung *Calluna vulgaris*. Das gleiche gilt für *Potentilla erecta*, allerdings tendiert es leicht zu den mofettophoben Arten. Beide Arten haben einen vermehrten Anteil an der Pflanzendecke in den Aufnahmequadraten der Übergänge zwischen Mofetten- und Kontrollbereichen, als Folge der Verdrängung der jeweiligen Indikatorgruppe. Dadurch sind sie nicht auf den Extremen der Bodenvariablen aufgenommen worden, sondern an den Durchschnittswerten, was sich in der Korrespondenzanalyse wiederholt bestätigt. *Deschampsia cespitosa* befindet sich am Koordinatenursprung. Aufgrund der Dominanz der Rasenschmiele in der Birnenmofette kann sie entlang der Gradienten der Bodeneigenschaften nicht zugeordnet werden. Sie zeigt kein gerichtetes ökologisches Verhalten zu einem Extrem. In Kap. 3.1.3.5 wurde festgestellt, dass das Gras einzig auf den stark gasenden Bereichen fehlt. Dieses Verhalten kann anhand dieser Abbildung jedoch nicht bestätigt werden. *Carex nigra* hat einen identischen Schwerpunkt wie *Nardus stricta*. Das ist nicht verwunderlich, da beide Arten ein ähnliches Ausbreitungsverhalten auf der Mofette haben.

Fazit

Die Abb. 68 konnte nochmals das ökologische Verhalten der Arten gegenüber den verschiedenen Bodeneigenschaften bestätigen. Die zwei Indikatorgruppen ordnen sich den entgegengesetzten Ausprägungen der Bodenfaktoren zu. Die negativen Mofettenzeiger haben ihre Artschwerpunkte am oberen Ende der Gradienten, während sich die positiven Mofettenzeiger am unteren Ende einordnen. Die Auftrennung entspricht den unterschiedlichen Anpassungen der Arten an verschiedene Bodeneigenschaften. Die

mofettovagen Arten zeigen die Schwerpunkte ihrer Auftrennung entweder am Koordinatenursprung oder auf der Seite des Vektorpfeiles mit der Pfeilspitze. Diese Zuordnung bestätigt das in Kap. 3.1.3.5 beobachtete indifferente Verhalten der mofettovagen Arten gegenüber den Bodenverhältnissen.

Abhängigkeit von dem pH-Wert

In den Abb. 69a,b sind die CCA-Diagramme univariater Gradientenanalysen dargestellt. Die Analysen basieren auf Datensätzen die erneut die beiden Pflanzengruppen (Dikotyledonen und Monokotyledonen) enthielten und eine Bodenvariable, den pH-Wert.

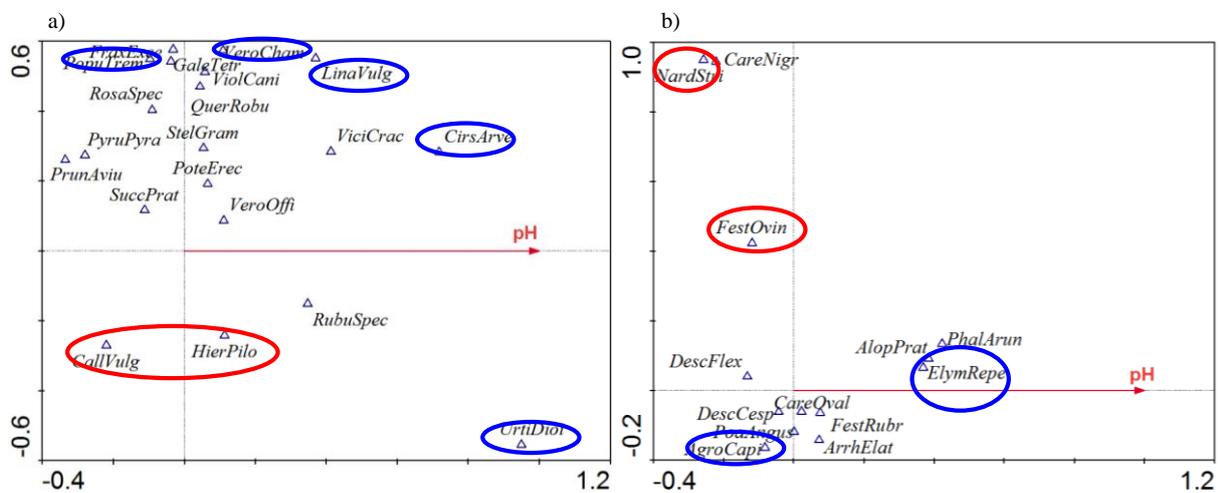


Abb. 69: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,446) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,464) und dem pH-Wert in 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeil). Die negativen Mofettenzeiger sind blau markiert, die positiven rot. (Datenerhebung 2009 und 2010)

Die Auftrennung der Artenzusammensetzung (Dispersion) nach dem pH-Gradienten verdeutlicht die unterschiedliche Azidophilie der verschiedenen Arten in der Mofette.

Die positiven Mofettenzeiger, außer *Hieracium pilosella*, haben ihren Schwerpunkt auf der anderen Seite des Koordinatenursprunges. Da sie alle Starksäure- oder Säurezeiger sind, wird mithilfe der Analyse ihr ökologisches Verhalten hinsichtlich des pH-Wertes in der Birnenmofette bestätigt. *Hieracium pilosella* befindet sich jedoch auf der Seite der Pfeilspitze mit einer Nähe zum Diagrammzentrum. Dieser Schwerpunkt könnte aus dem indifferenten Verhalten des Mausohr-Habichtskrautes gegenüber dem pH-Wert entstanden sein (Kap. 3.1.3.3). Das kann in der CCA dazu führen, dass ein Artwert nicht eindeutig dem Gradienten zuzuordnen ist.

Die beiden CCA-Diagramme in Abb. 69 verleihen weiterhin ganz prägnant der allgemein starken Versauerung des Bodens Ausdruck. Die meisten gefundenen Arten, zeigen eine Tendenz zur Mitte der CCA-Diagramme, oder zur entgegengesetzten Seite der Pfeilspitze. Auf diese Weise wird eine schlechte Auftrennung der Arten an dem pH-Gradienten signalisiert, die auf der schmalen Wertespanne der pH-Werte basiert. Die Eigenwerte spiegeln diese Deutung der Abbildung wider. Immerhin ist bei den Artwerten der negativen dikotylen Pflanzen, innerhalb der Indikatorgruppe eine gute Dispersion ersichtlich.

Einzig *Urtica dioica*, *Elymus repens*, *Phalaris arundinacea*, *Rubus spec.*, *Veronica officinalis* und *Cirsium arvense* haben ihre Schwerpunkte nahe an der Spitze des Vektorpfeiles. Diese Arten sind alle in vergleichbaren Aufnahmequadraten notiert worden, in denen der pH-Wert einen schwach- oder mäßig sauren Boden anzeigt.

Fazit

Die Korrespondenzanalyse bekräftigt das in Kap. 3.1.3.2 diskutierte ökologische Verhalten der Arten gegenüber der Bodenazidität.

Auftrennung der Arten entlang des CO₂-Gradienten

Nach den oben interpretierten Korrespondenzanalysen enthält die Abb. 70 zwei Diagramme in denen der für Mofetten entscheidende Faktor, das Kohlendioxid, berücksichtigt wird. Die Datensätze der univariaten Analysen bestehen jeweils aus den dikotylen und monokotylen Arten, und den Mittelwerten der Kohlendioxidkonzentrationen in 40 cm Bodentiefe.

Die einzelnen Diagramme stellen eine Auftrennung der Arten entlang des CO₂-Gradienten dar. Mithilfe der farblichen Umrandungen ist sofort offensichtlich, dass die positiven Zeiger der Dikotyledonen und Monokotyledonen eine eindeutige Tendenz zur Pfeilspitze des CO₂ aufweisen. Innerhalb der Indikatorgruppe gibt es Unterschiede in der CO₂-Verträglichkeit (Kap. 3.1.3.3). Das gelangt in einer weiteren Auftrennung gegenüber erhöhten CO₂-gehalten zum Ausdruck. Bei den Schwerpunkten von *Calluna vulgaris* und *Hieracium pilosella* wird nochmals das Ergebnis der Korrelationsanalysen in Kap. 3.1.3.3 gefestigt, nach dem das Ausbreitungsverhalten von *Hieracium pilosella* stärker an die CO₂-Werte in 40 cm Bodentiefe gebunden ist, als an die Konzentrationen der oberen Messtiefen. Bei *Calluna vulgaris* wurde der umgekehrte Sachverhalt beobachtet. Die Annahme, dass die Länge der Wurzeln von *Hieracium pilosella* tiefer in den Boden eindringen als die des Heidekrautes, wodurch die Beeinflussung der CO₂-Konzentrationen in unterschiedlichen Bodentiefen entsteht, wird mittels dieser statistischen Auswertung bestätigt. An dem CCA-Diagramm der Gräser ist

auffallend, dass *Carex nigra* eine stärkere Abhängigkeit zu den CO₂-Werten aufweist, als die eigentlichen mofettophilen Gräser *Nardus stricta* und *Festuca ovina*. Im Vergleich mit den Abb. 56, 58, und 64 in Kap. 3.1.3.3 und 3.1.3.5 werden die Schwerpunkte der Artwerte erklärt. Anders als das Borstgras und der Schafschwingel breitet sich die Wiesensegge mit hohen Deckungsgraden in den stark CO₂-führenden Bereichen aus, während die beiden Süßgräser um die gasenden Stellen herum wachsen. Dieses Ausbreitungsverhalten tritt in dem Diagramm in Erscheinung.

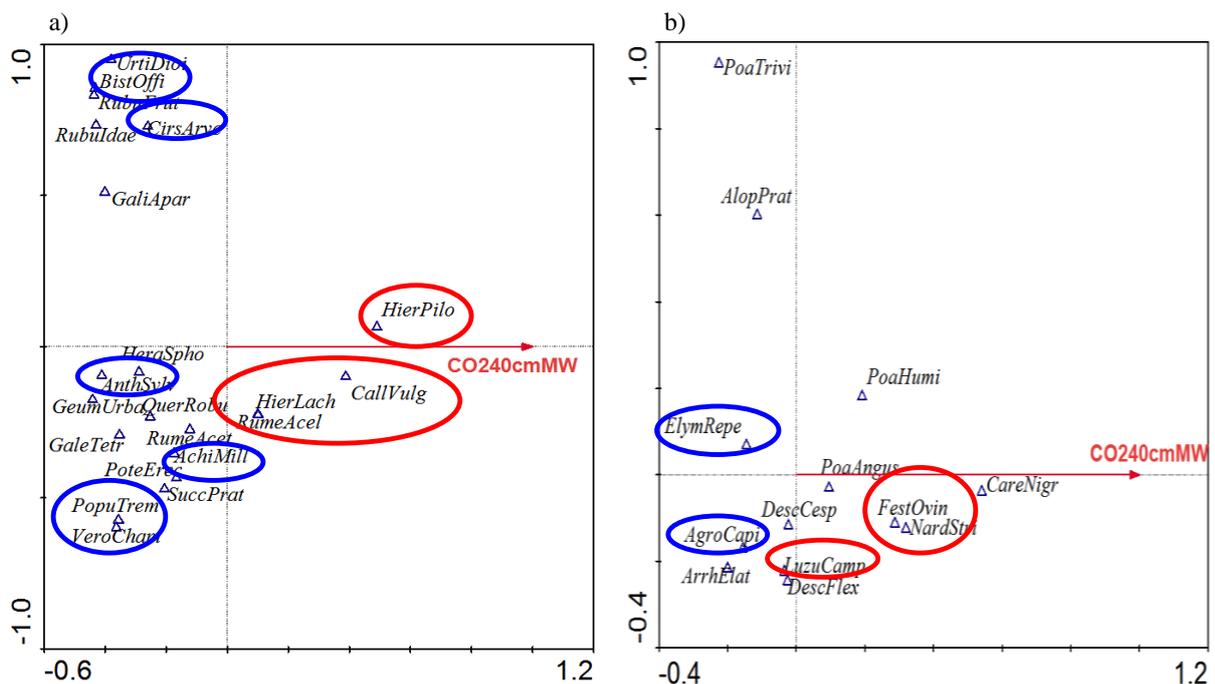


Abb. 70: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,569) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,174) und der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (Vektorpfeil). Die positiven MofettENZEIGER sind rot umrandet, die negativen blau. (Datenerhebung 2008)

Gleichzeitig ist mit der Abb. 70b festzustellen, dass eine positive Zeigerart ihren Schwerpunkt auf der anderen Seite des Vektorpfeils hat, *Luzula campestris*. Diese Art ist mit einer sehr geringen Individuenzahl in der Birnenmofette vertreten und zeigt ein überwiegendes Ausbreitungsverhalten in den Randbereichen der Ausgasungsstellen.

Die mofettophoben Arten haben durchgehend ihre Schwerpunkte auf dem gegenüberliegenden Teil des Vektorpfeiles. Zudem gibt es keine differenziertere Auftrennung des Artenspektrums innerhalb dieser Indikatorgruppe. Bei den dikotylen Arten liegen alle Artwerte ungefähr in einem identischen Bereich, während bei den monokotylen Pflanzen noch eine Dispersion vermerkt werden kann, durch die ein weiteres mofettovages Gras in Richtung der Pfeilspitze zugeordnet wird, *Poa angustifolia*.

Fazit

Die Interpretation dieser univariaten Korrespondenzanalyse spiegelt das unlängst diskutierte Verbreitungsverhalten der Indikatorgruppen und der mofettovagen Arten, bezüglich der CO₂-Exhalationen, in der Birnenmofette wider.

Auftrennung entlang der Gradienten aller gemessenen Bodeneigenschaften

Als nächstes werden die Resultate multivariater Korrespondenzanalysen vorgestellt. Beide Diagramme beruhen auf Datensätzen der Dikotyledonen und Monokotyledonen und allen erhobenen Bodenvariablen. Jedoch ersetzt der Stickstoff den organischen Mengenanteil. Nachdem in den oberen Analysen im Vordergrund stand, wie sich die Abhängigkeiten der Artzusammensetzungen, oder einzelner Arten, im Bezug auf die Bodenparameter äußern, soll mit diesen CCA-Diagrammen geklärt werden, in welchem Maße der Pflanzenbestand aufgetrennt wird, wenn alle Bodenparameter in die Analyse eingebracht werden. In Korrespondenzanalysen wird nicht ausschließlich die Zusammensetzung der Arten hinsichtlich der Bodeneigenschaften untersucht, sondern auch die Beziehung der Bodenfaktoren untereinander. In den oberen Abbildungen wurden immer Bodenfaktoren in den Analysen berücksichtigt, die sich gegenseitig bedingen, und wenn dies nicht zutraf, wurden sie separat in univariate Analysen eingegeben. Wie oben festgestellt wurde, konnte auf diese Weise sehr gut das ökologische Ausbreitungsverhalten der Pflanzen erklärt und bestätigt werden. In den unten folgenden Diagrammen soll überprüft werden, wie sich die Auftrennung der Arten vollzieht, wenn sowohl voneinander abhängige Bodeneigenschaften als auch konkurrierende in der Analyse berücksichtigt werden.

Anhand Abb. 71 kann zunächst festgestellt werden, dass neben den Bodeneigenschaften, Bodenfeuchte, Leitfähigkeit und Stickstoff, ebenfalls die Kohlendioxidkonzentrationen, der CO₂-Fluss und die Bodendichte in einer abhängigen Beziehung stehen. Außerdem zeigt sich auch hier, dass der pH-Wert in keiner Wechselwirkung mit einer anderen Bodenvariablen steht.

Bei genauer Analyse und Ziehen der Lote ist der Schwerpunkt von *Hieracium pilosella* sehr prägnant. Diese mofettophile Art weist eine stärkere Abhängigkeit zu erhöhten CO₂-Werten auf, als *Calluna vulgaris*, *Hieracium lachenalii* und *Rumex acetosella*. Gleichzeitig liegt der Artwert auch im Bereich niedriger Stickstoffwerte sowie geringer Bodenfeuchte. Die Abhängigkeit zum Stickstoffgehalt beruht auf der Tatsache, dass in den Bereichen der positiven Mofettenzeiger weniger Pflanzenabfall entsteht, als in den Kontrollbereichen.

Calluna vulgaris, *Rumex acetosella* und *Hieracium lachenalii*, haben ihre Schwerpunkte auf der Seite der Pfeilspitze die das CO₂ kennzeichnet und zugleich auf der anderen Seite des Vektorpfeils des pH-Wertes. Obwohl die Positionen ihrer Artwerte nicht so eindeutig sind wie bei *Hieracium pilosella*, wird trotzdem das erwartete ökologische Ausbreitungsverhalten der mofettophilen dikotylen Pflanzen bestätigt (Kap. 3.1.3.3).

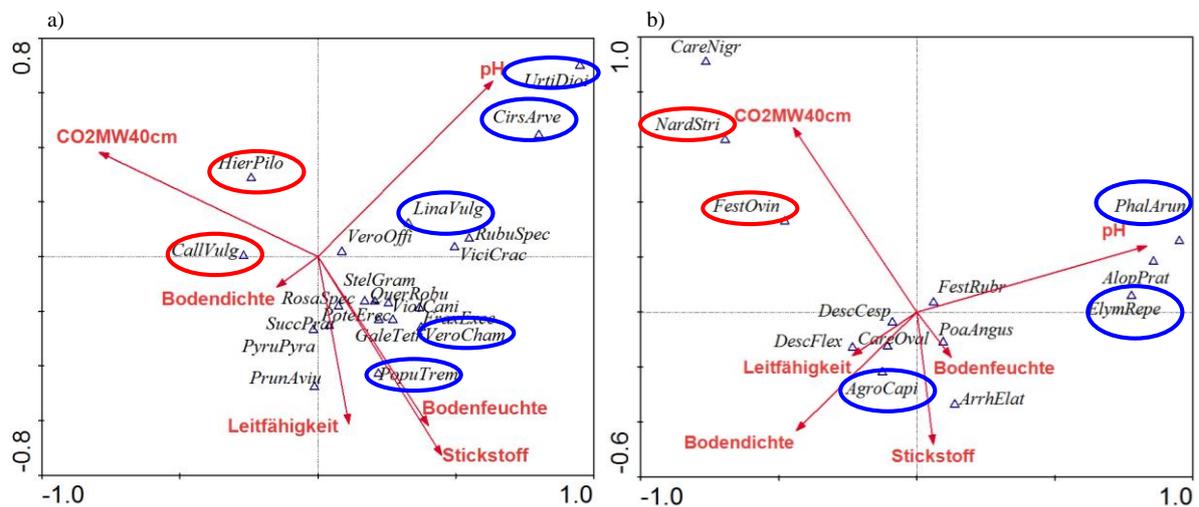


Abb. 71: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,662) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,478) mit Umweltvariablen aus 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeile). Die positiven Mofettenzeiger sind rot umkreist, die negativen Mofettenzeiger blau. (Datenerhebung 2009 und 2010)

Innerhalb der dikotylen mofettophoben Arten ist eine gute Auftrennung mit unterschiedlich gerichteten Schwerpunkten zu erkennen.

Während *Cirsium arvense*, *Polygonum bistorta* und *Urtica dioica* ihre Schwerpunkte bei schwach sauren pH-Werten haben, und die anderen Bodeneigenschaften weniger deren Verbreitungsverhalten bedingen, befinden sich die Artwerte für *Veronica chamaedrys* und *Populus tremula* offensichtlich in starker Abhängigkeit zu feuchten Böden, mit hohen Stickstoffanteilen. *Galium aparine* wurde in einen Bereich zwischen den Extremen der beiden Bodenvariablen eingeordnet. Diese multivariate Korrespondenzanalyse festigt die obigen Analysen des Verbreitungsverhaltens der mofettophoben Pflanzen, in Kap. 3.1.3.4. Des Weiteren äußert sich die ausgeprägte Dispersion der dikotylen Pflanzenarten entlang der vorgegebenen Umweltgradienten in der Birnenmofette in einem sehr guten Eigenwert von 0,662.

Die mofettophoben und mofettophilen Gräser haben ihre Schwerpunkte entsprechend der unlängst formulierten Schlussfolgerungen aus den Betrachtungen des Ausbreitungsverhaltens vor dem Hintergrund der ökologischen Zeigerwerte. Auffallend an Abb. 71b ist, dass in dieser

Korrespondenzanalyse der pH-Wert, die Kohlendioxidkonzentrationen und der Gasfluss auf die Auftrennung der Arten stärker einwirken, als die Bodenfeuchte, der Stickstoffgehalt, die Bodendichte oder die Leitfähigkeit.

Nardus stricta, *Festuca ovina* und *Luzula campestris* sind mit ihren Artwerten auf der entgegengesetzten Seite der Pfeilspitze des CO₂-Vektorpfeiles platziert, obschon sie eine unterschiedlich starke Abhängigkeit demonstrieren. Gleichzeitig befinden sie sich in dem Bereich niedriger Stickstoffgehalte, niedriger Bodenwassergehalte sowie erhöhter Bodenversauerung.

Die mofettophobe Grasart *Elymus repens* befindet sich in der Nähe des Koordinatenursprunges, was auf das teilweise indifferente Ausbreitungsverhalten der Art hindeutet. Die gleiche Annahme gilt für die Positionierung des Artwertes von der mofettovagen Pflanze *Deschampsia cespitosa*. Der negative Zeiger *Agrostis capillaris* tendiert mit seinem Schwerpunkt zur hohen Bodenfeuchtigkeit und zu hohen Stickstoffwerten, während er sich bezüglich des pH-Wertes vergleichbar mit den positiven Zeigerarten einordnet. An dieser Stelle wird deutlich, dass dieses Gras von den mofettophilen Arten aus den Mofettenbereichen verdrängt wird, denn die pH-Verträglichkeit ist ähnlich hoch.

Der Schwerpunkt von *Carex nigra* wirft Fragen auf. Zwar wird deutlich, dass sich das Verhalten dieses mofettovagen Grases an niedrigen pH-Werten sowie feuchten Böden mit geringen Stickstoffgehalten orientiert, jedoch zeigt sich keine Abhängigkeit zum CO₂ oder zum Gasfluss. Das ist verwunderlich, da es die stark CO₂-führenden Bereiche der Mofette überzieht. Daraus muss gefolgert werden, dass der entscheidende Umweltfaktor, für das hier beobachtete Verhalten des Grases nicht gemessen wurde.

Für *Alopecurus pratensis* und *Poa trivialis* ist auf Mofettenböden der pH-Wert die wichtigste Einwirkgröße. Dieser sollte im schwach sauren Bereich liegen, da die Wertespanne der Bodenfeuchte in der Fläche sehr schmal ist.

Fazit

Die CCA-Diagramme in Abb. 71 verdeutlichen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bodenparametern die mit anderen statistischen Mitteln in Kap. 3.1.3 nicht gezeigt werden konnten. Des Weiteren bietet diese umfassende Korrespondenzanalyse eine effiziente Zusammenfassung der zuerst gezeigten Analysen.

3.1.4.2 Dispersion unterschiedlich tief wurzelnder Arten entlang der Bodenparameter-Gradienten

Zum Abschluss werden CCA-Diagramme präsentiert, in denen die Datensätze anders aufgebaut wurden. Der Pflanzenbestand der Birnenmofette wurde nach der minimalen Wurzellänge der Arten, in vier Gruppen eingeteilt. Diese unterschiedlichen Gruppen wurden dann in den Analysen, identisch mit den vorherigen, entlang der Umweltgradienten aufgetrennt.

Die Positionierungen der Schwerpunkte der einzelnen Arten in den unten folgenden Abbildungen unterscheiden sich nicht prägnant von denen der oben dargestellten CCA-Diagramme. Dennoch lassen sich folgende Erkenntnisse aus den vier Abbildungen ableiten:

- ❖ In der Gruppe 0,0-10,0 cm Wurzellänge befinden sich ausschließlich mofettophile Arten und fast nur Gräser (Abb. 72a).
- ❖ Die Abb. 72b zeigt die Schwerpunkte der Arten mit einer Wurzellänge zwischen 10,1-20,0 cm. Diese Gruppe enthält mofettophobe, mofettophile und mofettovage Zeigerarten.
- ❖ Ab einer Wurzellänge von 20,1 cm enthalten die verbleibenden zwei Gruppen negative Zeiger und mofettovage Arten (Abb. 72c).
- ❖ In Abb. 72d ist auffällig, dass *Carex nigra* eindeutig in einer Abhängigkeit zum Kohlendioxid steht. Das bedeutet, dass es von dem Bodengas der tieferen Bodenschichten beeinflusst wird, was für die Anpassungen des Grases an hypoxische Bedingungen spricht.

Die mofettophilen und teilweise auch die mofettovagen Arten wachsen auf trockenen, schlecht durchlüfteten und stark sauren bis sauren Böden, was in den Diagrammen zum Ausdruck kommt (Abb. 72a,b). Die mofettophoben Pflanzen bevorzugen den Abb. 72c,d zur Folge Flächen mit Wasser- oder Nährstoffüberschuss. Nach Kutschera und Lichtenegger (1982) besitzen die vorgestellten Pflanzenarten in der Birnenmofette Anpassungen der Wurzeln an ihre Standortbedingungen. Es wäre noch zu klären ob ihnen diese morphologisch-anatomischen Wurzelveränderungen auf Mofetten Konkurrenzvorteile verschaffen.

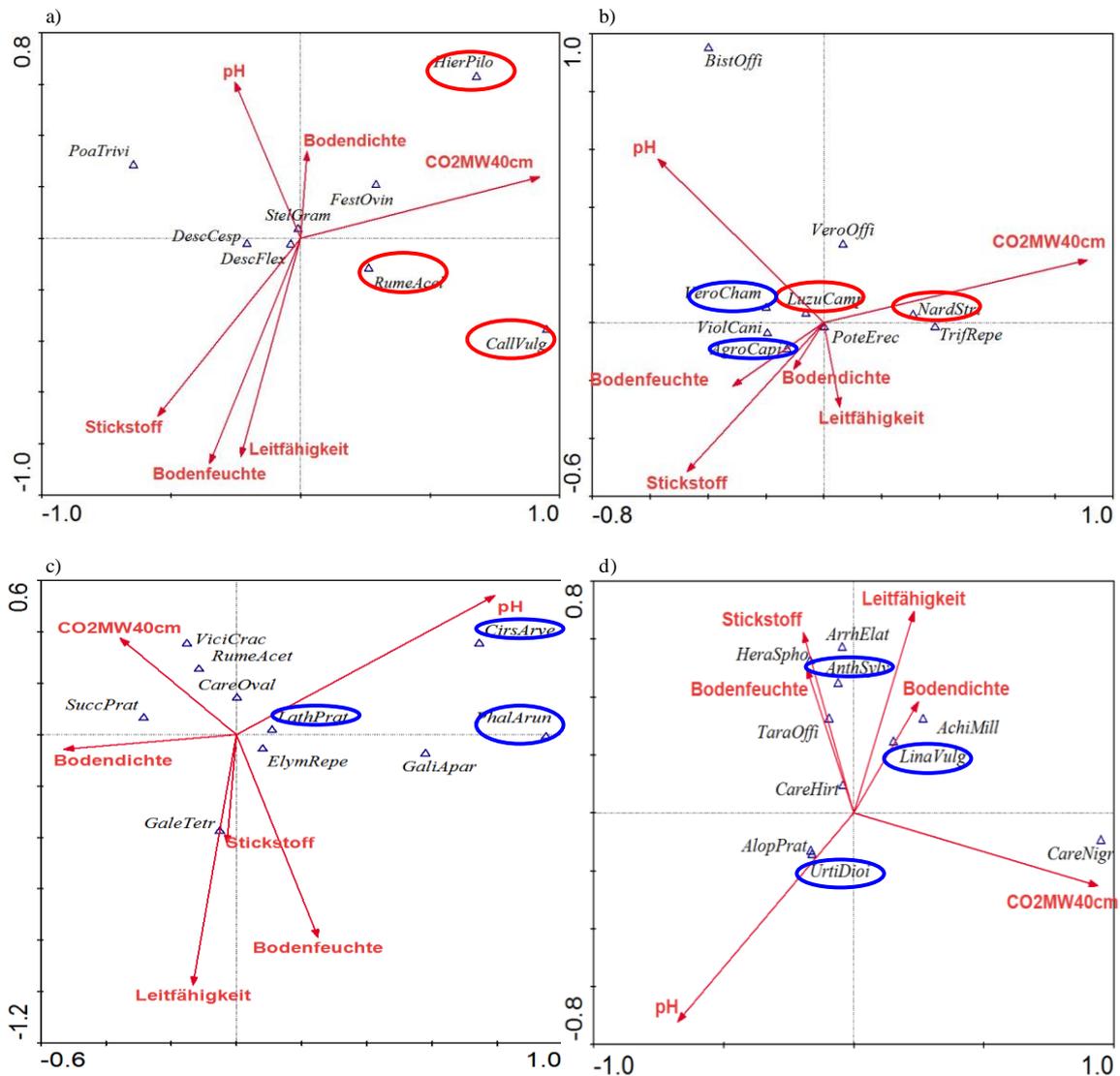


Abb. 72: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) sortiert nach den minimalen Wurzellängen von 0,0-10,0 cm (a) (Eigenwert=0,480), 10,1-20,0 cm (b) (Eigenwert=0,615), 20,1-40,0 cm (c) (Eigenwert=0,434) und >40,1 (d) (Eigenwert=0,700) und mit Umweltvariablen in 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeile). Die positiven Mofettenzeiger sind rot umrandet, die negativen blau. (Datenerhebung 2008 und 2009)

Fazit

Anhand Abb. 72 konnte gezeigt werden, dass die Längen der Pflanzenwurzeln entscheidend zu dem ökologischen Verhalten der Arten in der Birnenmofette beitragen.

Insgesamt hat sich durch die erstellten Korrespondenzanalysen gezeigt, dass diese statistische Methode ein effektives Instrument für die Auswertung solcher Datensätze darstellt. Es ist eindeutig in der Lage das ökologische Verhalten von Pflanzen unter Konkurrenzdruck in einem Pflanzenbestand zu verdeutlichen.

3.1.5. Jährliche Veränderungen im Pflanzenbestand der Birnenmofette

Die Auswertung der Vegetationsaufnahmen endet mit der Untersuchung der Stabilität des Pflanzenbestandes in der Mofette. Basierend auf der Tatsache, dass die Vegetation der am besten sichtbare Teil eines Ökosystems ist, spiegeln sich dort Veränderungen in anderen Teilen eines Ökosystems wider. Auch für Mofettenstandorte ist von Bedeutung, inwieweit und warum, es Variationen im Pflanzenbestand gibt. Dazu wurden seit 2008 (nicht in 2009) jährlich immer in den Juni- oder Julimonaten Aufnahmen der Präsenz und Deckungsgrade der einzelnen Arten des Bestandes durchgeführt. In den folgenden Abbildungen stehen die Veränderungen innerhalb der Indikatorgruppen und der mofettovagen Arten im Vordergrund. Bevor die Abbildungen einer detaillierten Interpretation unterzogen werden, wird jedoch geklärt, welche Arten der Vegetationsdynamik in diesem Zeitraum beobachtet werden können und welche nicht.

In der Veränderung von Pflanzenbeständen (Vegetationsdynamik) sind mehrere Typen zu unterscheiden, aufgrund der Dauer, Richtung und Art. Neben der Vegetationsgeschichte, die sich mit der langfristigen Entwicklung der Vegetation beschäftigt und infolgedessen keine Berücksichtigung in der vorliegenden Arbeit findet, wird noch zwischen der phänologischen Jahresrhythmik, den Schwankungen der Vegetation (Fluktuationen), und der Entwicklung der Vegetation (Sukzession) differenziert (Dierschke 1994). Auf die letzten drei genannten Arten der Vegetationsdynamik wird im Folgenden genauer eingegangen, da sie als Erklärungsansätze für mögliche Veränderungen des Pflanzenbestandes im Vordergrund stehen.

Die phänologische Jahresrhythmik umfasst kurzzeitige, jährliche und gesetzmäßige Veränderungen in einer Gesellschaft, aufgrund des klimatischen Jahresrhythmus. Dabei sind Wechsel von günstigen und ungünstigen Jahreszeiten von Bedeutung, sowie genetische Anpassungen der Pflanzen. Ein Beispiel hierfür wäre der Jahreszeitenaspekt innerhalb der Krautschicht des Waldes. Im Frühjahr, wenn der Laubaustrieb der Bäume noch nicht eingesetzt hat, dominieren die Frühblüher, die ihre Vegetationsperiode beendet haben, sobald die Bäume belaubt sind. Dann bestimmen hauptsächlich Arten die Krautschicht, die trotz des Lichtmangels, ihre Vegetationsperiode mit dem Laubaustrieb beginnen. In Mitteleuropa ist es überwiegend die Temperatur am Anfang und Ende der Vegetationsperiode, die diese Jahresrhythmik steuert.

Ein weiterer Typ der Vegetationsdynamik ist die Vegetationsschwankung (Fluktuation). Darunter werden längerfristige, rhythmische und räumliche Veränderungen verstanden, die sich um einen mittleren Zustand bewegen. Die Fluktuationen werden von wechselnden

Witterungsverhältnissen eines Jahres bestimmt, oder von anderen Ereignissen, wie zum Beispiel Überschwemmungen. Dabei können sie innerhalb oder zwischen zwei benachbarten Gesellschaften ablaufen.

Die Vegetationsentwicklung, oder Sukzession, unterscheidet sich von den beiden erst genannten Typen durch längerfristige, gerichtete Veränderungen in mehreren Gesellschaften. Es erfolgt eine Gesellschaftsabfolge, die durch plötzliche oder längerfristig gerichtete Standortveränderungen (exogen) oder durch die Vegetation selbst (endogen) induziert wird. Bei äußerlich gesteuerten Veränderungen der Standortbedingungen, passt sich die Vegetation an die neuen Umstände an. Im Falle der endogen ausgelösten Standortveränderungen, gestaltet die Vegetation den Standort so um, dass er für eine Folgegesellschaft günstiger wird. Sukzessionen werden nach unterschiedlichen Aspekten eingeteilt: Nach dem auslösenden Faktor, der Sukzessionsrichtung, der Fläche und der Zeit.

Die Einteilung nach dem auslösenden Faktor umfasst die endogene und exogene Sukzession, sowie einen Mischtyp aus beiden. Die von Pflanzen gesteuerte Sukzession bezieht sich auf Veränderungen in der Vegetation durch Ausbreitung oder Einwanderung von Arten, nach veränderten Standortbedingungen, wie zum Beispiel dem Humusgehalt, der Bodenfestigkeit oder des Mikroklimas. Von außen gesteuerte Sukzessionen umschließen standortbedingte Veränderungen sowie anthropogene Einflüsse.

Mit der Einteilung nach der Sukzessionsrichtung wird berücksichtigt, dass auslösende oder kontrollierende Faktoren, entweder stetig oder kurzzeitig wirken. Im ersten Fall ist die Sukzession nicht sofort deutlich sichtbar, sondern erst nach Langzeituntersuchungen, während im zweiten Fall die Veränderungen rasch ersichtlich sind.

Veränderungen in der Pflanzendecke finden auf unterschiedlich großen Flächen statt. Die Mikrosukzession läuft kleinflächig, innerhalb einer Gesellschaft ab, die lokale Sukzession auf einer überschaubaren Fläche, und die regionale Sukzession in größeren Gebieten.

Zuletzt erfolgt die Einteilung der Sukzession nach der Zeit, indem aktuelle, von säkularen Sukzessionen unterschieden werden. Aktuelle Sukzessionen umfassen einen Zeitraum in der Gegenwart oder jüngeren Vergangenheit, von mehreren Jahren bis Jahrzehnten, während die säkulare Sukzession in großen Zeiträumen stattfindet, und möglicherweise nur historisch nachgewiesen werden kann (Dierschke 1994).

Für vegetationsdynamische Untersuchungen in der Birnenmofette kommen nach den obigen Erläuterungen Fluktuationen und aktuelle kleinflächig überschaubare Sukzessionen zum Tragen, ausgelöst durch exogene (zum Beispiel Kohlendioxid) oder endogene (zum Beispiel massiver Wurzelfilz) Faktoren. Bezüglich des Kohlendioxids können Veränderungen im

Pflanzenbestand entweder schnell ersichtlich sein, beispielsweise aufgrund stark erhöhter Konzentrationen nach oder vor Schwarmbebenereignissen, oder schleichend, in dem Fall, dass sich die CO₂-Gehalte stetig geringfügig erhöhen. Die zweite Annahme kann für die Birnenmofette nicht gelten (Kap. 3.1). Die jahreszeitlichen Vegetationsrhythmiken können nicht berücksichtigt werden, da die Vegetationsaufnahmen einmal im Jahr stattfanden. Infolgedessen können keine jahreszeitlichen Aspektwechsel gezeigt werden, sondern ausschließlich der Aspekt der im Juni/Juli zu beobachten ist.

In der Abb. 73 sind die prozentualen Deckungsgrade der positiven Mofettenzeiger von 2008 bis 2014 abgebildet. Es wird schnell klar, dass die mofettophilen Pflanzen einen über die Jahre konstanten Bereich bedecken, der sich diagonal von Südosten nach Nordwesten (Kap. 2.2) über die Fläche zieht und demnach oberhalb der beiden Ausgasungsschwerpunkte (Kap. 3.1.1.1) liegt. Einzig die Deckungsgrade verändern sich in den Jahren geringfügig. Starke Veränderungen sind in den Ausläufern dieses stabilen Bereiches festzustellen.

Die jährlichen Veränderungen der Pflanzendecke bei den mofettophoben Pflanzen sind in Abb. 74 dargestellt. Wie bei den positiven Zeigern sind die Bereiche der negativen Zeigerarten über die Jahre nahezu stabil. Allerdings sind starke Schwankungen in den Deckungsgraden festzustellen. Auffallend ist, dass die Teilflächen in denen die Pflanzendecke der mofettophilen Arten die Ausläufer bildet, stetig von den negativen Indikatorarten eingenommen werden, teilweise zugleich mit den positiven. Ferner ist deutlich festzustellen, dass sich die mofettophoben Pflanzen vermehrt in den Aufnahmequadraten über den Ausgasungsstellen ausbreiten. Die Deckungsgrade erreichen zwar nur Werte von 2 bis 10%, dennoch ist die Tendenz eindeutig.

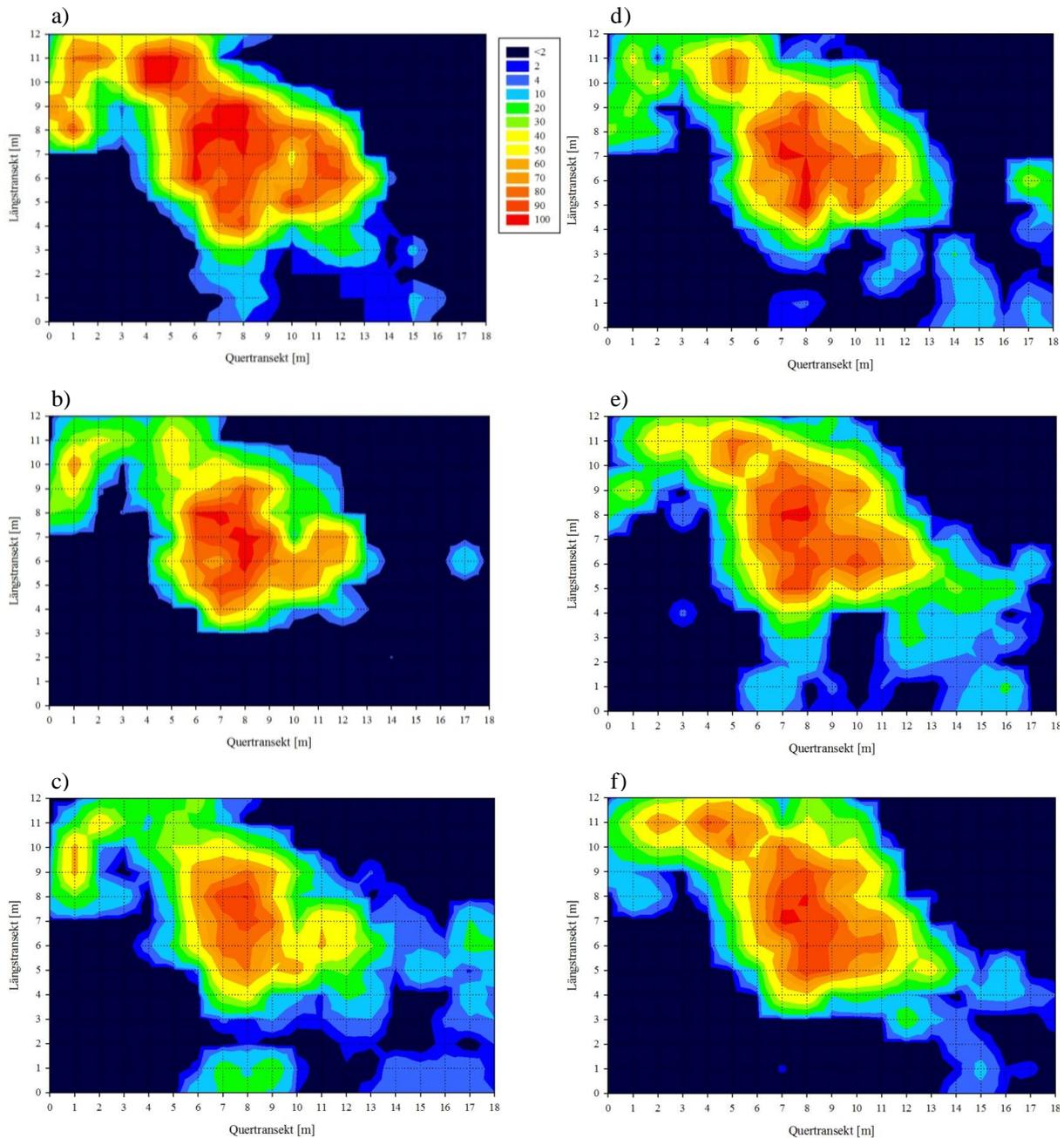


Abb. 73: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der positiven Mofettenzeiger pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Die Abb. 75 enthält die Deckungsgrade der mofettovagen Arten im Verlauf der Jahre. Insgesamt weisen die Abb. 75a-f ein unstetes Bild in den jährlichen Veränderungen der Pflanzendecke auf, die von den Arten dominiert wird, die keiner Zeigergruppe zugeordnet werden konnten. Im Jahr 2008 ist zu erkennen, dass sie sich hauptsächlich in den Aufnahmequadraten der Übergangsbereiche ausbreiten, in den Teilflächen der mofettophilen Ausläufer sowie in den Ausgasungsschwerpunkten. Seit dieser Aufnahme findet eine Rückbildung der mofettovagen Arten Pflanzendecke, hauptsächlich aus den CO₂-führenden

Aufnahmequadraten statt, jedoch auch aus den Kontrollflächen. Dafür vermehren sie sich im Südwesten der Fläche (Kap. 2.2). Bei der Vegetationsaufnahme von 2014 kann vermerkt werden, dass der Rückgang beendet ist und wieder eine erhöhte Verbreitung in den oben beschriebenen Quadraten stattfindet. Die Mächtigkeit der mofettovagen Pflanzendecke ist zumindest über den Ausgasungsbereichen wieder mit der in 2008 zu vergleichen.

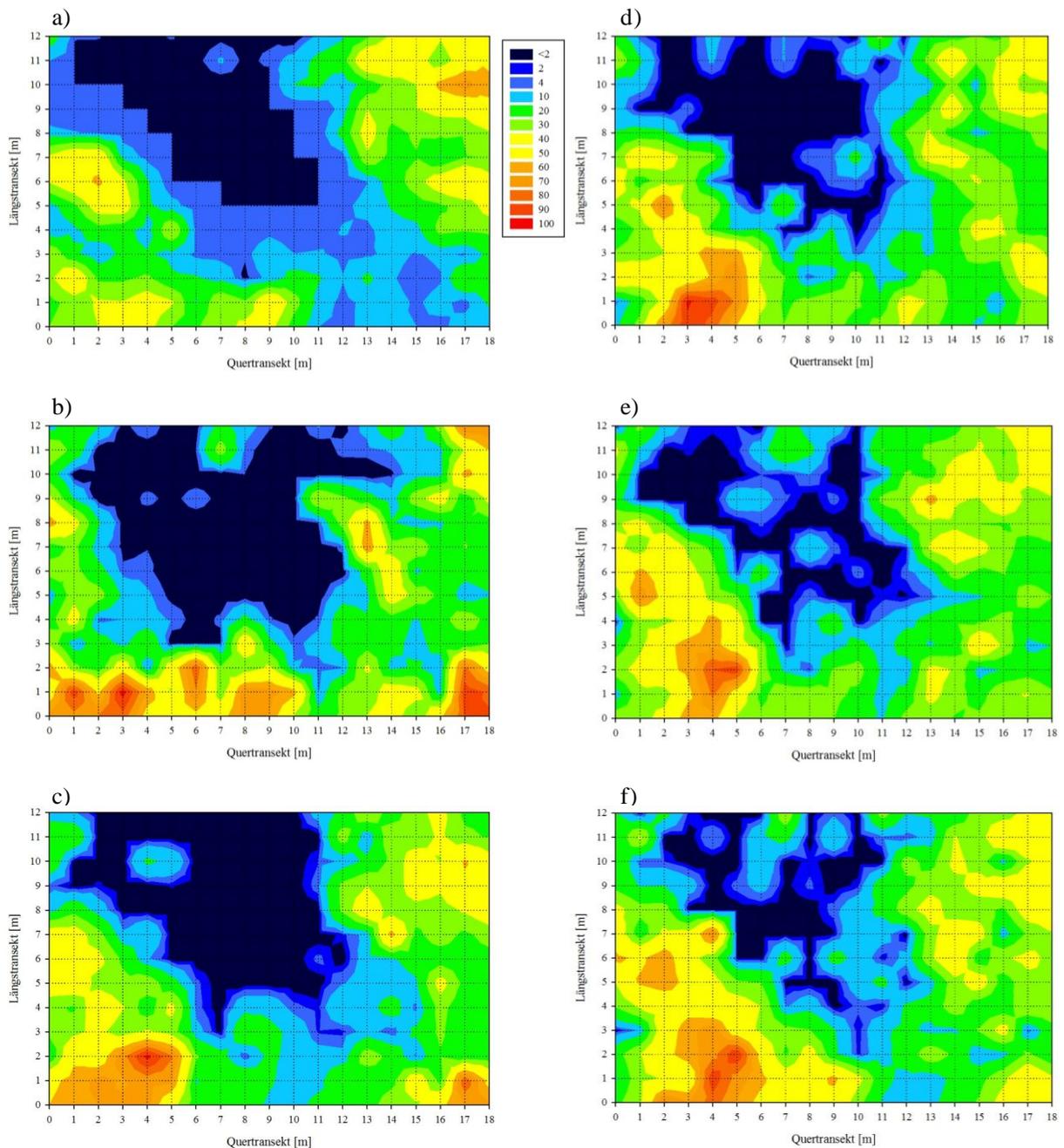


Abb. 74: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der negativen Mofettenzeiger pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

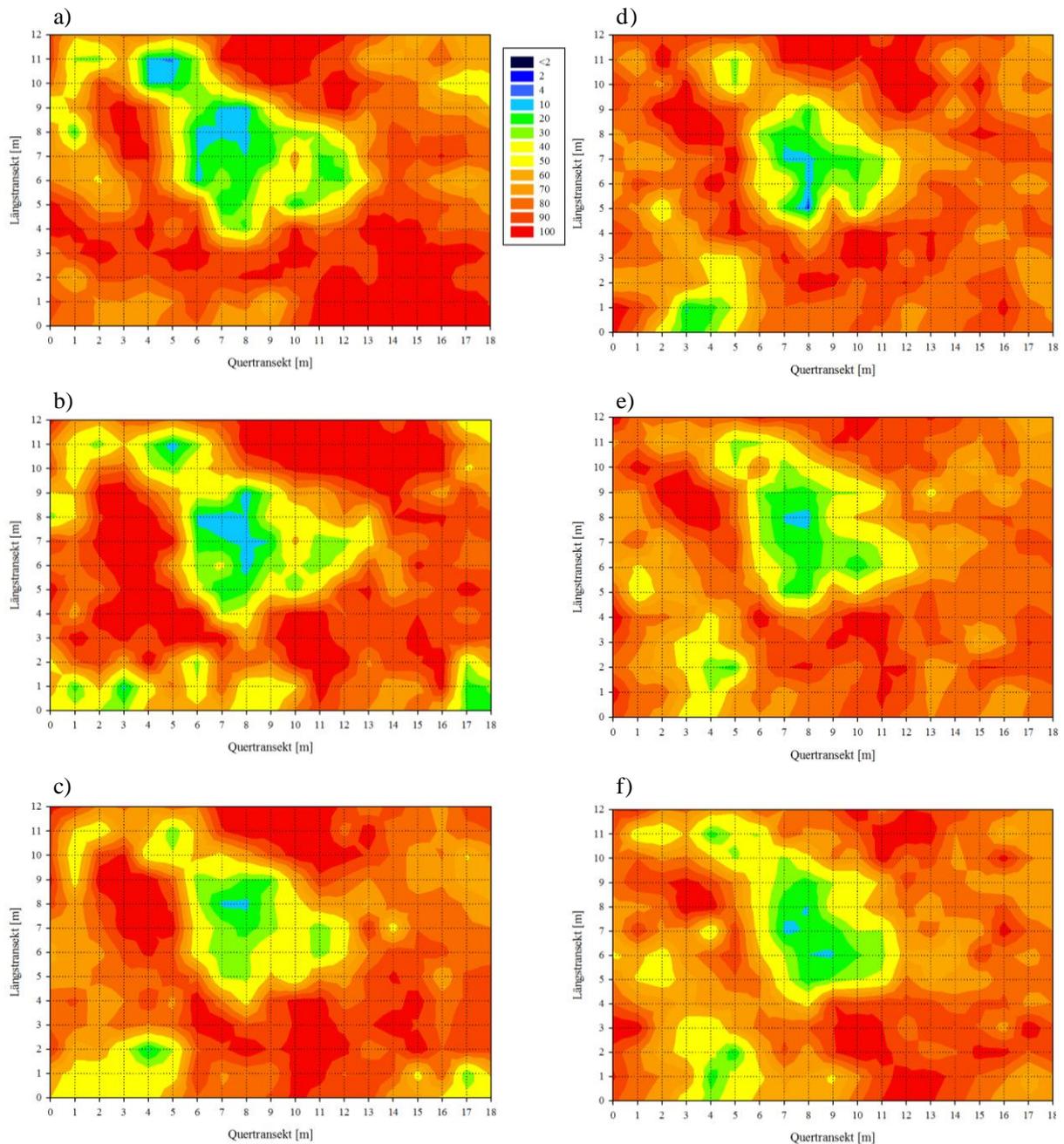


Abb. 75: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der mofettovagen Pflanzenarten pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

Bei einer Gegenüberstellung der Abb. 73-75 ist prägnant, dass der Kernbereich der positiven Mofettenzeiger im Verlauf der Jahre gleichbleibend ist, auch wenn es innerhalb dieser Aufnahmequadrate zu Veränderungen der beiden anderen Gruppen kommt. Die Teilflächen in denen die Ausläufer zu verzeichnen sind, werden von allen Pflanzengruppen unterschiedlich ausgeprägt bedeckt. Die höchsten Deckungsgrade werden dort von den mofettovagen Pflanzen erreicht, sowie in den Bereichen, in denen die mofettophoben Arten mittlere Deckungsgrade aufweisen. In den Jahren 2011, 2012 und 2013 hat jedoch eine Verdrängung

aus den Kontrollquadraten der mofettovagen, durch die mofettophoben Arten stattgefunden, sowie eine Verdrängung aus den stark CO₂-führenden Teilflächen, durch die mofettophilen Arten.

Diese Beobachtungen lassen darauf schließen, dass es CO₂-bedingte Variationen der Pflanzendecke gibt. Durch die unterschiedlichen CO₂-Verträglichkeiten der Pflanzenarten kommt es zu Verdrängungen unter den Indikatorgruppen und den mofettovagen Arten. In Tab. 27 sind Korrelationskoeffizienten aufgelistet, die die Stärke des Zusammenhanges, zwischen den Kohlendioxidkonzentrationen eines Jahres, und den Deckungsgraden der mofettophilen und mofettophoben Zeiger, sowie der mofettovagen Arten präsentieren.

Tab. 27: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe pro Aufnahmequadrat. Die Deckungsgrade sind die Rohwerte der Aufnahme, die CO₂-Werte sind Mittelwerte. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

CO ₂ /Vegetation	positive Zeiger	negative Zeiger	mofettovage Arten
2008/2008	0,69	-0,52	-0,53
2010/2010	0,61	-0,38	-0,46
2011/2011	0,61	-0,51	-0,41
2012/2012	0,66	-0,50	-0,35
2013/2013	0,64	-0,47	-0,38
2014/2014	0,65	-0,30	-0,42

Die Korrelationskoeffizienten ergeben durchgehend schwache Korrelationen, allerdings sind die Werte der positiven Zeigerarten wesentlich höher als die der negativen Zeiger und mofettovagen. Außerdem ist festzustellen, dass die Koeffizienten der positiven Indikatorgruppe stabiler sind als die der mofettophoben und mofettovagen Arten. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die mofettophilen Pflanzen langsamer auf Veränderungen in den CO₂-Konzentrationen reagieren als die anderen beiden Gruppen.

In Kap. 3.1.2.1 wurden die jährlichen Variationen in den CO₂-Gehalten vorgestellt. Demnach müssten die Deckungsgrade der positiven Mofettenzeiger massiv rückgängig sein. Ein Rückgang ist aber nicht zu beobachten. Die mofettophoben Arten nehmen in den Ausgasungsschwerpunkten zu. Sie profitieren offensichtlich von den niedrigen CO₂-Konzentrationen in den oberen Messtiefen der CO₂-führenden Bereiche. Dennoch bleiben die mofettophilen Pflanzen dominant und konkurrenzstark, sodass das Ausbreitungsverhalten der negativen Zeiger und der mofettovagen Pflanzen zumindest bislang nicht zu einer

Verdrängung, oder einem starken Rückzug, der positiven Zeigerarten geführt hat, sondern lediglich zu Fluktuationen um eine konstante Zusammensetzung der Pflanzendecke.

Die Stabilität im Verbreitungsverhalten der mofettophilen Pflanzendecke wird nochmals in Tab. 28 bestätigt. Die Ergebnisse basieren auf den Deckungsgraden der Indikatorgruppen in Bezug auf die erstmalige Gasmessung im Jahr 2008.

Tab. 28: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe pro Aufnahmequadrat. Die Deckungsgrade sind die Rohwerte der Aufnahme, die CO₂-Werte sind Mittelwerte. (Datenerhebung 2008 bis 2014)

CO₂/Vegetation	positive Zeiger	negative Zeiger	mofettovage Arten
2008/2010	0,59	-0,37	-0,47
2008/2011	0,50	-0,50	-0,40
2008/2012	0,67	-0,51	-0,35
2008/2013	0,67	-0,54	-0,36
2008/2014	0,72	-0,50	-0,43

Die Korrelationskoeffizienten für die positiven Zeigerarten sind im Laufe der Jahre immer viel höher als die der negativen und mofettovagen Arten. Das bedeutet, dass die Kohlendioxidkonzentrationen von 2008 nachhaltig die Ausbreitung der mofettophilen Arten auf der Birnenmofette bestimmen, auch wenn es zu jährlichen Unterschieden in den CO₂-Gehalten kommt. Dagegen sind die Zusammenhänge bei den mofettophilen Zeigern nicht dermaßen eindeutig, aufgrund der oben formulierten Annahme, dass diese Arten schneller auf Veränderungen reagieren als die positiven Zeigerarten. Das gleiche ist für die mofettovagen Arten anzunehmen.

Fazit

Die Auswertung der jährlichen Veränderungen im Pflanzenbestand der Birnenmofette lassen erkennen, dass die Ausbreitung der zwei Indikatorgruppen sowie der mofettovagen Arten konstant ist, und nachhaltig durch die CO₂-Anreicherungen bestimmt wird. Zum Teil konnten Fluktuationen in den drei Gruppen festgestellt werden, die durch die Ausgasungen meist zu Lasten einer anderen stattfanden. Die stabilste Verteilung weisen jedoch die positiven Mofettenzeiger auf, so dass die größten Schwankungen bei den negativen Mofettenzeigern oder den mofettovagen Arten festzustellen sind.

3.2 Die Moosmofette

Anders als die Birnenmofette wurde die Moosmofette erst im März 2009 zu einem Untersuchungsstandort des Mofettengebietes erklärt. Seitdem wurden ebenfalls jährlich im März und zusätzlich vierteljährlich CO₂- und O₂-Konzentrationen gemessen. Auch die Erfassung der Vegetation erfolgte jährlich. Abgesehen von diesen Messungen fanden alle anderen Untersuchungen einmalig statt. Im März 2009 wurde mit folgenden Messungen in der Moosmofette begonnen: CO₂- und O₂-Konzentration, pH-Wert, Leitfähigkeit, Wassergehalt und Anteil des organischen Gehaltes an der Festphase. Im März 2013 folgten Messungen der Bodendichte und des CO₂-Flusses.

Im Gegensatz zu anderen untersuchten Mofettenstandorten, wie beispielsweise Birnenmofette, Nardusmofette (Greiß 2008, Saßmannshausen 2010), Hartoušov-Wiese (Saßmannshausen 2010), Sumpfmofette oder Schneckenmofette (Pelz 2010), galten für die Moosmofette andere Auswahlkriterien. Optisch zeigte die Mofette bei ihrer Entdeckung die typischen Merkmale eines Mofettenstandortes, während die ersten Kohlendioxidmessungen sehr niedrige Konzentrationen aufwiesen. Dennoch waren eindeutig Anzeichen dafür vorhanden, dass auch in dieser Fläche stark erhöhte Kohlendioxidexhalationen geherrscht haben mussten. Zum Einen zeigte die Vegetation eine entsprechende Artenzusammensetzung- und Abfolge innerhalb der Mofette, zum Anderen war auch der Boden vergleichbar mit dem der Birnenmofette oder der Hartoušov-Wiese. Diese teilweise widersprüchlichen Ergebnisse führten zu der Vermutung, dass man es hier mit einem sich stark in Rückentwicklung befindlichen Mofettenstandort zu tun habe. Es bot sich also die Chance wegen möglicher zurückgehender Ausgasungen, Sukzessionen der Vegetation beobachten zu können.

Unter der Berücksichtigung, dass die Diffusionswege des Kohlendioxids Veränderungen unterworfen sind (Kap. 3.1.2.1), kann mit Veränderungen im Bodengas und somit in der Vegetation gerechnet werden. Die Messungen der oben genannten Bodeneigenschaften und der Vegetation sollen klären, ob und wie sich die Bodengaszusammensetzung verändert und wie die Vegetation auf diese Veränderungen reagiert. Bei der Auswertung der Messdaten und ihrer Interpretation sind die gleichen Maßstäbe anzusetzen wie bei der Birnenmofette.

3.2.1 Die Pedosphäre in der Moosmofette

In der bodenkundlichen Beschreibung der Mofette wird der gleiche Aufbau wie in der Birnenmofette (Kap. 3.1.1) beibehalten. Sie beginnt demnach mit den Ergebnissen der untersuchten Bodeneigenschaften: Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentration, Gasfluss und

Wassergehalt. Anschließend folgen die Resultate der Messungen der festen Bodenbestandteile, der pH-Werte und der Bodendichte.

3.2.1.1 Bodengasuntersuchungen

Kohlendioxid

Die Verteilung der CO₂-Konzentrationen in der Moosmofette ist in Abb. 76 dargestellt. Auch in dieser Untersuchungsfläche sind steigende Kohlendioxidkonzentrationen mit zunehmender Bodentiefe zu konstatieren.

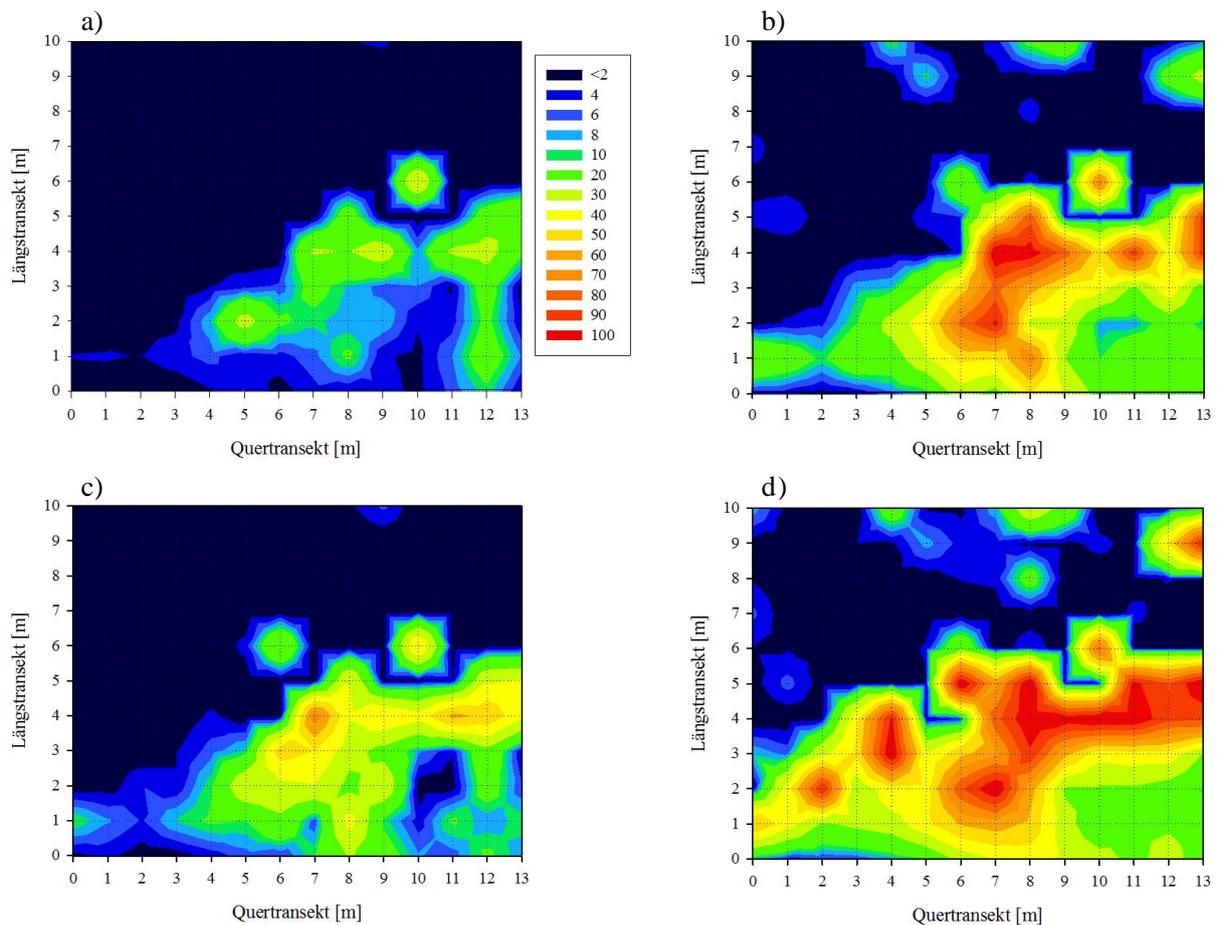


Abb. 76: CO₂-Konzentration [%] in einer Bodentiefe von 10 bis 60 cm a) bis d) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

In 10 cm Tiefe hebt sich bereits ein zusammenhängender Ausgasungsbereich hervor, in dem die CO₂-Konzentrationen Werte von 2 bis 20% erreichen. Partiiell steigen die Kohlendioxidwerte in den gasenden Stellen auf über 20% an, bis sie einen Anteil von maximal 26 % im Bodengas erreichen. Diese Mofettenzone zieht sich von Nordosten nach Nordwesten (Kap. 2.2) und grenzt sich aufgrund der 2%-Isolinie deutlich von einem den Mofettenbereich überragenden Kontrollbereich ab, in dem die CO₂-Konzentrationen 2% nicht

übersteigen. Zusätzlich sind in der Fläche einzeln verteilte CO₂-Ausgasungen zu erkennen. In einer dieser punktuellen Exhalationsstellen wurden 31% CO₂ gemessen.

In 20 cm Bodentiefe vergrößert sich der Ausgasungsbereich geringfügig, jedoch steigen die Kohlendioxidwerte teilweise beträchtlich bis zu 65% CO₂ an. Die bereits in 10 cm Tiefe auftretenden Ausgasungen treten ebenfalls deutlicher hervor.

Bei der Betrachtung der 40 und 60 cm Abbildungen fällt die starke Erhöhung der Kohlendioxidkonzentrationen in der Mofettenzone auf 100% auf, aber auch die Verkleinerung des Kontrollbereiches, vor allem in 60 cm Tiefe. In einer Bodentiefe von 40 cm sind die einzelnen Exhalationsstellen räumlich noch sehr begrenzt, hingegen verbinden sie sich in 60 cm Tiefe zu zusätzlichen Flächen. Besonders auffallend ist dies nordwestlich und südlich des Mofettenbereiches. Ferner sind in 40 cm Bodentiefe neue gasende Stellen mit erhöhten CO₂-Anteilen auszumachen. Im Vergleich zu den oberen Bodenschichten ist der Kontrollbereich der Moosmofette in einer Tiefe von 60 cm deutlich vermindert.

Die Kohlendioxid-Gasmessungen kennzeichnen den Untersuchungsstandort als Mofette. Vergleichbar mit anderen Untersuchungsflächen steigen die CO₂-Konzentrationen mit zunehmender Bodentiefe (Kap. 3.1.1.1). Im Gegensatz zur Birnenmofette sind die Kohlendioxidgehalte im Bodengas in den oberen Bodenzentimetern wesentlich niedriger und stark erhöhte Konzentrationen sind auch in den tieferen Bodenschichten spärlicher vorhanden. Dem ungeachtet erreicht der Mofettenbereich ab 40 cm Bodentiefe eine den Kontrollbereich überragende Größe.

Die räumliche Verteilung des Mofettengases in der Pedosphäre der Moosmofette weist folglich Parallelen zu Gasmessungen an anderen Mofettenstandorten auf (Miglietta et al. 1993; Vodnik et al. 2006; Saßmannshausen 2010). In Kap. 3.1.1.1 wurde bereits beschrieben, dass die Bodeneigenschaften eines gleyartigen Reduktosols die Verteilung des Kohlendioxids im Porenraum beeinflussen.

Sauerstoff

Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen in der Moosmofette bilden die CO₂-Konzentrationen spiegelbildlich ab. Aufgrund des antagonistischen Verhaltens dieser beiden Gase, ist das Bodengas in dem eigentlichen Mofettenbereich sauerstoffärmer als in dem Kontrollbereich. Dem gegenüber sind die Sauerstoffwerte in den nicht-gasenden Bereichen hoch (Abb. 77).

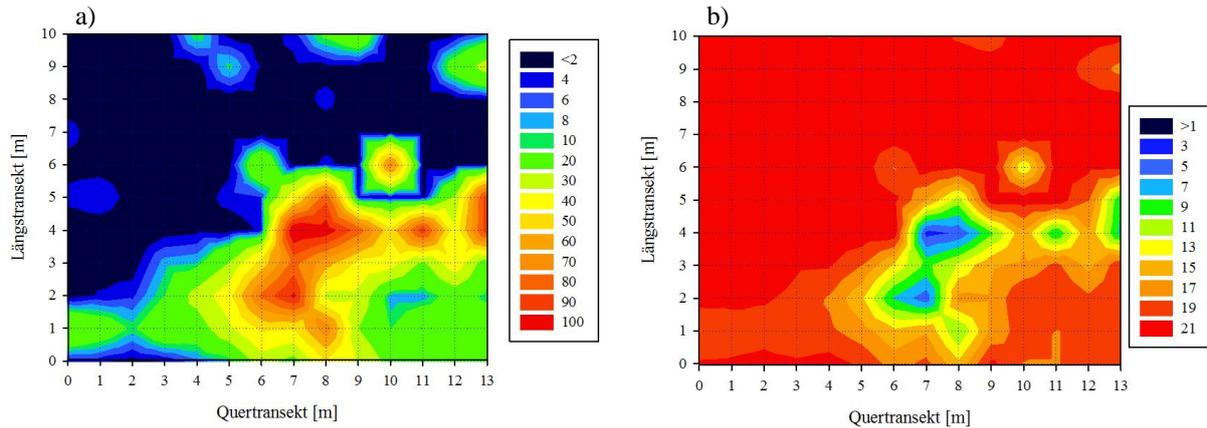


Abb. 77: Vergleich der CO₂-Konzentration [%] (a) und der O₂-Konzentration [%] (b) in 40 cm Bodentiefe der Moosmofette. Die jeweilige Färbung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

An Messpunkten mit stark erhöhten CO₂-Konzentrationen wird der Sauerstoff durch das Kohlendioxid verdrängt, folglich wird der Boden anaerob.

Der Abb. 77 ist zu entnehmen, dass an den stark gasenden Stellen, in denen die Kohlendioxidwerte bei 90 bis 100% liegen, hypoxische Bedingungen erreicht werden. Hier wurden Sauerstoffwerte von 4% gemessen. In direkter Nähe zu den Ausgasungsbereichen betragen die CO₂-Konzentrationen 40 bis 80%, und die Sauerstoffkonzentrationen sinken dort auf 12 bis 6%. Im Übergangsbereich zwischen der Mofettenzone und dem Kontrollbereich hat das CO₂ einen Anteil von 4 bis 10% am Bodengas, dementsprechend ist der Sauerstoffanteil höher; er liegt bei 15 bis 18%. Der CO₂-unbelastete Teil der Moosmofette hat einen luftgefüllten Porenraum mit stabilen Sauerstoffwerten um 20%. Der Abb. 78 ist der steigende Sauerstoffmangel mit zunehmender Bodentiefe zu entnehmen. Zunächst sind die anaeroben Bereiche des Bodens kleinflächig. Aber bereits in 20 cm Tiefe verbinden sich diese Stellen miteinander, so dass schrittweise eine sauerstoffarme Zone innerhalb der Moosmofette entsteht. Ab einer Bodentiefe von 40 cm hebt sich diese Zone unterscheidbar von einem sauerstoffreichen Bereich ab.

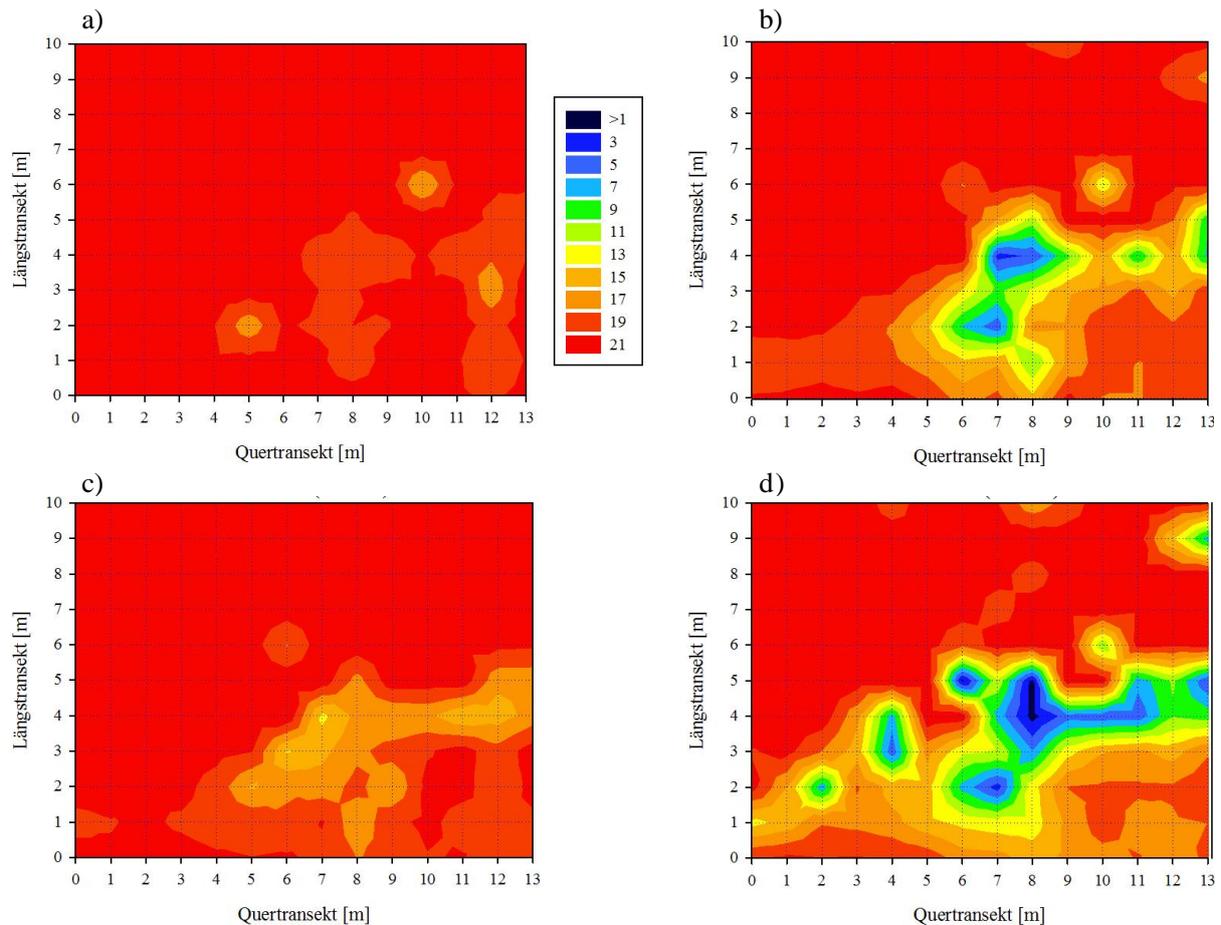


Abb. 78: O₂-Konzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Für eine Überprüfung der starken Korrelation von Kohlendioxid und Sauerstoff wurden auch für die Untersuchung der Moosmofette die Messdaten beider Gase einer statistischen Analyse unterzogen (Abb. 79). Der stark negative Zusammenhang kann ebenfalls in dieser Untersuchungsfläche bestätigt werden. Ferner zeigt die Analyse der bivariablen Verteilung, dass das Bestimmtheitsmaß mit zunehmender Bodentiefe stärker wird und somit der lineare Zusammenhang zwischen den Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen. Aufgrund fehlender Störfaktoren in der bodennahen Luftschicht wird der Gasaustausch zwischen der Pedosphäre und der Atmosphäre in den unteren Messtiefen geringer (Kap. 3.1), wodurch sich die Abhängigkeit verstärkt.

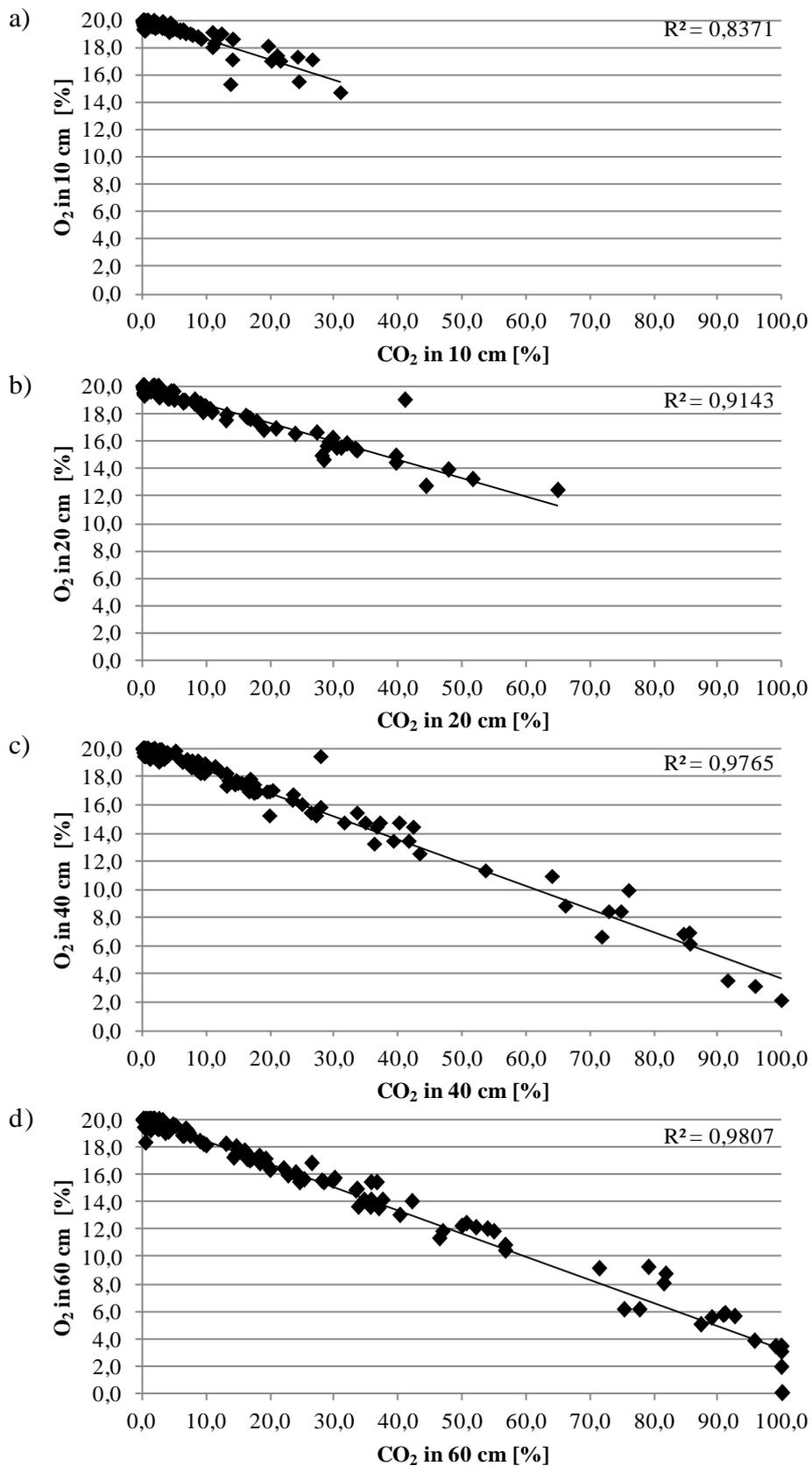


Abb. 79: CO₂- und O₂-Antagonismus in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Moosmofette. (Datenerhebung März 2009)

Fazit

Die Gasmessungen haben gezeigt, dass die Untersuchungsfläche korrekterweise als Mofettenstandort bezeichnet wird. Ein geschlossener gasender Bereich wird von einem nicht-gasenden Bereich umschlossen. In der Birnenmofette stiegen die CO₂-Konzentrationen mit zunehmender Bodentiefe. Diese Beobachtung wird durch die Messungen in der Moosmofette wiederholt, ebenso die Beobachtung der starken Heterogenität der CO₂-Verteilung aufgrund der Bodenbeschaffenheit. Weiterhin konnte der Antagonismus zwischen den beiden Gasen Kohlendioxid und Sauerstoff bestätigt werden.

3.2.1.2 Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen an der Erdoberfläche

Wie für die Birnenmofette (Kap. 3.1.1.2) wurden auch für die Moosmofette die Abbildungen der Gaskonzentrationen an der Erdoberfläche berechnet (Abb. 80).

Mithilfe von Abb. 80 ist deutlich zu erkennen, dass die Abbildungen aus den kalkulierten Werten ziemlich genau mit den Abbildungen der gemessenen CO₂-Konzentrationen in 10 cm Bodentiefe übereinstimmen. Sowohl Abb. 80a,c, als auch 80b,d sind nahezu deckungsgleich. Demnach herrschen auch in der Moosmofette unter windstillen Verhältnissen hypoxische Bedingungen über den Exhalationsbereichen.

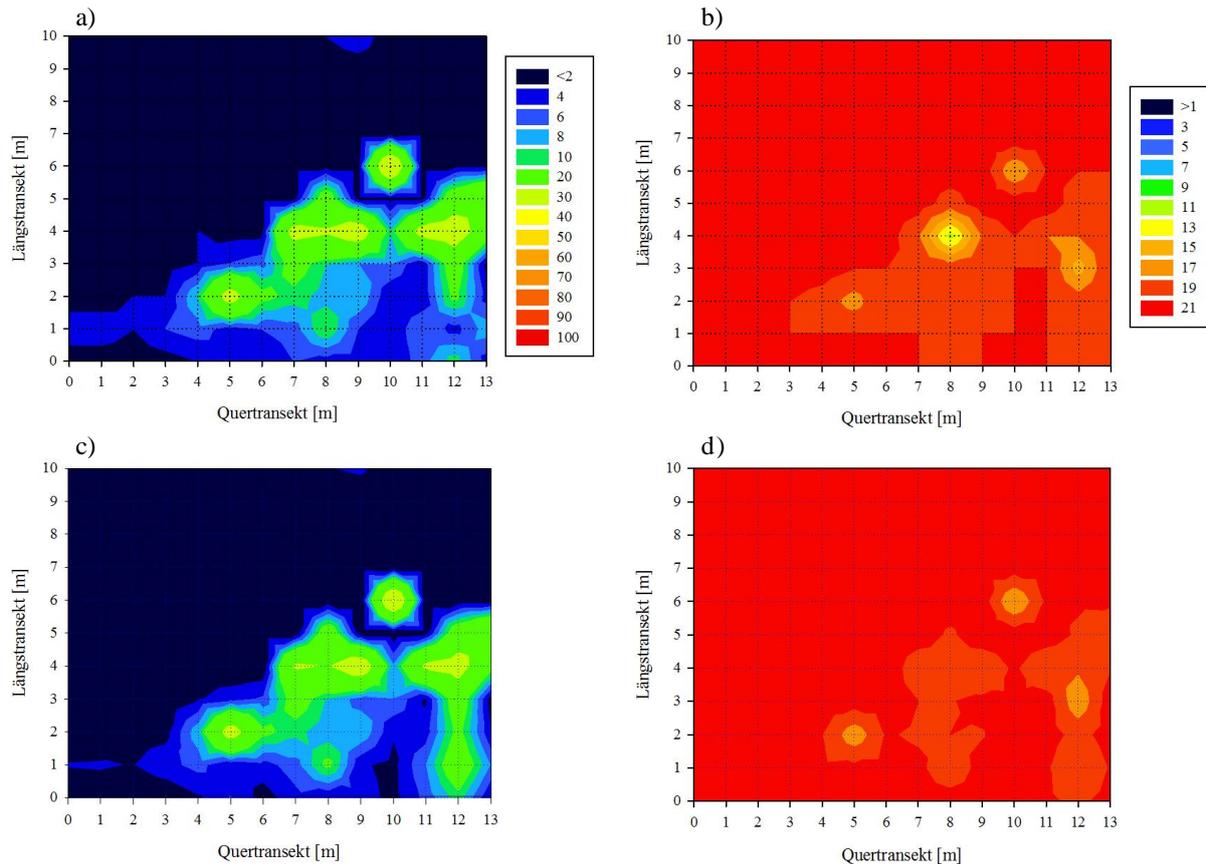


Abb. 80: Vergleich der CO₂- und O₂-Konzentration [%] auf der Erdoberfläche (a) und (b) mit der CO₂- und O₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) und (d) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Fazit

Unter Zuhilfenahme der Abb. 80 konnte die gute Anwendbarkeit der Methode zur Ermittlung fehlender Werte bestätigt werden. Sie ermöglicht Vermutungen über die Gaszusammensetzung der bodennahen Luftschicht.

3.2.1.3 Gasfluss

Zusätzlich zu dem CO₂-Anteil an der Bodengaszusammensetzung wurde in der Moosmofette im März 2013 auch der CO₂-Fluss am Boden ermittelt (Abb. 81).

Analysiert man den Gasfluss vor dem Hintergrund der CO₂-Konzentration, ist festzuhalten, dass er vorwiegend im hochkonzentrierten Mofettenbereich stark erhöht ist (Abb. 81a,c). An vereinzelt Stellen beträgt der Gasfluss zwischen 50 und 90 mol CO₂ m⁻² d⁻¹, und an einem Messpunkt erreicht er 651 mol CO₂ m⁻² d⁻¹. Größtenteils ist der Fluss aber mit Werten von 2 bis 50 mol CO₂ m⁻² d⁻¹ sehr gering (Chiodini et al. 1997; Etiope 1999).

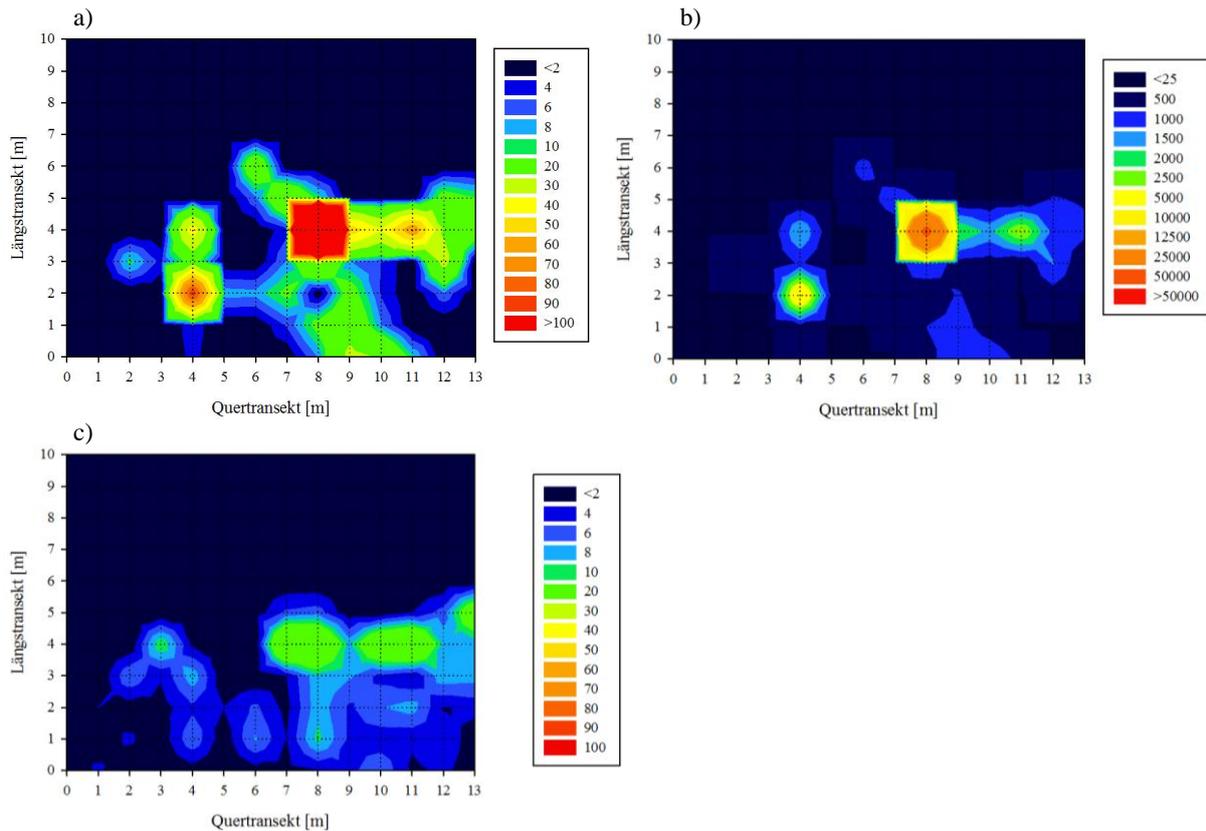


Abb. 81: CO₂-Fluss [mol CO₂ m⁻² d⁻¹] (a), CO₂-Fluss [g CO₂ m⁻² d⁻¹] (b), und CO₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) in der Birnenmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Im Vergleich mit der Birnenmofette sind die Werte des CO₂-Flusses der Moosmofette geringer. Dennoch liegen sie in der durch Kämpf et al. (2013) ermittelten Wertespanne (Abb. 81b), mit einem Minimum von ungefähr 140 g CO₂ m⁻² d⁻¹ und einem Maximum von circa 29000 g CO₂ m⁻² d⁻¹.

Auch in der Moosmofette war es nicht möglich die Bodenatmung zu messen. Dennoch konnten in den nicht-gasenden Bereichen CO₂-Gehalte von 0 bis 3% verzeichnet werden. Folglich ist davon auszugehen, dass die stark herabgesetzte Bodenatmung nicht erfasst werden konnte. Die Messung des Gasflusses fand während des gleichen Messaufenthaltes statt, unter den gleichen klimatischen Bedingungen; folglich wären auch für diese Fläche die aufgeführten Erklärungen zutreffend (Kap. 3.1.1.3).

Ein Vergleich der Abb. 81a-c lässt erneut auf einen Zusammenhang zwischen dem CO₂-Fluss und den CO₂-Konzentrationen schließen, der aber mit der aktuellen Datengrundlage nicht statistisch belegt werden kann.

Fazit

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Gasflusswerte in der Moosmofette ebenfalls in dem ermittelten Wertebereich für das Untersuchungsgebiet liegen. Vergleichbar mit den Resultaten in der Birnenmofette sind die höchsten Gasflüsse in den gasenden Bereichen der Moosmofette zu finden. Da die Gasflussmessungen in der Moosmofette unter denselben Bedingungen wie in der Birnenmofette gemacht wurden, konnten die Erklärungsansätze aus Kap. 3.1.1.3 auch für die Auswertung des CO₂-Flusses in der Moosmofette verwendet werden.

3.2.1.4 Bodenwasser

In Abb. 82a wird der Bodenwassergehalt in der Moosmofette dargestellt.

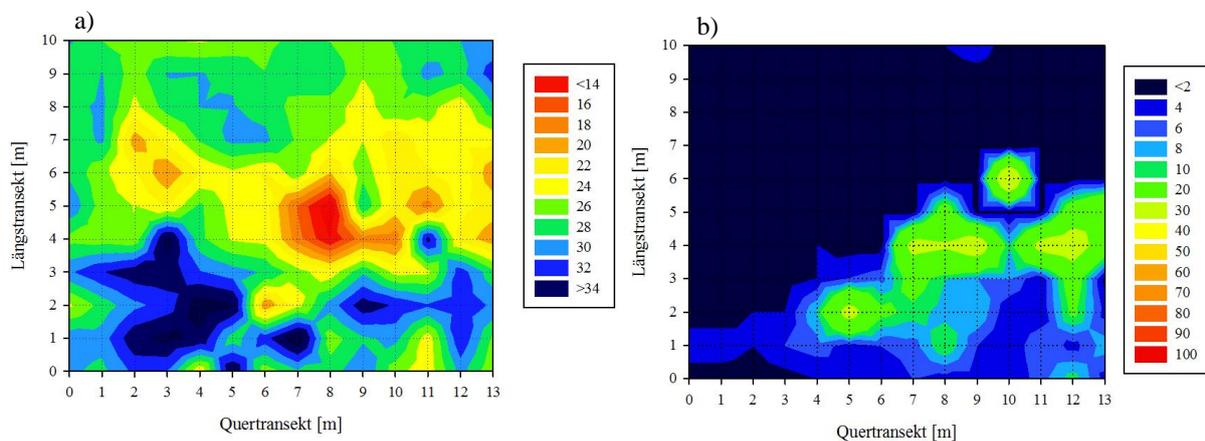


Abb. 82: Bodenwassergehalt [%] in einer Bodentiefe zwischen 7 und 13 cm (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Die Verteilung des Bodenwassers in der Fläche ist dreigeteilt. Dieses Resultat kann sowohl auf die Geländeneigung die sich von Süden nach Norden erstreckt (Kap. 2.2), als auch auf die Existenz eines künstlich angelegten Wassergrabens zurückgeführt werden. Dieser befindet sich parallel zu dem untersten Quertransekt, wodurch es dort nie zu einer Austrocknung des Bodens kommt. Folglich verfügt der untere Teil der Fläche (Transekte 0 bis 3) über einen hohen Wassergehalt von 20 bis über 34%, während der obere Bereich (Transekte 7 bis 10), mit Werten von 22 bis 32% mäßig feucht ist. In den Transekten 4 bis 7 befindet sich, mit einem Bodenwassergehalt von unter 14 bis 30%, der trockenste Teil der Fläche. Dort ist auch die stärkste Neigung des Geländes zu verzeichnen, welche in diesem Bereich des Standortes einen Oberflächenabfluss von Niederschlagswasser begünstigt. Das könnte einen weiteren Wassereintrag im Norden der Moosmofette zur Folge haben und gleichzeitig eine

Austrocknung des Bodens an den Messpunkten zwischen dem vierten und siebten Quertransekt. Zusätzlich ist festzustellen, dass in diesen Messquadraten die höchsten CO₂-Werte lagen (Abb. 82b).

Im Gegensatz zur Birnenmofette, bei der optisch ein Zusammenhang zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengas zu bestehen schien, ist dies in diesem Fall nur teilweise erkennbar. Das wird durch eine Korrelationsanalyse zwischen diesen beiden Bodenvariablen bestätigt, und wiederholt somit den fehlenden statistischen Zusammenhang.

Fazit

Die Messungen der Bodenfeuchte führten zu dem Ergebnis, dass die Fläche eine Dreiteilung aufweist: Die südlichen Transekte sind mäßig feucht, die mittleren Transekte sind trocken und die nördlichen Transekte sind feucht. Diese Einteilung konnte mit der Bodenbeschaffenheit, der Geländeneigung und der Wasserzufuhr im nördlichen Teil der Fläche begründet werden.

3.2.1.5 Organische Mengenanteile an der Festphase

Der organische Anteil des Bodens zeigt ebenfalls eine prägnante Dreiteilung der Untersuchungsfläche (Abb. 83a). In südlicher Richtung (Transekte 7 bis 10) beträgt der organische Anteil des Bodens überwiegend 12 bis 16%. Nach Norden hin (Transekte 4 bis 7) nimmt der Mengenanteil massiv ab und weist größtenteils nur noch Werte von unter 10% auf. Hingegen steigen die Werte in den Transekten 0 bis 4 abermals auf 12 bis 20% an. Der blaugefärbte Bereich im Nordwesten der Moosmofette ist zu vernachlässigen, da durch die Aufschüttung von Bauschutt dort keine Pflanzen wachsen können.

In der Birnenmofette wurden vorwiegend mäßige organische Anteile im Bodensubstrat gemessen. Auch in der Moosmofette sind die Anteile der organischen Substanz als mäßig bis sehr gering einzustufen.

Erfolgt die Auswertung des organischen Gehaltes vor dem Hintergrund der CO₂-Konzentrationen (Abb. 76), wird direkt offensichtlich, dass optisch nur partiell ein Zusammenhang besteht. Abweichend von der Birnenmofette, in der die Stellen mit den höchsten Anteilen organischer Substanz in den CO₂-Zentren lagen, trifft dieser Sachverhalt nur an vereinzelt Stellen zu. Der größte Teil des Bereiches mit niedrigen Anteilen organischen Substrates in der Moosmofette befindet sich im Kontrollbereich der Fläche, oder punktuell an Stellen mit mäßig erhöhten Kohlendioxidwerten. Die Proben mit höherem organischem Substrat wurden ebenfalls an Messpunkten mit sehr niedrigen CO₂-Konzentrationen gefunden, aber zudem an solchen mit erhöhten CO₂-Gehalten. Ungeachtet

dieser Unterschiede führt auch hier eine Korrelationsanalyse mit der Datengrundlage zu keinem Zusammenhang zwischen dem Anteil der organischen Substanz an der Bodenzusammensetzung und dem Bodengas.

Die Abb. 83 stellt zusätzlich einen Vergleich zwischen dem Organikgehalt des Bodens und seines Wassergehaltes dar (Abb. 83a,b).

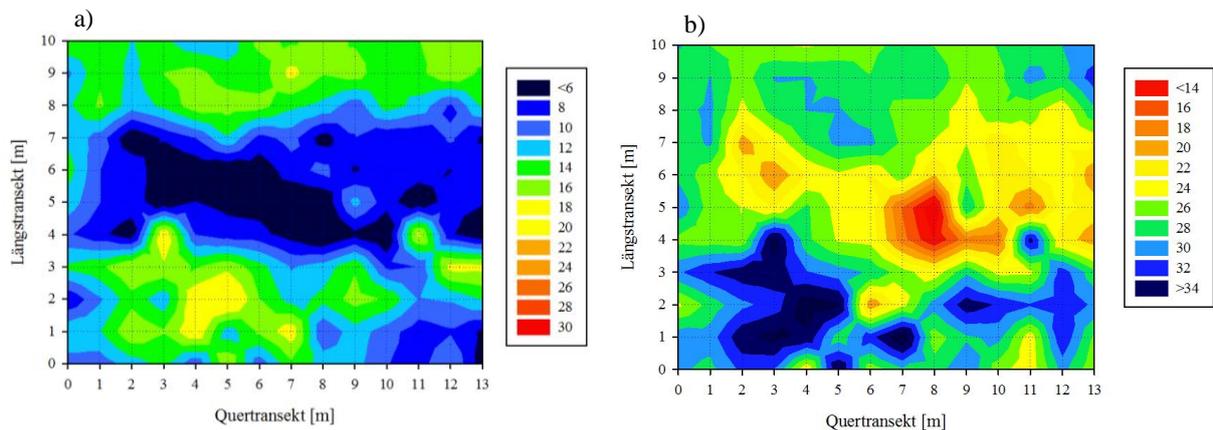


Abb. 83: Anteil des organischen Materials [%] an der Bodenzusammensetzung (a) und Bodenwassergehalt [%] (b) in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

In den trockensten Bereichen der Fläche (Transekte 4 bis 7) sind zugleich die niedrigsten organischen Anteile des Bodens zu finden, dementsprechend ist in den mäßig feuchten Teilen der Moosmofette (Transekte 7 bis 10) der Mengenanteil höher. Beachtet man ferner die nordöstlichen Messquadrante, so sind diese die nassesten und zugleich die Stellen mit viel organischem Substrat. Diese Verteilung der organischen Bodensubstanz entspricht der in der Birnenmofette.

Die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Variablen wird mit Hilfe einer Korrelationsanalyse bestätigt (Abb. 84). Die statistische Auswertung verdeutlicht den Zusammenhang. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,5735 kann gezeigt werden, dass mit steigendem Bodenwassergehalt der organische Bodenanteil zunimmt, vergleichbar mit den Angaben der Literatur (Scheffer und Schachtschabel 2010). Mit diesem Resultat wird die statistische Auswertung der Birnenmofetten-Daten im Bezug auf den organischen Mengenanteil und dem Bodengas bestärkt.

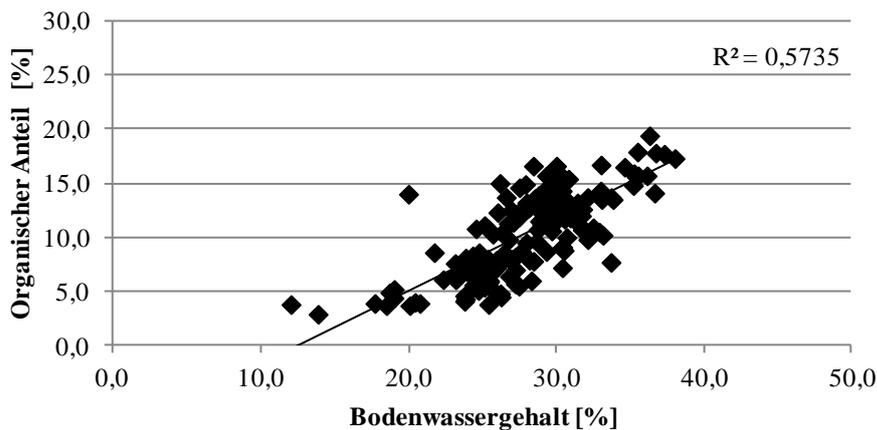


Abb. 84: Wechselbeziehung zwischen dem Bodenwassergehalt [%] und dem organischen Bodenanteil [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Moosmofette. (Datenerhebung März 2009)

Die Bildung von organischem Substrat in der Moosmofette lässt sich hauptsächlich auf die Durchfeuchtung des Bodens, aber auch auf die Kohlendioxidkonzentrationen zurückführen. In den Einzelquadraten die durch sehr geringe organische Mengenanteile gekennzeichnet sind, wurden auch größtenteils die niedrigsten Wassergehalte gemessen. Demnach wäre zu vermuten, dass an diesen Stellen eine gute Bodendurchlüftung stattfand. Umkehrt waren in den feuchtesten Bodenproben die höchsten Anteile der organischen Substanz an den festen Bodenbestandteilen zu verzeichnen. In den Bodenbereichen aus denen diese Proben stammen herrschte womöglich Luftmangel, wodurch die Entstehung von organischer Festsubstanz gefördert wird (Scheffer und Schachtschabel 2010). An vereinzelt Messstellen wurde ein geringer Organikanteil verzeichnet und gleichzeitig erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen. Werden zusätzlich die Wassergehalte an diesen Stellen hinzugezogen, fällt auf, dass diese trocken oder mäßig feucht waren. Das könnte darauf hinweisen, dass an diesen Punkten der Boden ungeachtet des Kohlendioxids gut durchlüftet war. Somit würde der Wassergehalt, als Einflussgröße der Bildung organischen Substrates, das Bodengas dominieren.

Fazit

Die gemessenen Werte der organischen Mengenanteile in der Moosmofette liegen im mittleren Bereich. Damit werden die Ergebnisse aus der Birnenmofette bestätigt. Die gleichen Erklärungsansätze mit denen die Resultate in der Birnenmofette erklärt werden konnten, können auch für die Auswertung der Moosmofetten-Daten verwendet werden.

3.2.1.6 pH-Werte

Auch der pH-Wert der untersuchten Fläche gemessen (Abb. 85). Die im Labor bestimmten pH-Werte befinden sich, für den Hauptteil der Fläche, im sehr stark sauren bis stark sauren Bereich. Es existieren wenige Ausnahmen im Nordosten und Südosten (Kap. 2.2) der Moosmofette, die mäßig sauer bis neutral sind. Ferner muss erwähnt werden, dass der sehr stark saure Boden im nordwestlichen Teil der Fläche durch die oben erwähnte Aufschüttung von Bauschutt entstanden ist.

Im Vergleich mit der Birnenmofette, in der viele Bodenproben mäßig saure pH-Werte hatten (Kap. 3.1.1.6), ist der Boden in dieser Untersuchungsfläche überwiegend sehr sauer und an mehreren Stellen sehr stark sauer. Übereinstimmend ist jedoch die Tatsache, dass die Bodenazidität schon optisch nicht den Kohlendioxidkonzentrationen folgt (Abb. 85a,b). Die Pedosphäre ist in beiden Mofetten flächig stark versauert, sowohl im Ausgassungs- als auch in den Kontrollbereichen.

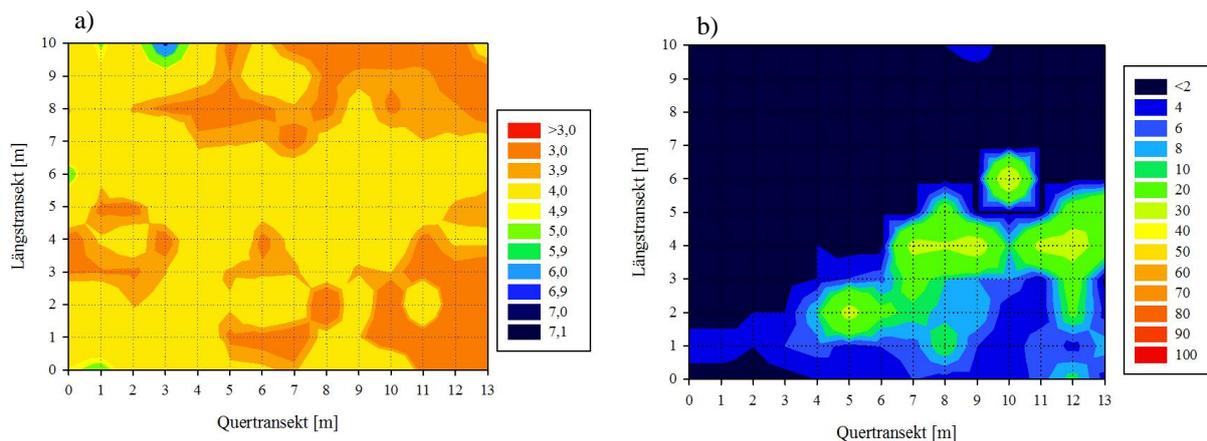


Abb. 85: pH-Werte in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2009)

Wie auch bei den zuvor analysierten pedologischen Faktoren, wurden auch im Zusammenhang mit den pH-Werten verschiedene Abhängigkeiten überprüft. Die Korrelationsanalysen ergaben mit der derzeitigen Datengrundlage, dass der pH-Wert des Bodens weder mit den CO₂-Konzentrationen, dem Bodenwassergehalt, noch mit der organischen Bodensubstanz im Zusammenhang steht. Diese Resultate wurden auch bei vergleichbaren Analysen in der Birnenmofette erzielt.

Beide Mofetten grenzen unmittelbar aneinander, so dass die gleichen Standort- und Umgebungsbedingungen gegeben waren. Daher hat der stark versauerte Boden in der Moosmofette, die gleichen Ursachen wie in der Birnenmofette (Kap. 3.1.1.6).

Fazit

Die Messungen der pH-Werte in der Moosmofette haben ergeben, dass die Fläche eine höhere Bodenazidität aufweist als die Birnenmofette. Ein großer Teil der pH-Werte lag im sehr sauren Bereich. Die starke Bodenversauerung ist eine Folge der gleichen Einflussfaktoren, die in der Birnenmofette festgestellt wurden.

3.2.1.7 Bodendichte

Abschließend werden die Ergebnisse der bodenphysikalischen Messungen vorgestellt (Abb. 86), um festzustellen in welchem Maße der Gastransport durch Diffusionswiderstände beeinträchtigt wird. Wie schon in der Birnenmofette ist zu sehen, dass die Bodenverdichtung mit zunehmender Bodentiefe ansteigt.

In 0 bis 10 cm Tiefe ist der Boden vorwiegend gering verdichtet (Abb. 86a). In 11 bis 20 cm Bodentiefe nimmt die Verdichtung in der ganzen Fläche leicht zu, wobei vereinzelte Stellen bereits sehr verdichtet sind (Abb. 86b). Ab 21 cm wird die Verfestigung der Pedosphäre massiver, und die Werte für den Durchdringungswiderstand steigen auf das Maximum von 7 Megapascal. In 41 bis 60 cm Tiefe ist nahezu die ganze Untersuchungsfläche sehr stark verdichtet. Die Penetrationswiderstände liegen überwiegend bei 3 bis 7 MPa (Abb. 86c,d).

Die starke Verdichtung des Bodens im mittleren Bereich des Standortes ist vermutlich durch den Oberflächenabfluss des Regenwassers entstanden (Kap. 3.2.1.4). Dementsprechend führen die konstant hohen Wassergehalte in den unteren Transekten zu niedrigen Penetrationswiderständen.

Ein Vergleich der Abb. 86a-e zeigt, dass der Gasfluss in den weniger verdichteten Bereichen der Fläche hoch ist. Aus einer genaueren Betrachtung der Abb. 86c,e geht hervor, dass das Kohlendioxid an den Randbereichen der Verdichtungen ausströmt. Zunächst könnte vermutet werden, dass diese Beobachtung nicht standhalten kann, aufgrund des hohen CO₂-Flusses an einer stark verdichteten Stelle. Jedoch besteht auch dort die Möglichkeit, dass das Kohlendioxid die verdichteten Diffusionswege in den tieferen Bodenschichten umgeht. In den oberen Bodenschichten ist die Fläche nicht so stark verdichtet und das CO₂ kann ungehindert in die Atmosphäre übergehen. Die formulierten Beobachtungen werden durch Abb. 87 bestätigt.

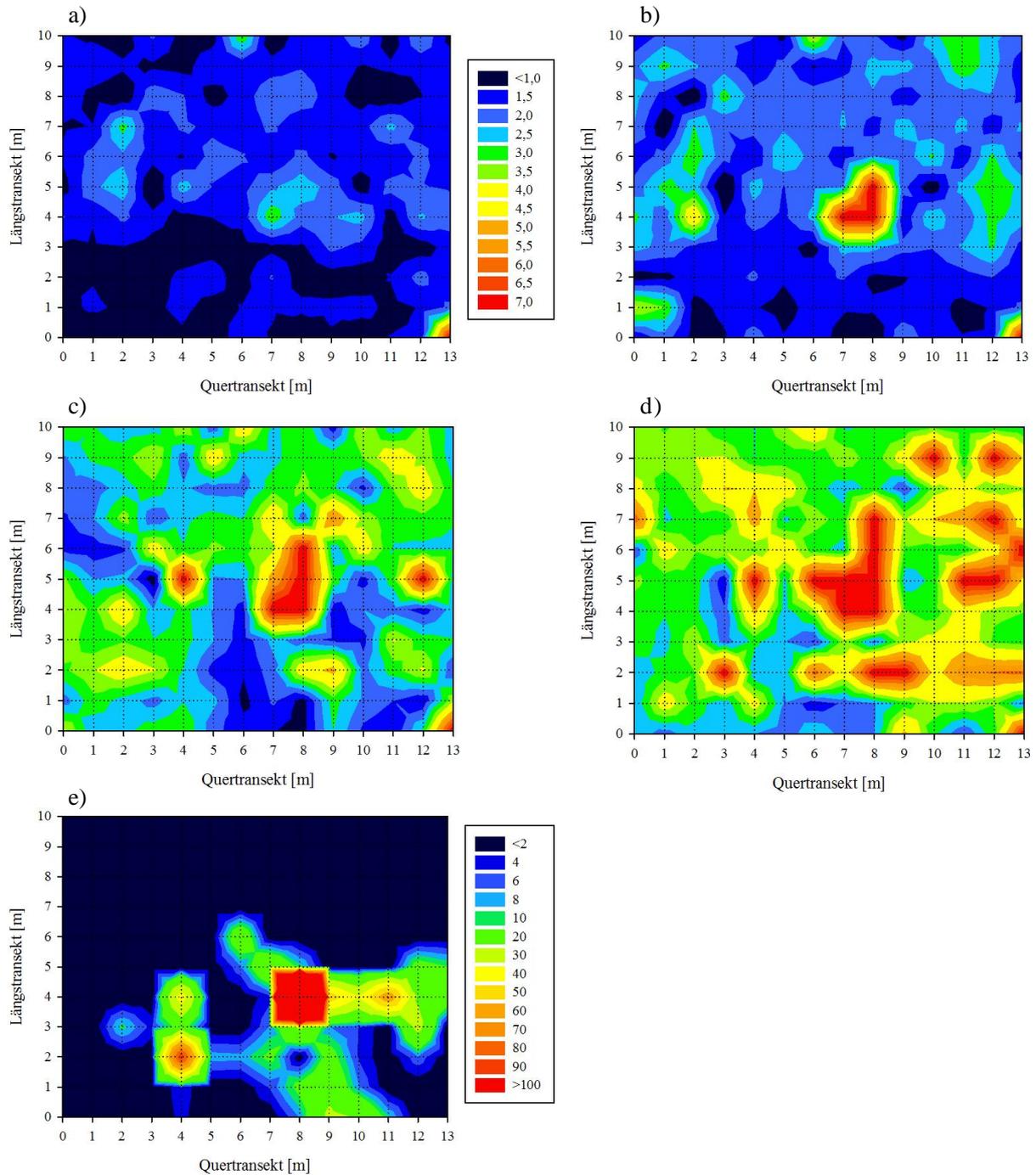


Abb. 86: Durchdringungswiderstand [MPa] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d), sowie CO₂-Fluss [mol CO₂ m⁻² d⁻¹] (e) in der Birnenmofette. Für die Erstellung der Abb. a) bis d) wurden für jeden Messpunkt die Mittelwerte von den Zentimetern innerhalb einer Tiefenangabe gebildet. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Die Abb. 87 verdeutlicht die Ursache für die teilweise sehr niedrigen oberflächennahen CO₂-Werte, trotz hoher Konzentrationen in den tieferen Bodenschichten. Die Moosmofette ist ab einer Tiefe von 40 cm sehr verdichtet. Das führt zu geringen Exhalationen in den obersten Bodenbereichen, da die Diffusion des Kohlendioxids sehr verlangsamt wird. Zusätzlich wird

bestätigt, dass das Mofettengas auf dem Weg des geringsten Widerstandes an die Oberfläche diffundiert und verdichtete Diffusionswege umgeht (Messpunkt 4, 9 und 10).

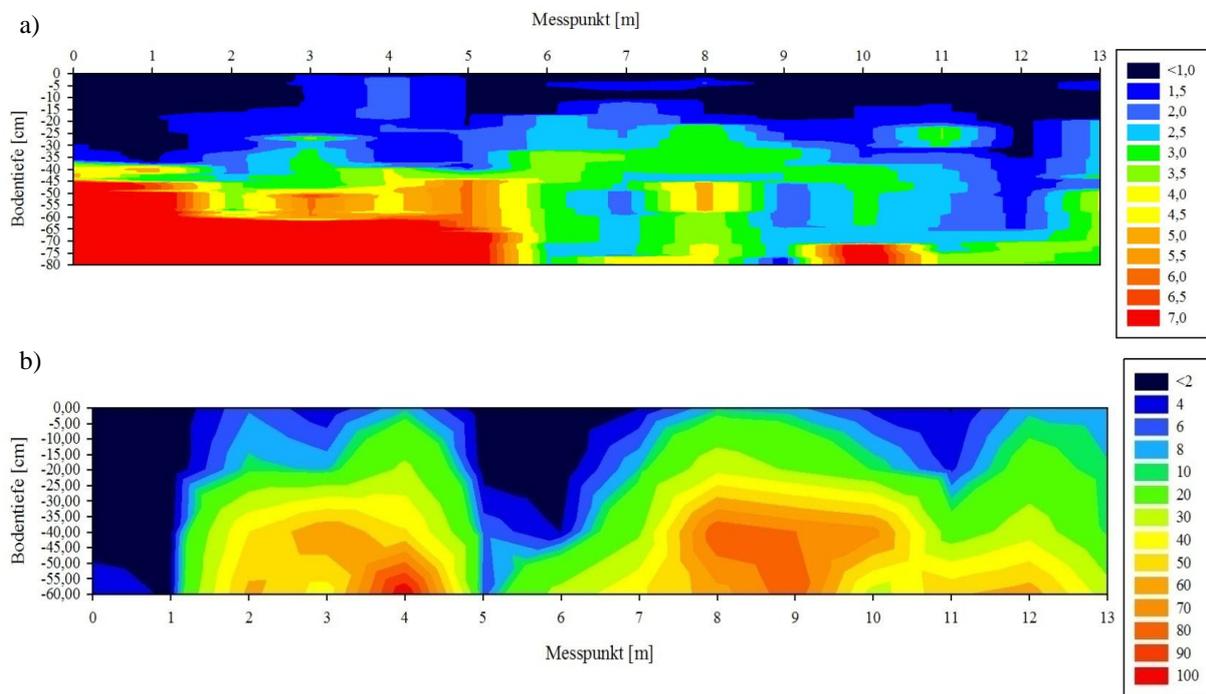


Abb. 87: Durchdringungswiderstand [MPa] des Bodens in Transekt 3 gemessen von der Erdoberfläche bis in 80 cm Tiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 3 im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche (b) in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung März 2013)

Fazit

Die oberflächennahe Verdichtung der Pedosphäre in der Moosmofette ist nicht in dem Maße festzustellen wie in der Birnenmofette. Die unterschiedlichen Ergebnisse innerhalb der untersuchten Fläche konnten, wie in Kap. 3.1.1.8, mithilfe der Bodenbeschaffenheit und Wasserspeicherfähigkeit begründet werden. Des Weiteren konnten die Schlussfolgerungen über die Auswirkungen der Bodenverdichtung auf die Gasdiffusion aus den Birnenmofetten-Daten bestätigt werden.

3.2.2 Zeitliche Veränderungen der Kohlendioxidkonzentrationen in der Moosmofette

In Kap. 3.1.2 wurden die jährlichen und vierteljährlichen Veränderungen der Konzentrationen und der Verteilung des Kohlendioxids in der Birnenmofette, vor dem Hintergrund verschiedener Wetterbedingungen sowie der Schwarmbebenereignisse, ausführlich diskutiert. In einem vergleichbaren Rahmen soll dies nun auch für die Gasmessungen in der Moosmofette geschehen. Die Aufnahmezeiträume sind mit denen der Birnenmofette

identisch; allerdings beginnen die Messungen in dieser Mofette erst in 2009, also ein Jahr später (Kap. 2.2).

3.2.2.1 Jährliche Veränderungen der CO₂-Ausgasungen

Auch an diesem Untersuchungsstandort wird deutlich, dass die Kohlendioxidkonzentrationen im Jahreslauf nicht konstant sind (Abb. 88). Wie bereits in der Birnenmofette festgestellt wurde, sind die Ausgasungszentren stabil in allen Jahren vorhanden, allerdings variieren die Konzentrationen sehr stark (z. B. 2009 und 2010, oder 2012 und 2013). Im März 2011 (Abb. 88c) ist auch das flächige Auftreten des Mofettengases zu verzeichnen (Kap. 3.1.2.1). Während dieses Messaufenthaltes wurden die höchsten CO₂-Gehalte sowie ein großflächigeres Auftreten des Kohlendioxids gemessen.

In 20 cm Bodentiefe sind die Daten der Jahre 2011 bis 2014 hinsichtlich der Fläche nahezu vergleichbar, einzig die Konzentrationen unterscheiden sich geringfügig (Abb. 89). Außerdem treten im März 2011 im südlichen Teil der Fläche schwach konzentrierte Ausgasungen auf. Im März 2009 sind zwar die CO₂-Gehalte mit den anderen Jahren vergleichbar, jedoch ist die Ausgasungsfläche kleiner. Im Juli 2010 sind die Konzentrationen auch in dieser Messtiefe extrem niedrig.

In der Abb. 90 sind die Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe dargestellt. Wie bereits in Kap. 3.1.2.1 beschrieben, steigen die CO₂-Werte im Vergleich zu den oberen Messtiefen. Auffallend sind jetzt Gemeinsamkeiten in der Verteilung des Gases mit der Birnenmofette. In den Jahren 2009, 2012 und 2013 ist der Exhalationsbereich klar von den Kontrollflächen zu unterscheiden, während sich in den anderen Jahren 2010, 2011 und 2014, die gasenden Bereiche nach Süden (Kap. 2.2) ausweiten.

Ein ganz anderes CO₂-Muster ist in der Messtiefe von 60 cm zu verzeichnen. In allen Einzelabbildungen ist festzustellen, dass immer mehr der südlichen Aufnahmestellen CO₂-führend sind, vor allem in den Jahren 2010, 2011, 2012 und 2014. Die Aufnahmen von 2009 und 2013 unterscheiden sich in dieser Hinsicht von den anderen, da der südliche Bereich der Fläche vereinzelt von isoliert gasenden Stellen durchbrochen wird (Abb. 91).

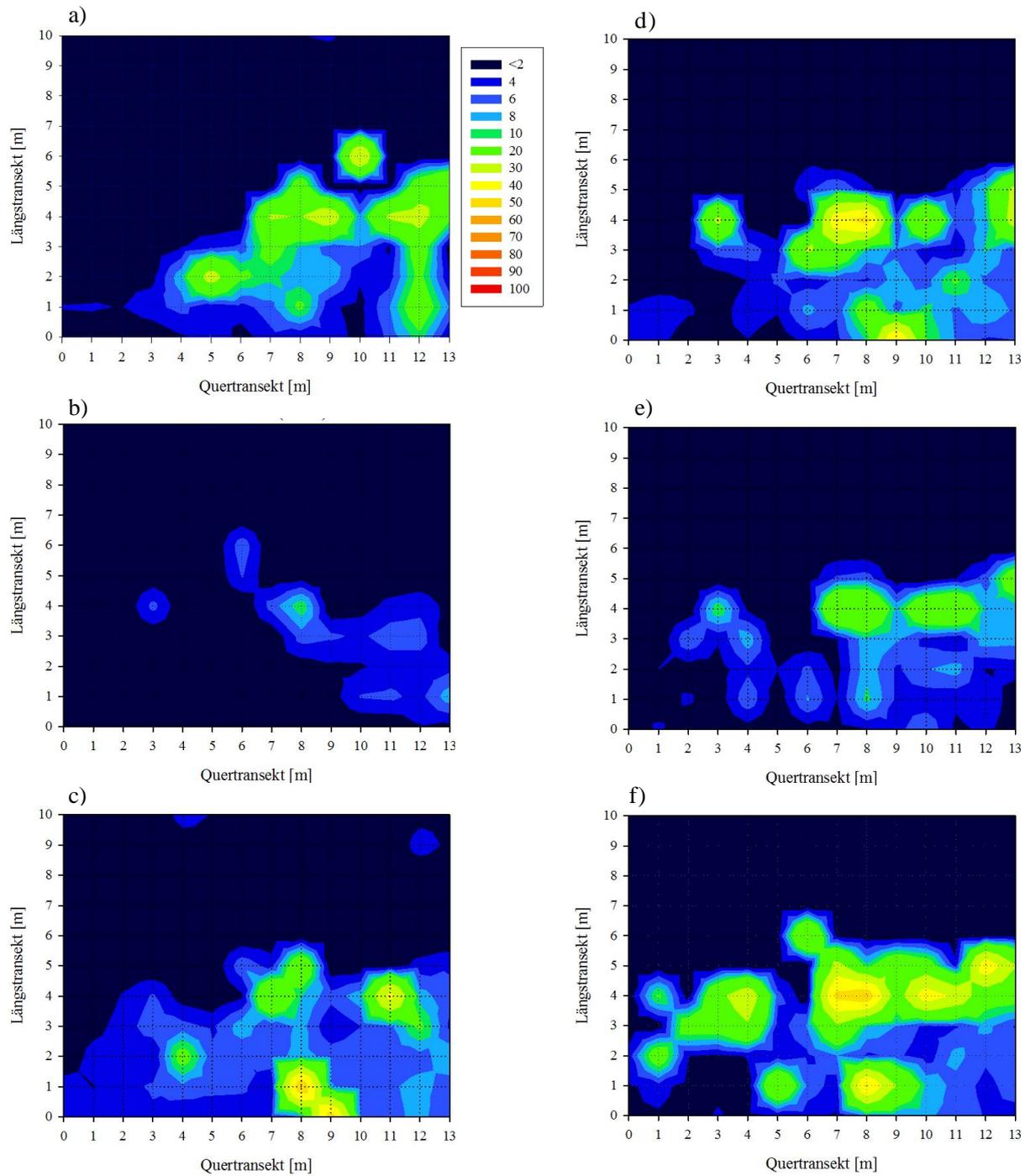


Abb. 88: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

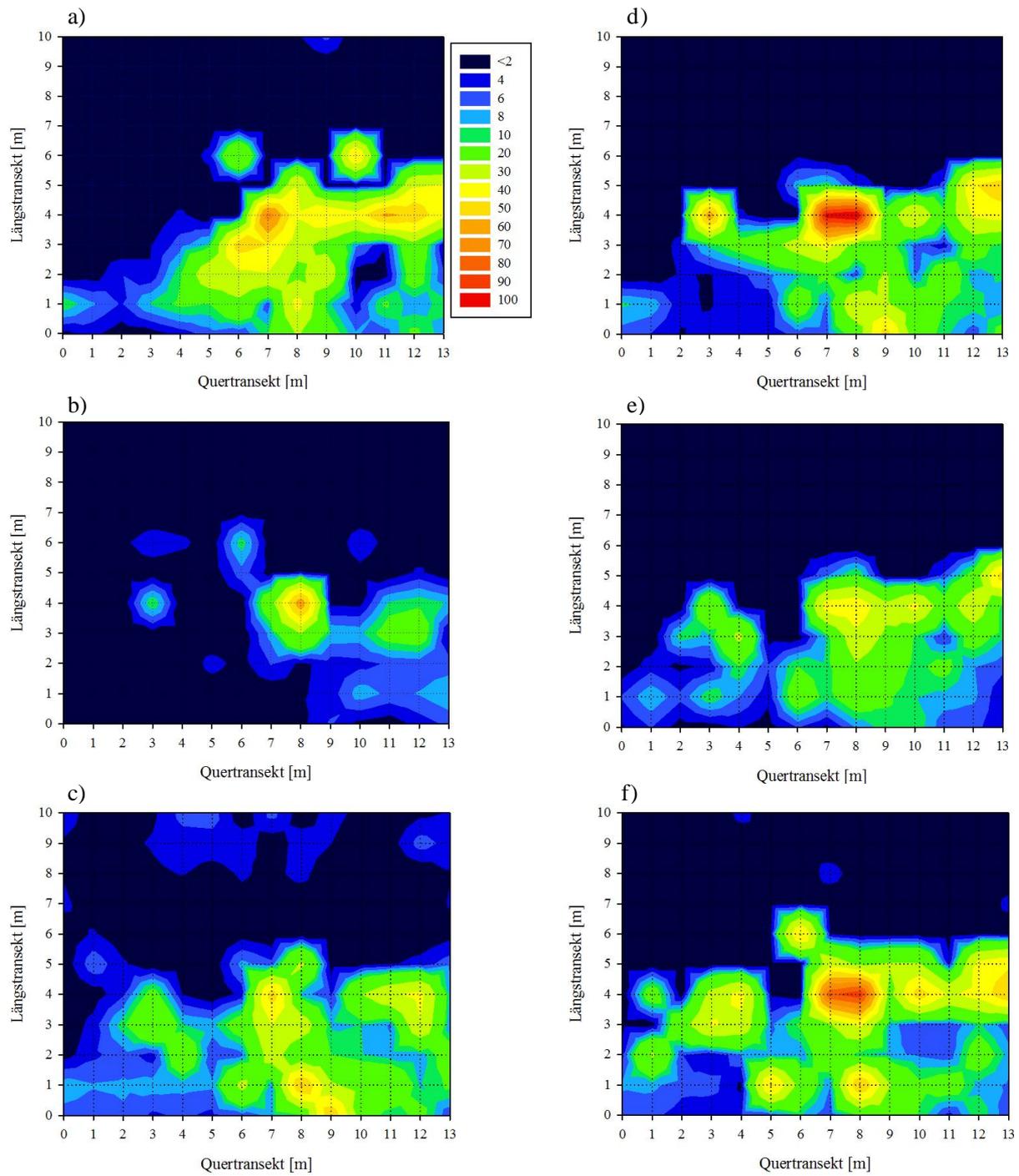


Abb. 89: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

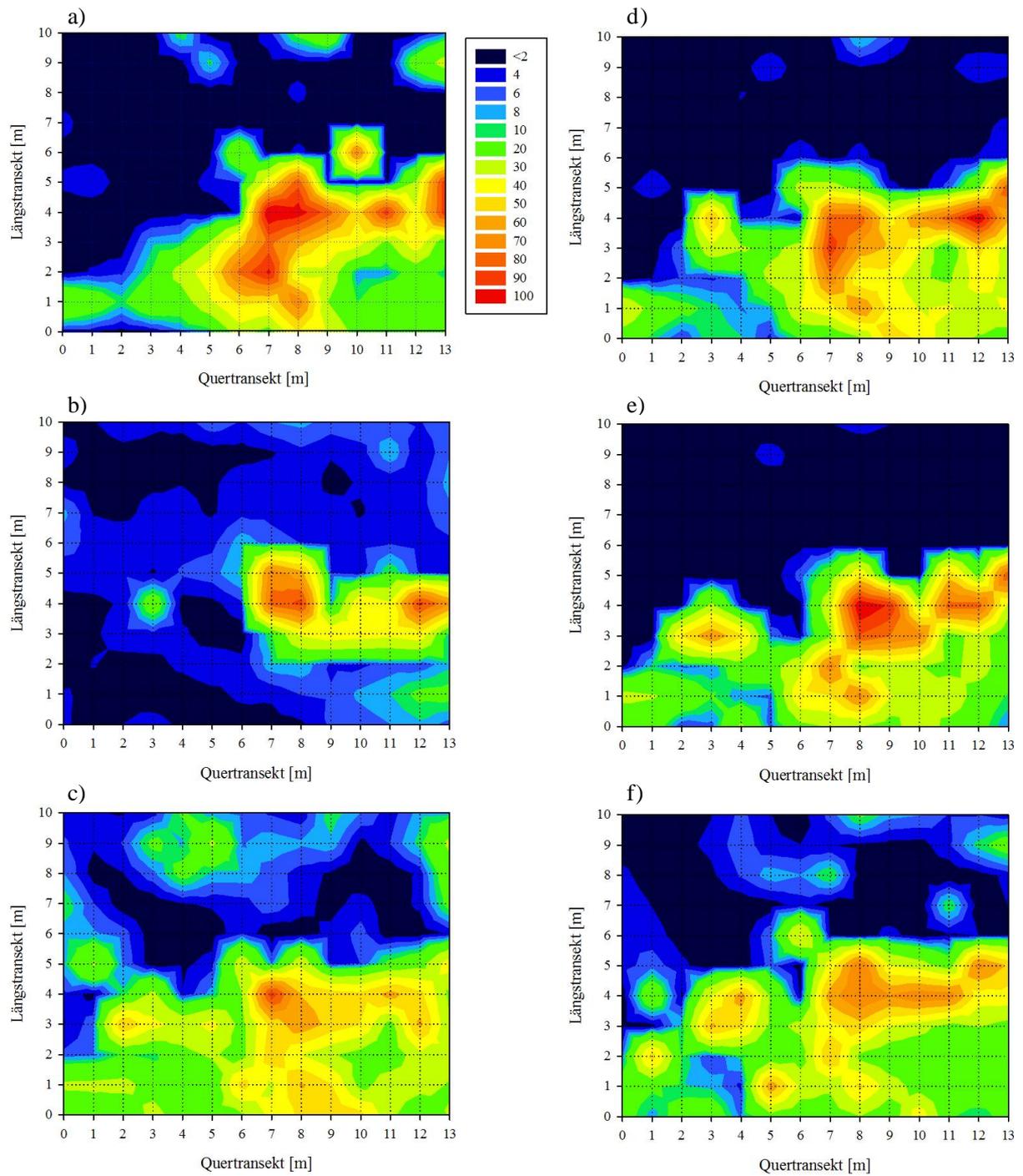


Abb. 90: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

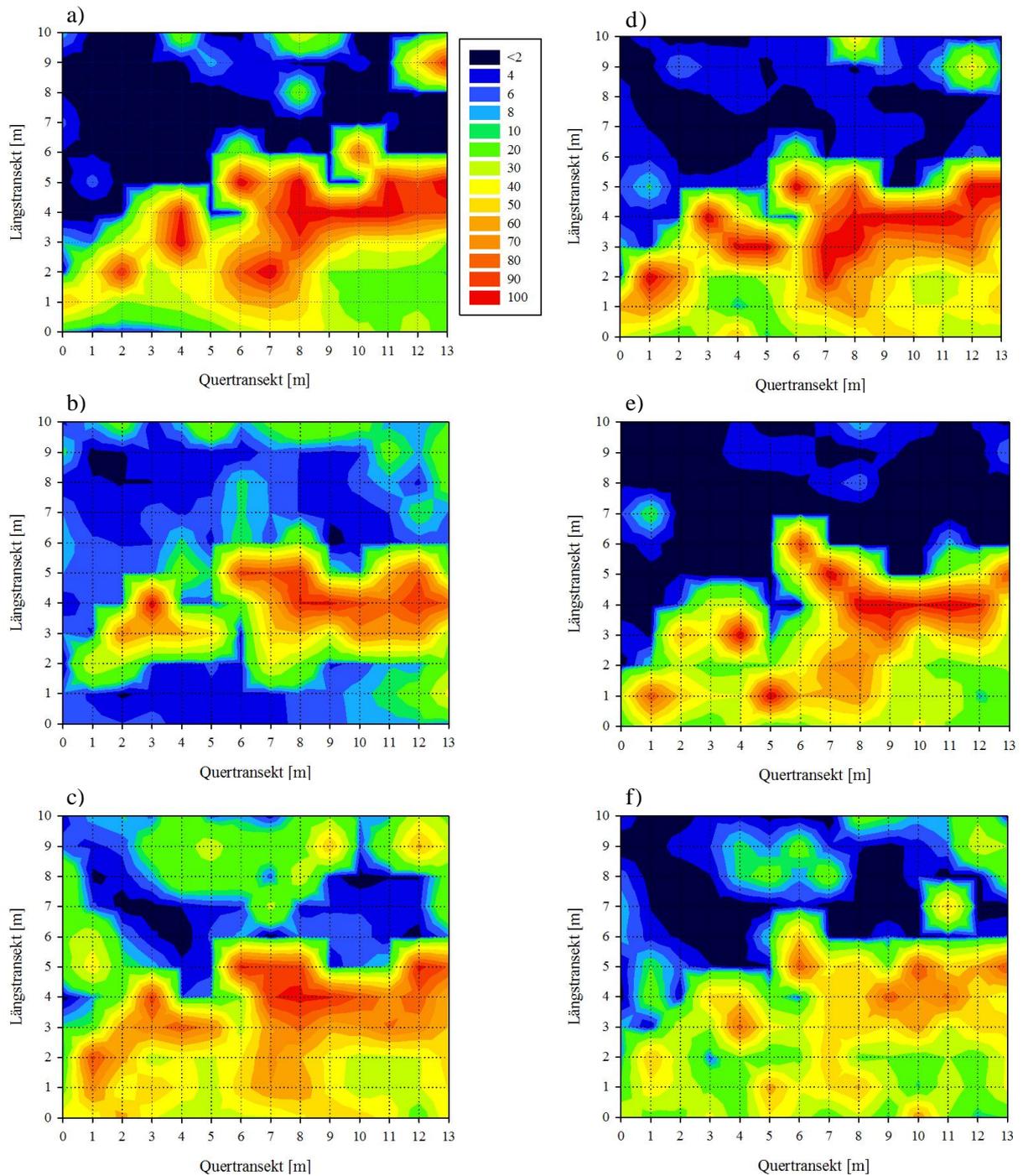


Abb. 91: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 60 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Die aufgezeichneten Konzentrationsschwankungen in der Moosmofette bestärken die räumliche sowie zeitliche Heterogenität der Exhalationen, die in der Birnenmofette und an anderen Mofetten festgestellt wurde (Kap. 3.1.1.1).

Die zeitlichen Veränderungen in der Birnenmofette zeigten mögliche Abhängigkeiten zu verschiedenen Wetterparametern und auch zu den Schwarmbebenereignissen (Kap. 3.1.2.1).

Mögliche Auswirkungen verschiedener Wetterfaktoren auf die jährlichen CO₂-Variationen in der konstant gasenden Teilfläche

In Abb. 92 sind die Mittelwerte der Kohlendioxidkonzentrationen in 20 cm Bodentiefe der konstant gasenden Teilfläche für alle Jahre dargestellt, zusammen mit unterschiedlichen Wetterfaktoren. Eine Auflistung der Daten ist in Tab. 29 zu finden.

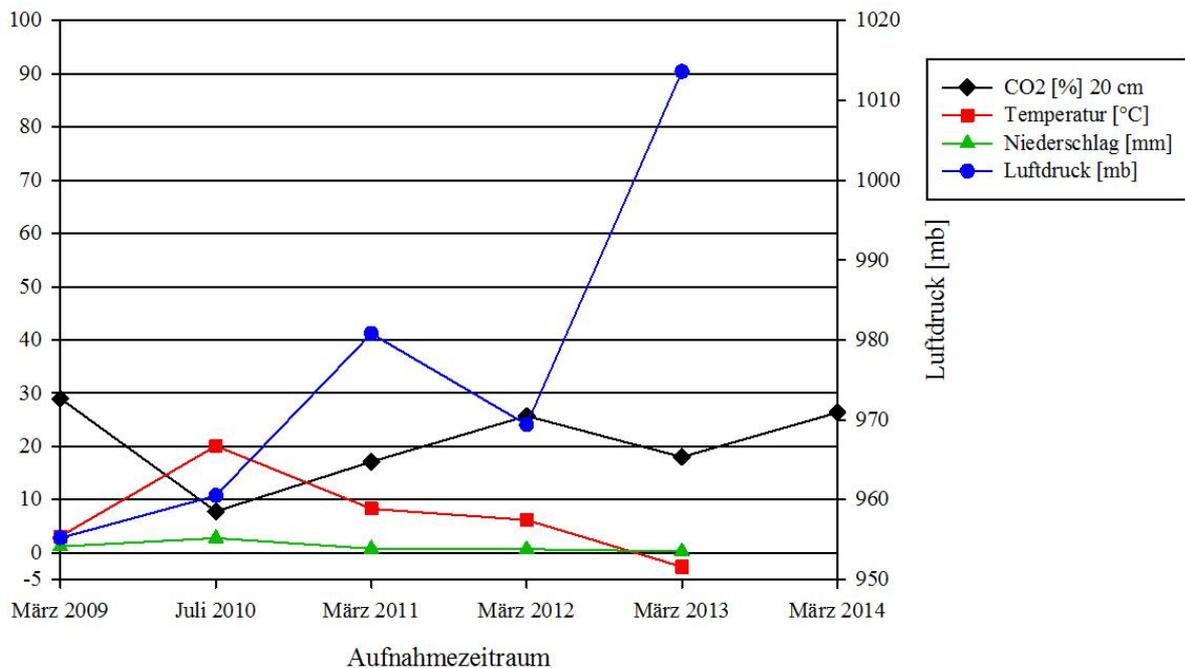


Abb. 92: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Moosmofette, in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte von 22 Messstellen. Die Angaben der Temperatur und des Luftdruckes basieren auf den Mittelwerten aller gemessener Tageswerte der Wetterstation in Cheb (Eger), die Niederschlagswerte beziehen sich auf den Tages-Höchststand (aus Internetquelle 2). Für die Abbildung wurden sie für den Aufenthaltszeitraum gemittelt. Die Werte des Luftdruckes sind auf der rechten Achse abzulesen, alle anderen Werte auf der linken. Die Jahresangaben beziehen sich auf den ersten Messaufenthalt in dem entsprechenden Jahr, da die Ergebnisse dieser Gasmessungen zugrunde liegen. Die genauen Zeiträume sind in Tab. 29 angegeben. Für das Jahr 2014 sind noch nicht alle erforderlichen Wetterdaten verfügbar (außer Januar und Februar). (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Bei der Interpretation der CO₂-Veränderungen mit den gemessenen Temperaturen sind Abhängigkeiten zu vermuten. Bei hoher Temperatur in 2010 wurden geringe CO₂-Werte gemessen. Mit stetig abnehmenden Temperaturen, in den Jahren 2011 und 2012 steigen sie konstant. Eine Ausnahme gibt es im März 2013 zu verzeichnen. Während dieses Aufenthaltes wurden niedrige Temperaturen und CO₂-Konzentrationen gemessen.

Die Abhängigkeit des CO₂ von den Umgebungstemperaturen kann zurzeit noch nicht durch andere Untersuchungen bestätigt werden (Weinlich et al. 2013).

Eine Betrachtung der Kohlendioxidschwankungen vor dem Hintergrund der aufkommenden Niederschläge führt zu ähnlichen Erkenntnissen wie in der Birnenmofette. In dieser waren schwache Abhängigkeiten dahingehend festzustellen, dass bei geringem Niederschlag die CO₂-Gehalte höher waren als bei höherem (Kap. 3.1.2.1). Diese Tendenz kann durch die Daten der Moosmofette bestätigt werden.

Weinlich et al. (2013) zu Folge hat der Niederschlag als Einflussgröße auf den Grundwasserspiegel, Einfluss auf die CO₂-Konzentrationen. Der Ausgasungsbereich der Moosmofette befindet sich in der Nähe des Wasserlaufes (Kap. 2.2.2). Das bedeutet, dass der Boden im nördlichen Teil der Fläche konstant feuchter ist als die anderen Bereiche. Die Schwankungen der CO₂-Konzentrationen könnten ebenfalls von dem Wasserstand dieses Baches beeinflusst werden, eine bislang nicht berücksichtigte Variable.

Identisch mit den Resultaten in der Birnenmofette hat auch in dieser Untersuchungsfläche der Luftdruck einen möglichen Einfluss auf die Kohlendioxidgehalte des Bodens (Kap. 3.1.2.1). Ungeachtet der Messungen im März 2011 scheinen hohe Luftdruck-Werte eine Senkung der CO₂-Gehalte zu bewirken.

Tab. 29: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in einer konstant gasenden Teilfläche der Moosmofette sowie verschiedene Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte aus 22 Messstellen. Die Angaben der Temperatur und des Luftdrucks basieren auf den Mittelwerten aller gemessener Tageswerte der Wetterstation in Cheb (Eger), die Niederschlagswerte beziehen sich auf die Tages-Höchststände (aus Internetquelle 2). Für die Tabelle wurden die Werte begrenzt auf die Aufenthaltszeiträume gemittelt. (k. A.=keine Angabe; Für das Jahr 2014 sind noch nicht alle erforderlichen Wetterdaten verfügbar, außer Januar und Februar.) (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Jahr	CO₂ 20 cm [%]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Luftdruck [mb]
März 2009	29,0	3,1	1,2	955,2
Juli 2010	7,8	20,1	2,8	960,5
März 2011	17,1	8,3	0,8	980,8
März 2012	25,7	6,2	0,7	969,4
März 2013	18,0	-2,6	0,3	1013,6
März 2014	26,3	k. A.	k. A.	k. A.

Auswertung der jährlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 mithilfe verschiedener Wetterfaktoren

In den Abb. 93-95, sowie in Tab. 30 sind die jährlichen CO₂-Konzentrationen der drei Messpunkte in einer Bodentiefe von 20 cm abgebildet und aufgelistet. Ergänzend werden die Jahresläufe der Wetterfaktoren gezeigt.

Bei der Interpretation der CO₂-Schwankungen bezüglich des Niederschlages ergibt sich das gleiche Muster wie in Abb. 92. Durch die Messpunkte 1/5 und 6/6 werden die gleichen Abhängigkeiten bestätigt wie in Abb. 92, oder der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.1).

Folglich können die gleichen Erklärungsansätze angewendet werden wie bei der Auswertung der Birnenmofetten-Daten (Kap. 3.1.2.1).

Ungeachtet der Messungen im März 2011 wirkt der Luftdruck eventuell auf die CO₂-Ausgasungen ein. Wie bereits in Abb. 92 oder der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.1) beobachtet werden konnte, können hohe Luftdruck-Werte niedrigere CO₂-Konzentrationen bewirken. An Messpunkt 1/5 wird diese Schlussfolgerung bestätigt. In Abb. 95 ist eine Ausnahme zu verzeichnen. Im März 2013 steigen dort sowohl die CO₂-Werte, als auch der Luftdruck.

Die festgestellten Abweichungen an den drei Einzelpunkten der Moosmofette sind auch an den Punkten der Birnenmofette verzeichnet worden (Abb. 34-36). Für die Diskussion der Wechselwirkung zwischen Luftdruck und Ausgasung können die gleichen Argumente angeführt werden wie in Kap. 3.1.2.1.

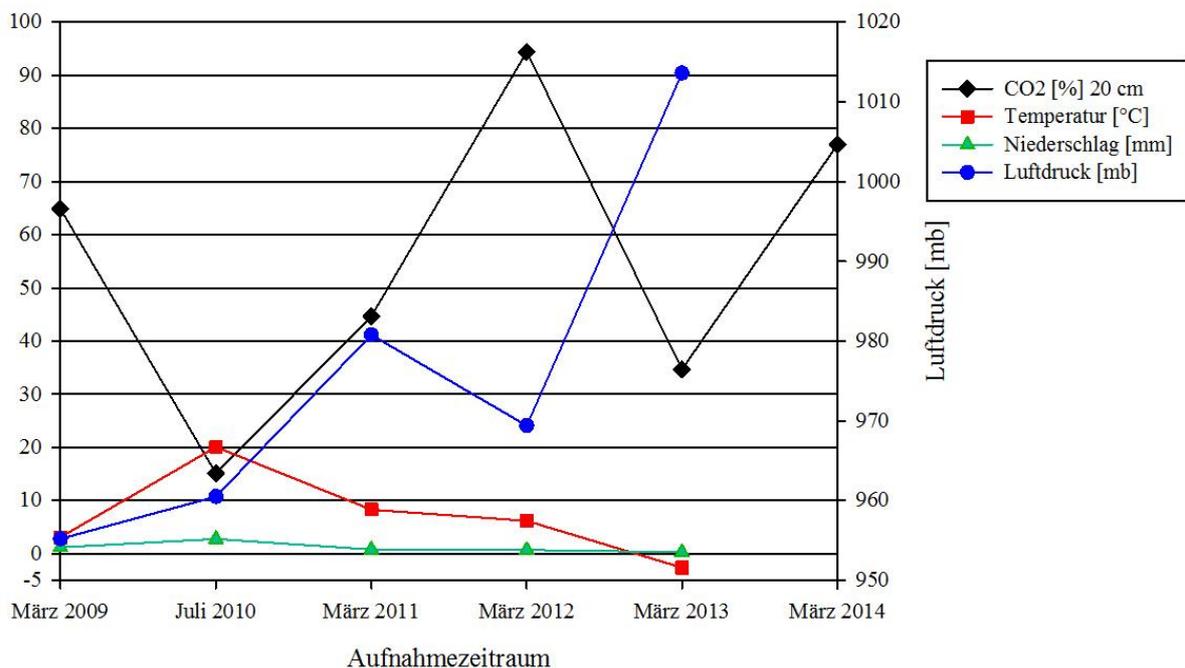


Abb. 93: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 4/7 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Rohdaten dieser Messstelle. Weitere Erklärungen sind der Abb. 92 zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

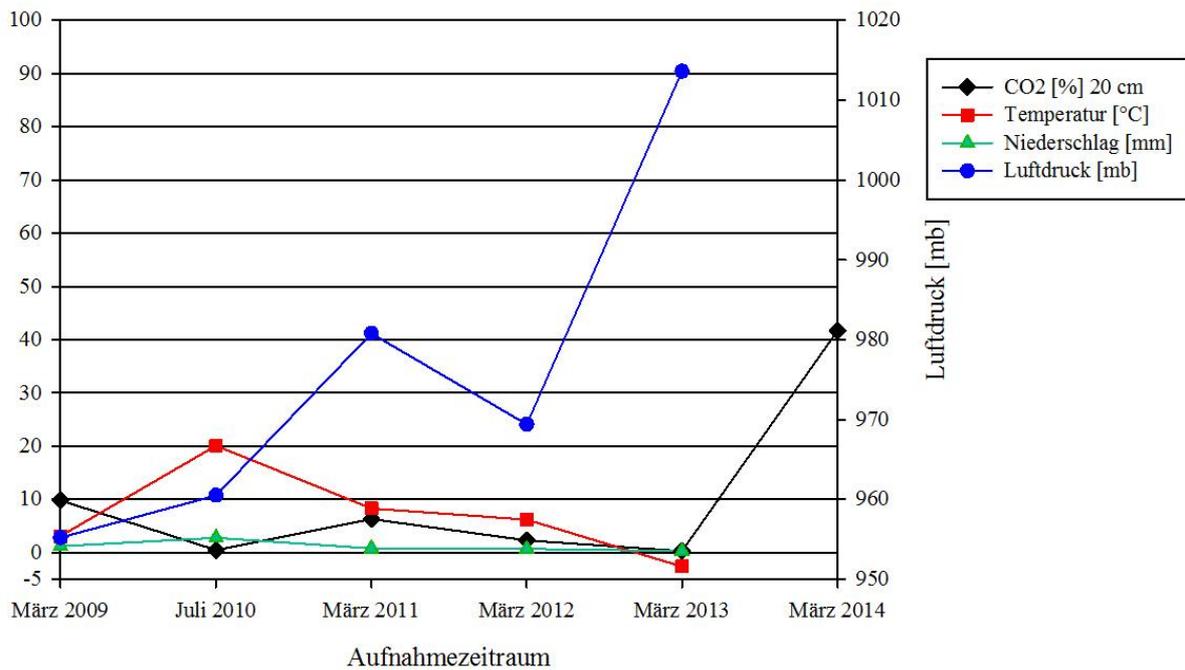


Abb. 94: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 1/5 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind der Abb. 93 zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

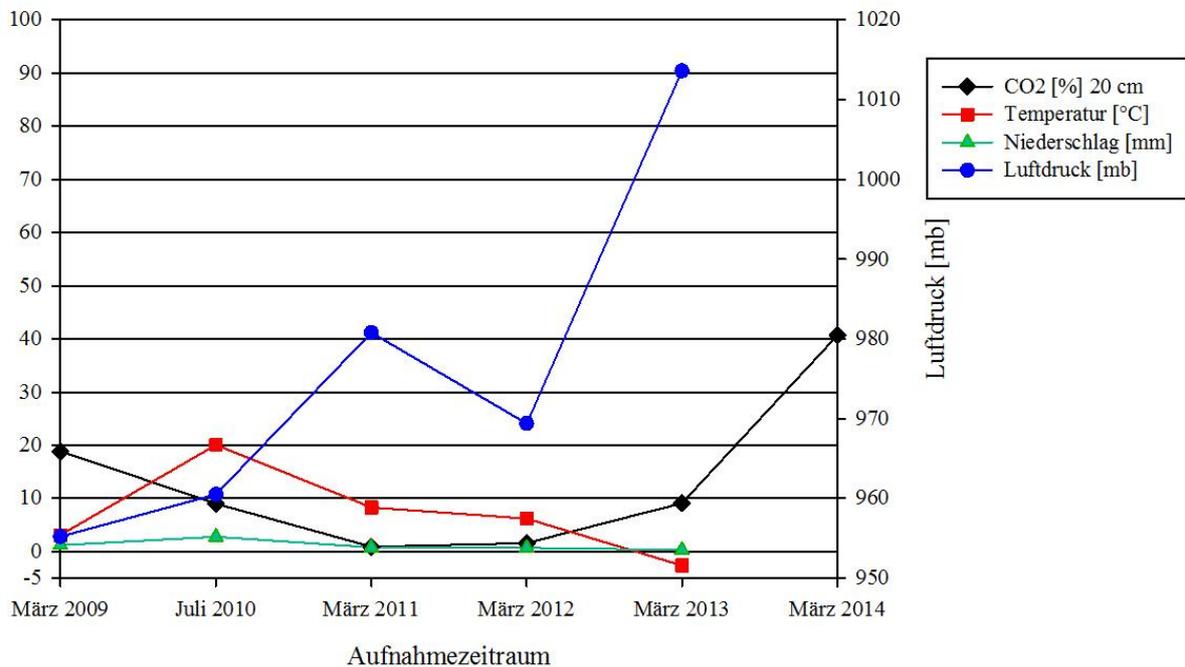


Abb. 95: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 6/6 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind der Abb. 93 zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

An allen drei Messpunkten sind eventuell Abhängigkeiten der CO₂-Ausströmungen von den Umgebungstemperaturen festzustellen. Mit hohen Temperaturen sind Erhöhungen der CO₂

Werte festzustellen. Ausnahmen sind im März 2011, 2012 und 2013 zu beobachten (Abb. 93-95). Die Abbildungen könnten leichte Abhängigkeiten der jährlichen CO₂-Exhalationen von den Temperaturen andeuten. Dennoch wird diese Wechselwirkung bei der Interpretation der vierteljährlichen Kohlendioxidschwankungen genauer betrachtet.

Tab. 30: Jährliche CO₂-Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messstellen 1/5 , 4/7 und 6/6 in der Moosmofette, sowie über verschiedene Wetterfaktoren. Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messstellen. Weitere Erklärungen sind der Tab. 29 zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Jahr	CO₂ 10 cm [%] 1/5	CO₂ 10 cm [%] 4/7	CO₂ 10 cm [%] 6/6	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Luftdruck [mb]
März 2009	9,8	64,9	18,9	3,1	1,2	955,2
Juli 2010	0,5	15,1	9,0	20,1	2,8	960,5
März 2011	6,3	44,7	0,9	8,3	0,8	980,8
März 2012	0,3	94,4	1,6	6,2	0,7	969,4
März 2013	2,3	34,7	9,1	-2,6	0,3	1013,6
März 2014	41,7	77,0	40,7	k. A.	k. A.	k. A.

Auswertung der jährlichen CO₂-Schwankungen in der konstant gasenden Teilfläche mithilfe der Schwarmbebenaktivitäten

In Kap. 3.1.2.1 wurden sehr ausführlich Auslöser kurzfristig erhöhter CO₂-Konzentrationen erläutert und diskutiert. Solche Extreme können durch seismische Aktivitäten oder die Erdbeben entstehen (Weinlich et al. 2013).

In Abb. 96 sind die jährlichen Konzentrationsveränderungen der gasenden Teilfläche abgebildet im Zusammenhang mit den Lokalbebenmagnituden [M_L].

Aufgrund der fehlenden CO₂-Daten von 2008 in der Moosmofette kann keine Aussage über die Auswirkungen des Schwarmbebenereignisses von Oktober 2008 auf die Messungen von März 2009 getroffen werden. Nach den CO₂-Messungen in 2009 sinken die Konzentrationen in 2010 und steigen dann 2011 wieder an, obwohl die maximal erreichten Magnituden in den Jahren 2009 und 2010 identisch sind (Tab. 7). Dieser Verlauf wurde ebenfalls im gasenden Bereich der Birnenmofette festgestellt und mit nicht-seismischen Bewegungen begründet (Weinlich et al. 2013), da die Wetterbedingungen in diesen Zeiträumen konstant waren (Kap. 3.1.2.1). Von 2011 bis 2013 ähneln sich die Schwankungen des CO₂ in Abhängigkeit der Magnituden in den stabilen Ausgasungsbereichen beider Mofetten. In der Moosmofette findet eine Zunahme der Kohlendioxidkonzentrationen im Jahr 2012 statt. In der Birnenmofette wurden erhöhte CO₂-Werte nach dem Schwarmbebenereignis von 2011 ebenfalls verzeichnet.

Demnach können Schwarmbebenereignisse CO₂-Erhöhungen oder Erniedrigungen nach sich ziehen, als Folge neu entstandener Verdichtungen oder Brüche im Untergrund (Weinlich et al. 2013). Es ist folglich anzunehmen, dass die Schwarmbeben von 2011 in der Moosmofette, genauso wie in der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.1), zu Öffnungen der Diffusionswege geführt haben, wodurch das Aufsteigen des Kohlendioxides begünstigt wurde.

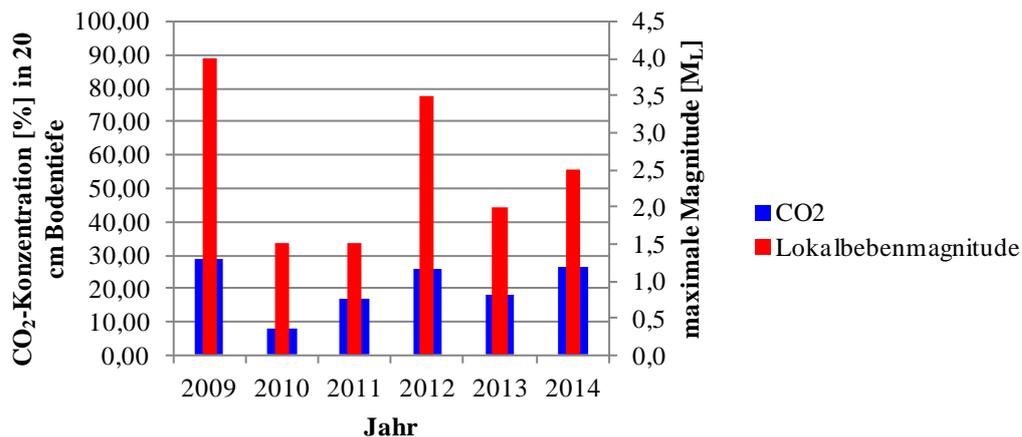


Abb. 96: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2009 bis 2014) in Abhängigkeit von den Erdbebenstärken [M_L] von 2008 bis 2014 (aus Internetquelle 1). Die CO₂-Werte sind die Mittelwerte aus 22 Messstellen. Es werden immer die Schwarmbebenereignisse des Vorjahres auf die CO₂-Messungen des Folgejahres bezogen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Nachdem im Jahr 2012 weniger intensive Schwarmbeben verzeichnet wurden (Kap. 3.1.2.1), sinken die CO₂-Konzentrationen in der konstant gasenden Fläche wieder. Die Steigung der CO₂-Werte im März 2014 erscheint ungewöhnlich, auch im Vergleich mit den Daten der Birnenmofette, da sich die Lokalbebenmagnituden im Jahr 2013 mehr im unteren Wertebereich einordnen lassen. Nach Faber et al. (2009) deuten erhöhte CO₂-Konzentrationen Schwarmbebenereignisse an, begleiten sie, oder sind eine Ursache der seismischen Aktivität (Kap. 3.1.2.1). Demzufolge können die hohen CO₂-Werte als Vorankündigungen des Schwarmbebens im Juni 2014 interpretieren werden.

Auswertung der jährlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 mithilfe der Schwarmbebenaktivitäten

Mithilfe der Abb. 97a-c und der Tab. 31 können die bereits beschriebenen Beobachtungen bestätigt werden.

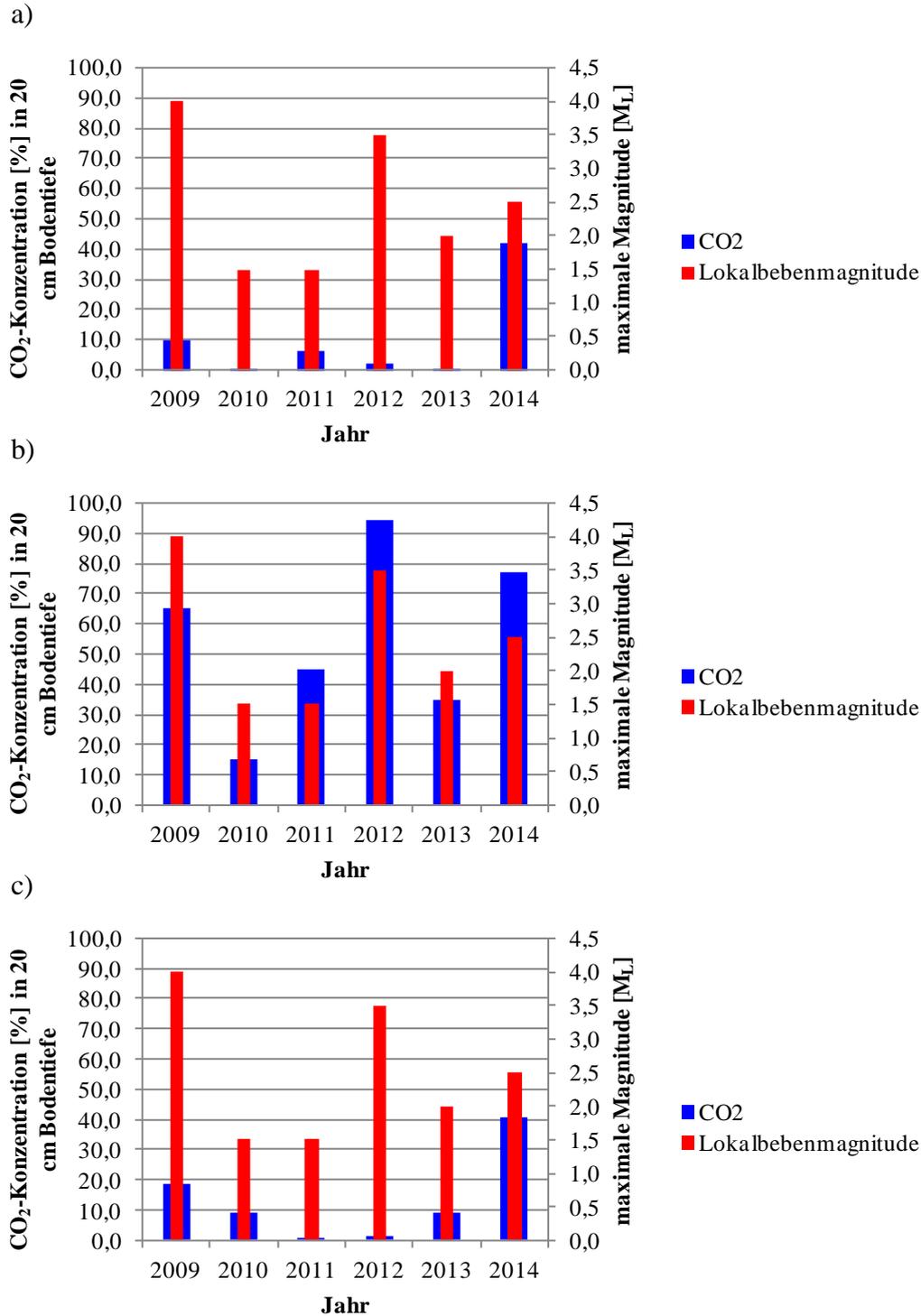


Abb. 97: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an den Messpunkten 1/5 (a), 4/7 (b) und 6/6 (c) in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2009 bis 2014), im Zusammenhang mit den Erdbebenstärken [M_L] von 2008 bis 2014 (aus Internetquelle 1). Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messpunkte. Es werden immer die Schwarmbebenereignisse des Vorjahres auf die CO₂-Messungen des Folgejahres bezogen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Auch an den drei Einzelpunkten der Moosmofette kann nicht geklärt werden wie sich die Schwarmbebenereignisse von Oktober 2008 auf die CO₂-Konzentrationen von März 2009 ausgewirkt haben.

Deutlich ist allerdings die Konzentrationsabnahme im Jahr 2010. Diese Entwicklung ist vergleichbar mit den Ergebnissen an den Einzelpunkten der Birnenmofette, die auf die geodynamischen Bedingungen zurückgeführt werden konnten (Kap. 3.1.2.1).

Tab. 31: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2008 bis Juni 2014 (aus Internetquelle 1), und der jährlichen Kohlendioxidkonzentration [%] an den Einzelpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2009 bis 2014). Die CO₂-Werte sind die Rohdaten der Messpunkte. k. A.=keine Angabe (Kap. 3.2) (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Zeitraum	max. Stärke [M _L]	Anzahl Epizentren	Tiefe [km]	CO ₂ 20 cm [%] 1/5	CO ₂ 20 cm [%] 4/7	CO ₂ 20 cm [%] 6/6
01.10.2008-31.12.2008	4,0	2602	6-10	k. A.	k. A.	k. A.
01.01.2009-31.12.2009	1,5	688	6-11	9,8	64,9	18,9
01.01.2010-31.12.2010	1,5	372	7-12	0,5	15,1	9,0
01.01.2011-31.12.2011	3,5	4185	6-10	6,3	44,7	0,9
01.01.2012-31.12.2012	2,0	984	7-11	0,3	94,4	1,6
01.01.2013-31.12.2013	2,5	1238	6-9	2,3	34,7	9,1
01.01.2014-10.06.2014	4,5	1477	8,5	41,7	77,0	40,7

Vergleichbar mit den Resultaten in der Birnenmofette könnten die CO₂-Veränderungen in der Moosmofette zum Teil als Folgewirkungen von Schwarmbeben betrachtet werden, und teilweise als Vorankündigungen (Faber et al. 2009). Demzufolge können die hohen CO₂-Werte im Jahr 2011 an den Punkten 1/5 und 4/7 als Vorankündigungen des Schwarmbebens im Herbst 2011 interpretieren werden. Mit der gleichen Erklärung können die ungewöhnlich hohen CO₂-Werte im März 2014 begründet werden. Das Schwarmbeben im August/September 2011 hat jedoch teilweise zu einer Verschließung der Diffusionswege

geführt. Denn im Gegensatz zu den Ergebnissen in der Birnenmofette konnten in der Moosmofette keine Erhöhungen der CO₂-Konzentrationen im März 2012 gemessen werden (Abb. 97a,c). An Messpunkt 4/7 wurden allerdings hohe CO₂-Werte aufgenommen, was mit den Ergebnissen in der Birnenmofette übereinstimmt (Kap. 3.1.2.1). Die Konzentrationsabnahmen an den Punkten 1/5 und 4/7 im März 2013 sind ebenfalls in der Birnenmofette beobachtet worden (Kap. 3.1.2.1). Zusätzlich ist in beiden Mofetten eine gleiche Ausnahme festzustellen. In der Moosmofette, an Messstelle 6/6, steigen die Kohlendioxidwerte im März 2013 im Vergleich zu März 2012 ungewöhnlich an ungeachtet geringer seismischer Aktivitäten (Abb. 97c). Ein vergleichbares Phänomen wurde in der Birnenmofette an dem Einzelpunkt 7/9 verzeichnet, und zwar in dem gleichen Jahr. Als mögliche Begründung kommen die Auswirkungen der Erdgezeiten in Betracht (Kap. 3.1.2.1).

Fazit

Die Resultate haben gezeigt, dass die gasenden Bereiche der Moosmofette durchgehend existieren, es aber teilweise zu starken Konzentrationsveränderungen sowie Verlagerungen kommt. Die formulierten Annahmen während der Auswertung der Birnenmofetten-Daten konnten teilweise durch die Interpretation der Moosmofetten-Daten bestätigt werden. Auch in der Moosmofette wurden die CO₂-Exhalationen sowohl durch die Wetterbedingungen beeinflusst, als auch durch geodynamische Prozesse und die Erdgezeiten.

3.2.2.2 Jahreszeitliche Veränderungen der Kohlendioxidexhalationen

In den unten stehenden Abb. 98-109 werden die Resultate der vierteljährlichen Messungen in der Moosmofette dargestellt. Der Aufbau und die Abfolge der Jahreszyklen ist mit denen der Birnenmofette gleich (Kap. 3.1.2.2).

Die Abb. 98 zeigt den Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013. Sehr eindeutig sind die extremen Konzentrationsabnahmen in den Sommermonaten, im Vergleich mit den CO₂-Werten in den Winter- und Herbstmonaten. Eine ähnliche Entwicklung ist ebenso für den zweiten (März 2013 bis März 2014) und dritten Jahreszyklus (März 2014 bis September 2014) festzustellen. Einzig die Junimessung 2013 fügt sich nicht in das Muster, da die Konzentrationen höher sind als im März und auch geringfügig großflächiger verteilt.

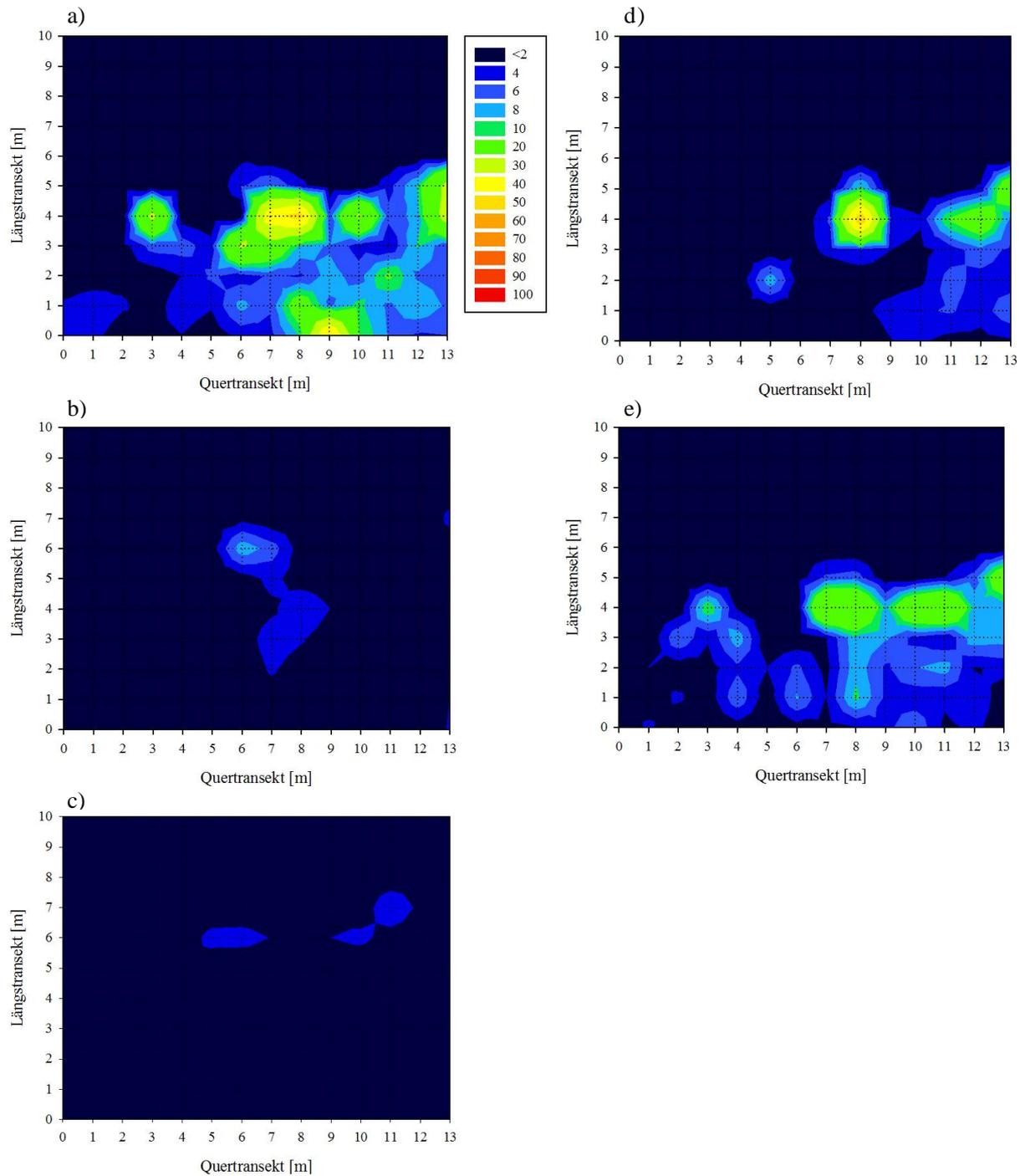


Abb. 98: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

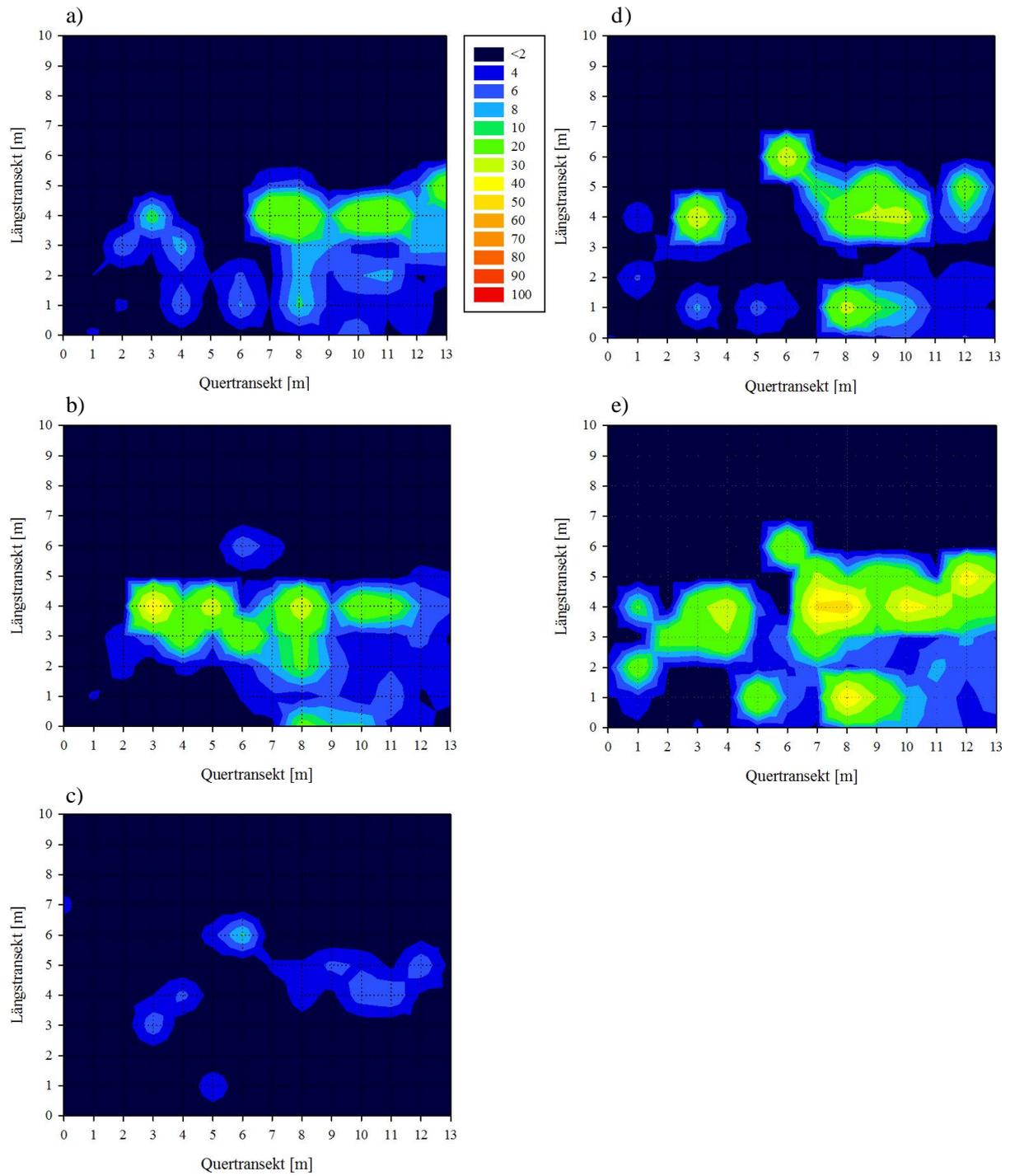


Abb. 99: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

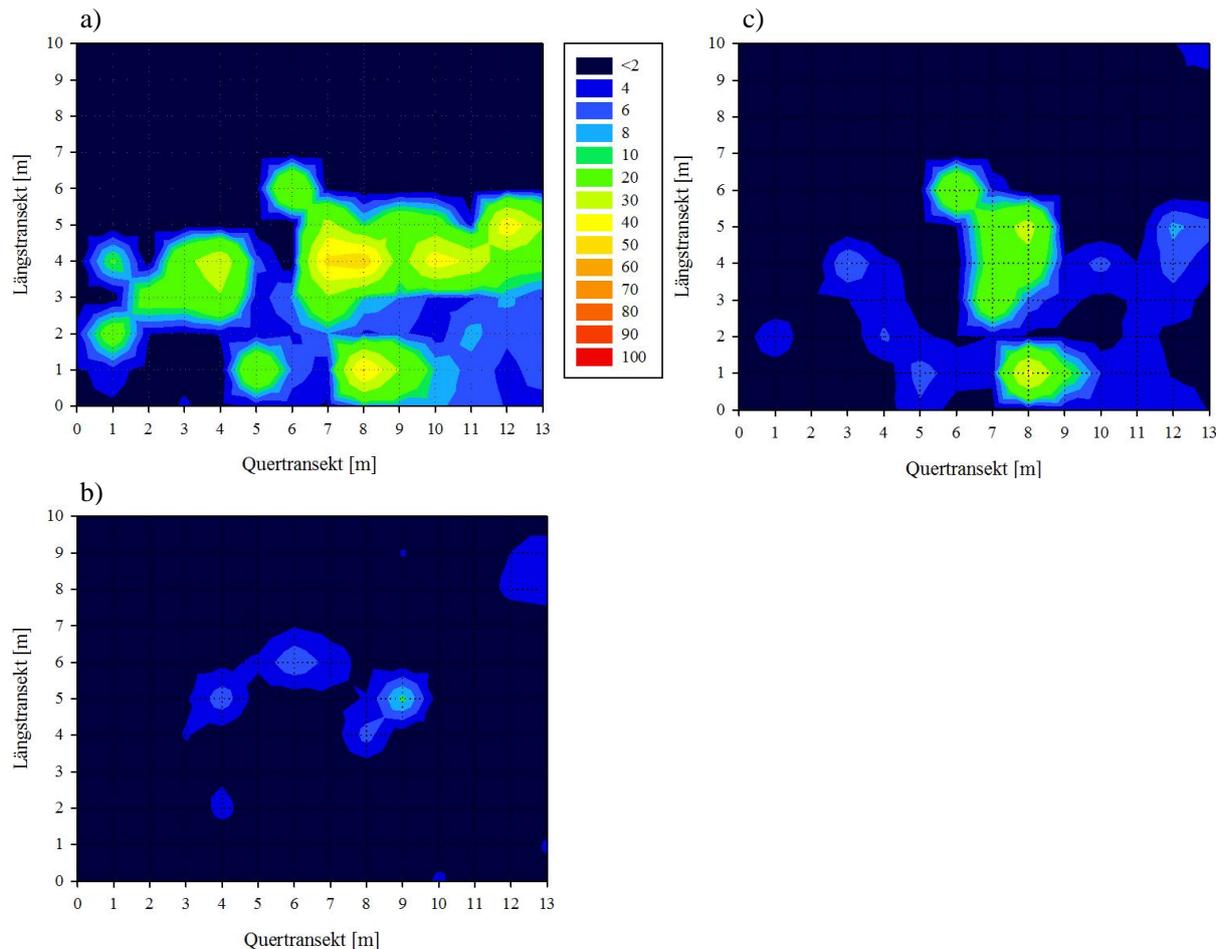


Abb. 100: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreszyklus konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

Auch in der Messtiefe von 20 cm lassen sich die Variationen in den CO₂-Konzentrationen in dem oben geschilderten Schema verfolgen. Jedoch muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass in den Sommermonaten Juni und August 2012 eine Verschiebung der ausgasenden Stellen auftritt. In Kap. 3.2.1.1 oder auch am Beginn dieses Kapitels wurde mit Hilfe der Abbildungen mehrfach deutlich, dass sich der Exhalationsbereich in der Moosmofette überwiegend in den Transekten 0 bis 5 befindet. Die Abb. 101b,c zeigen jedoch das Auftreten eines anderen Bereiches, der sich diagonal von Südwesten nach Nordosten (Kap. 2.2) über die Fläche zieht. Im Juni 2012 ist dies ansatzweise zu beobachten, während diese Verschiebung im August sehr prägnant wird, denn die, für bislang als stabil erachtete, Ausgasungszone ist nahezu gänzlich verschwunden. Der zweite und dritte Jahreslauf ist vergleichbar, allerdings ist die Verschiebung des Mofettenbereiches in einem erweiterten Umfang, im Juni 2014 wiederholt zu beobachten. Zusätzlich sind die CO₂-Werte im September 2014, im Vergleich mit denen von August 2012, unerwartet hoch.

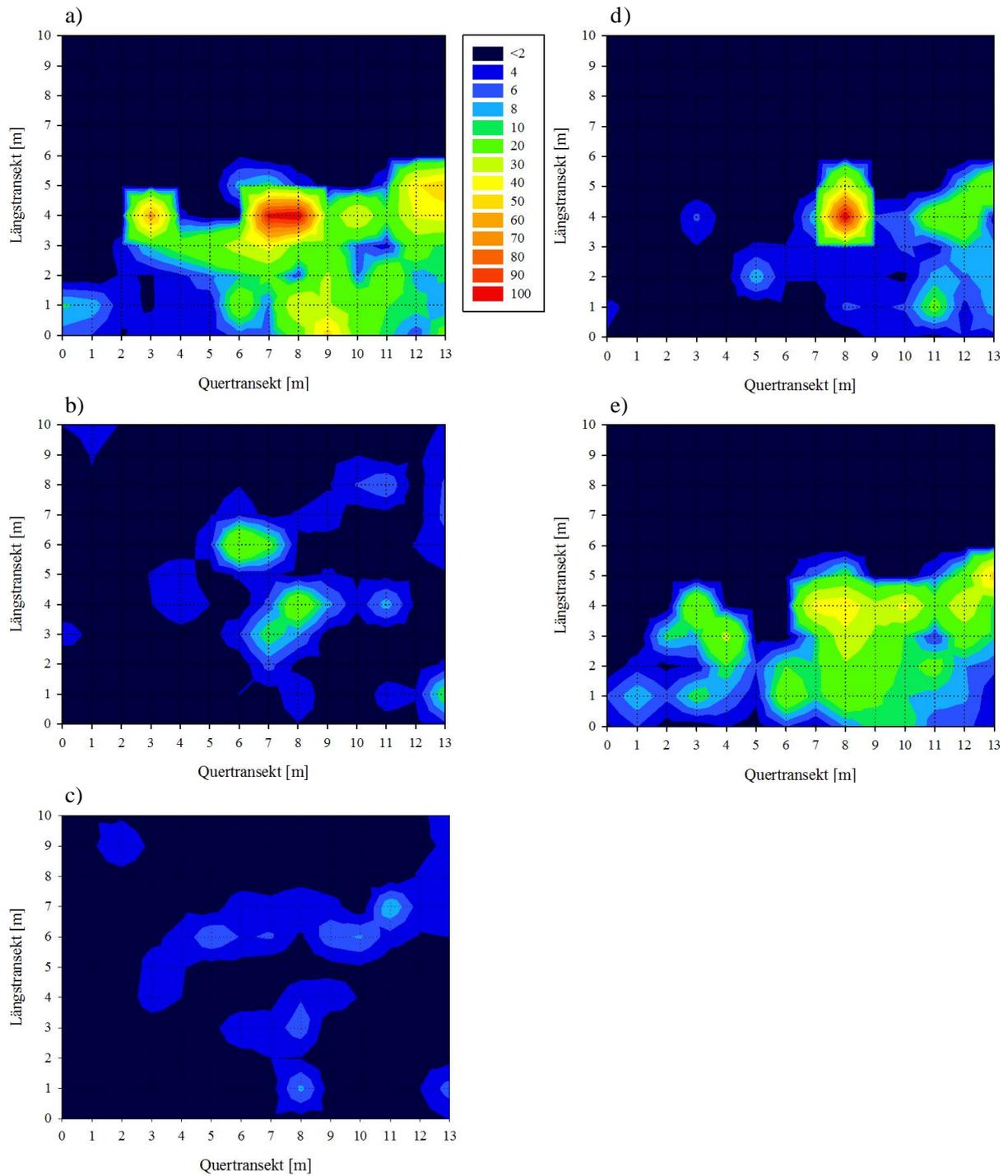


Abb. 101: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

Die Abb. 104-106 zeigen die Jahreszyklen in 40 cm Bodentiefe. Besonders hervortretend sind die Sommermonate im Jahr 2012. In diesen Aufnahmen ist eine flächige Ausgasung in der Moosmofette festzustellen sowie eine leichte Verlagerung des Ausgasungsbereiches. Die Konzentrationen und die Verteilung in den Herbst- und Wintermonaten sind wieder ähnlich (Abb. 104).

Der zweite Jahreszyklus (Abb. 105) lässt wieder ein ganz anderes Muster erkennen. Im Juni 2013 sind die CO₂-Werte, im Vergleich mit März 2013 unerwartet hoch, und die CO₂-führenden Stellen erweitern sich in südlicher Richtung. Die Auswertungen der Messdaten von März 2014 führen zu ähnlichen Resultaten. Die Aufnahme der CO₂-Gehalte im Oktober 2013 unterscheidet sich massiv von den anderen des Jahreslaufes. In diesem Monat ist das gewohnte Auftreten des Exhalationsbereiches in den nördlichen Transekten festzustellen sowie leichte Ausgasungen in den südlichen Transekten. In den Aufnahmequadraten dazwischen wurde nahezu kein CO₂ notiert. Daraus folgt, dass genau der Bereich, in dem die Verschiebung des Ausgasungsmusters festgestellt wurde, Kontrollbereich ist.

Im dritten Jahreszyklus ist die Januarermessung 2014 vergleichbar mit der Märzermessung 2013. Die Messung im September 2014 weist in weiten Teilen ein annähernd gleiches Ausgasungsmuster auf wie die Junimessung 2013. Der Juni 2014 unterscheidet sich deutlich von den anderen Messungen in diesem Jahreslauf. An den Ausgasungen im Juni 2014 ist zu erkennen, dass der im Oktober 2013 festgestellte Kontrollbereich wieder CO₂-führend ist; ebenso die südlichen Transekte. In den nördlichen Messstellen werden leicht erhöhte CO₂-Konzentrationen verzeichnet.

Das gleiche Muster des zweiten und dritten Jahreszyklus setzt sich auch in der Messtiefe von 60 cm fort, mit höheren Konzentrationen (Abb. 108 und 109). Für den ersten Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 ist das gleiche festzustellen (Abb. 107).

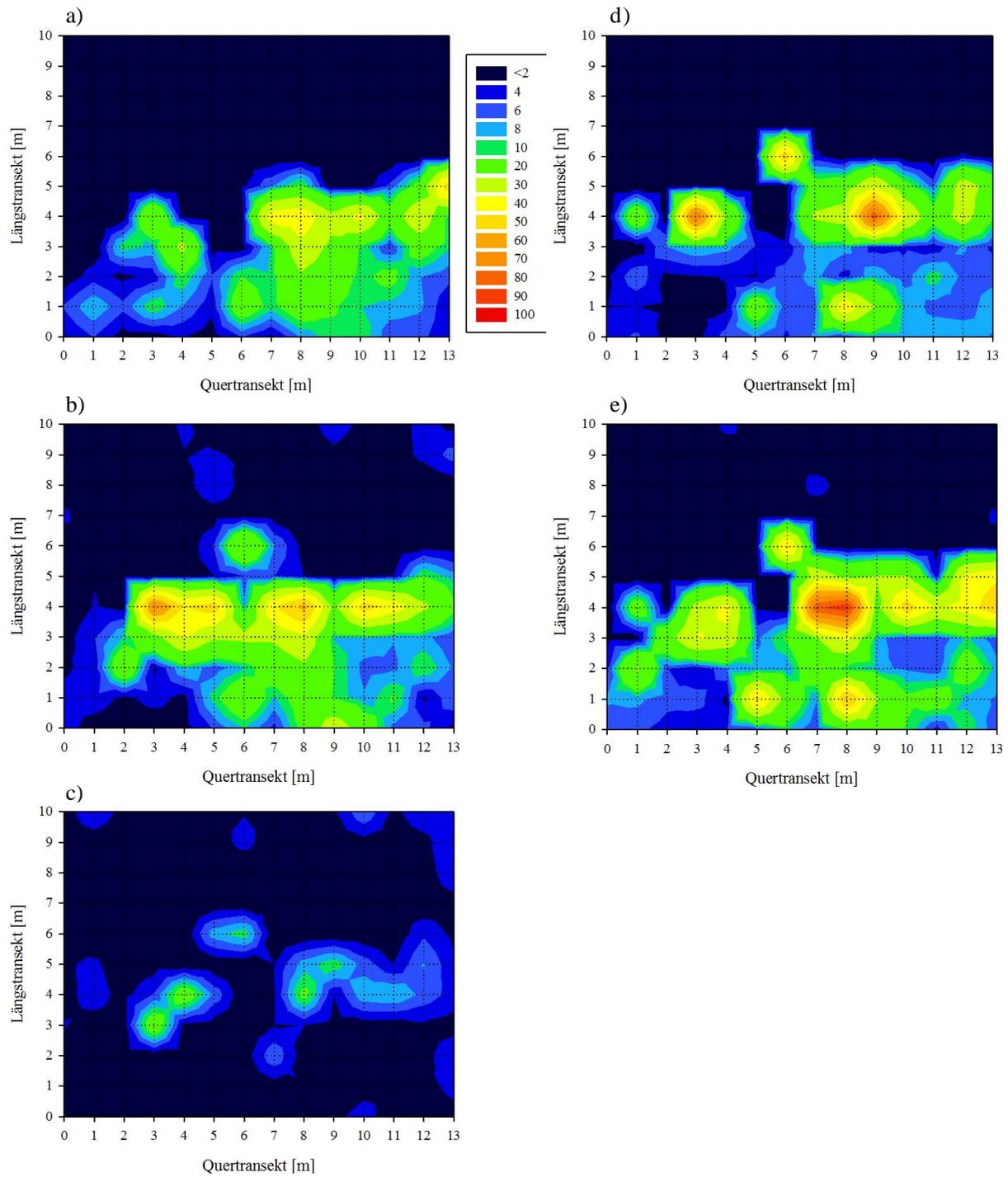


Abb. 102: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

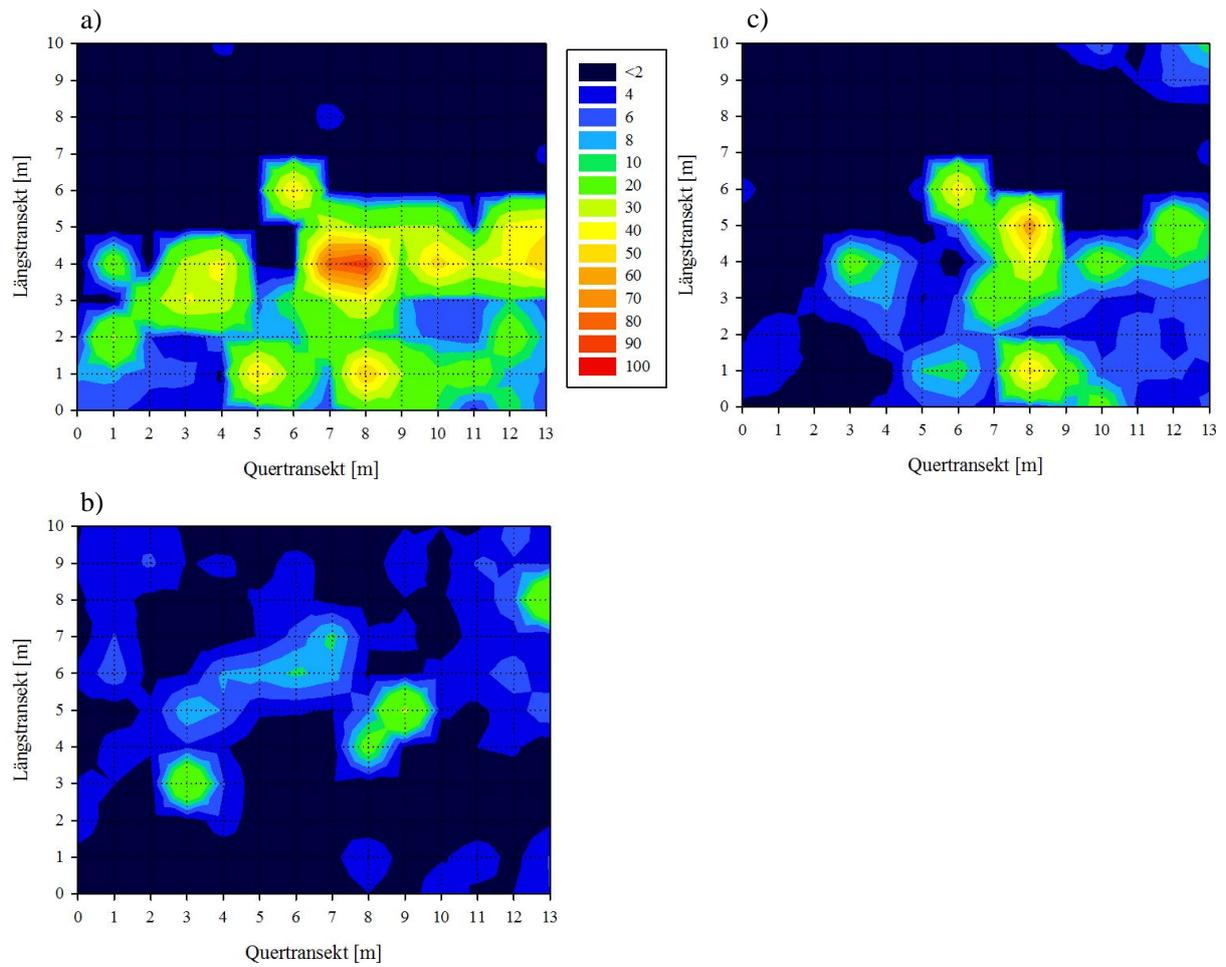


Abb. 103: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreszyklus konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

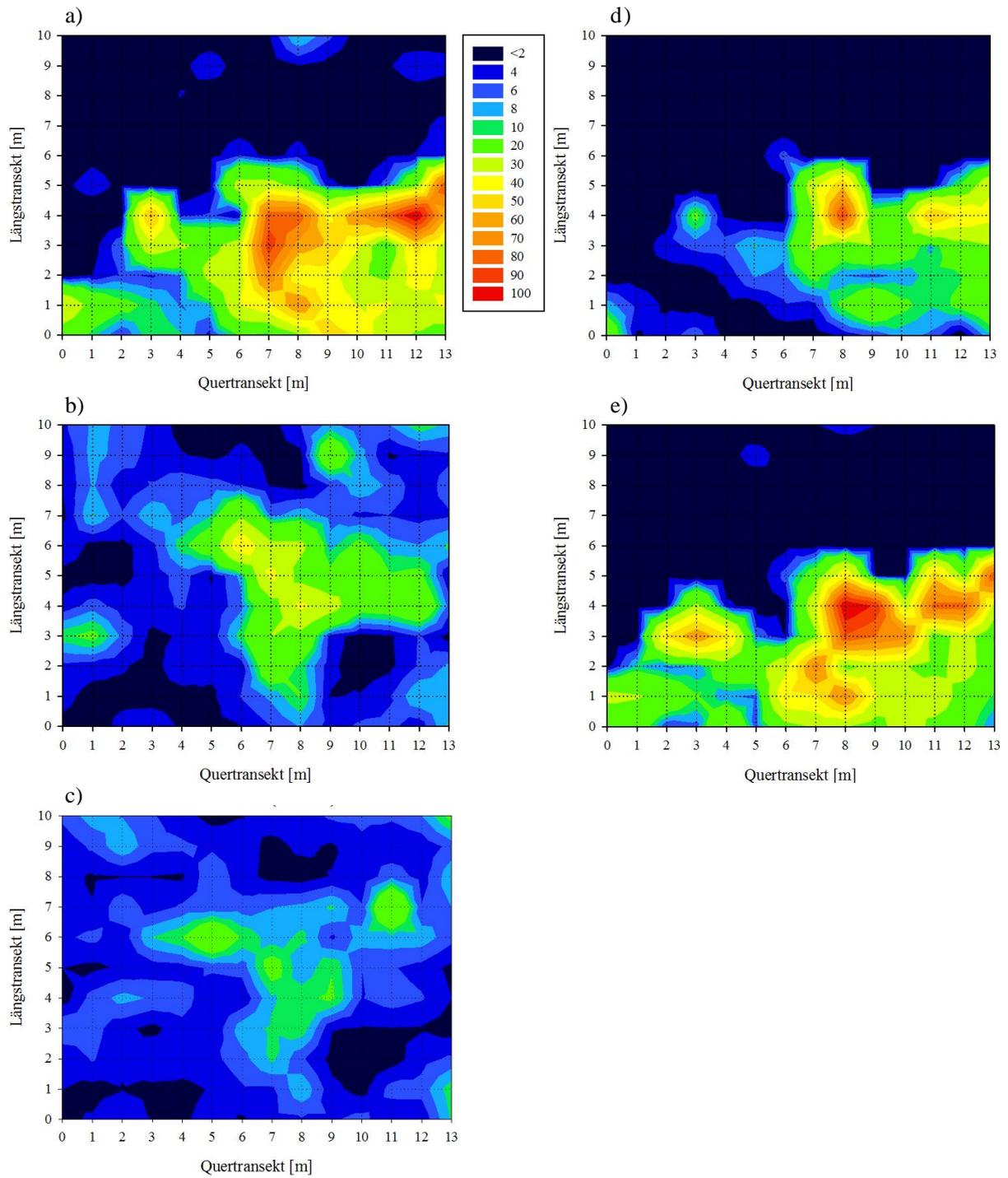


Abb. 104: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

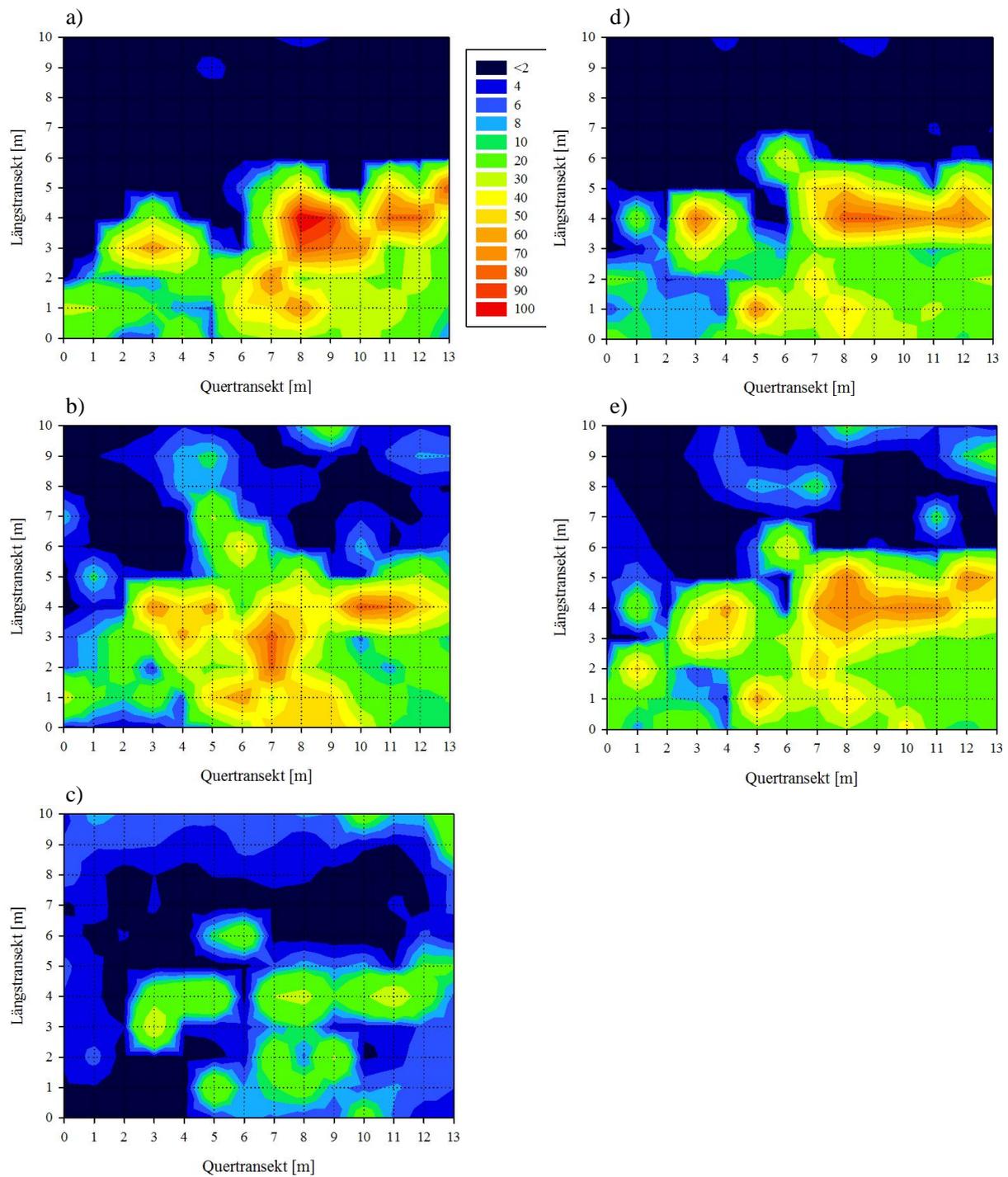


Abb. 105: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

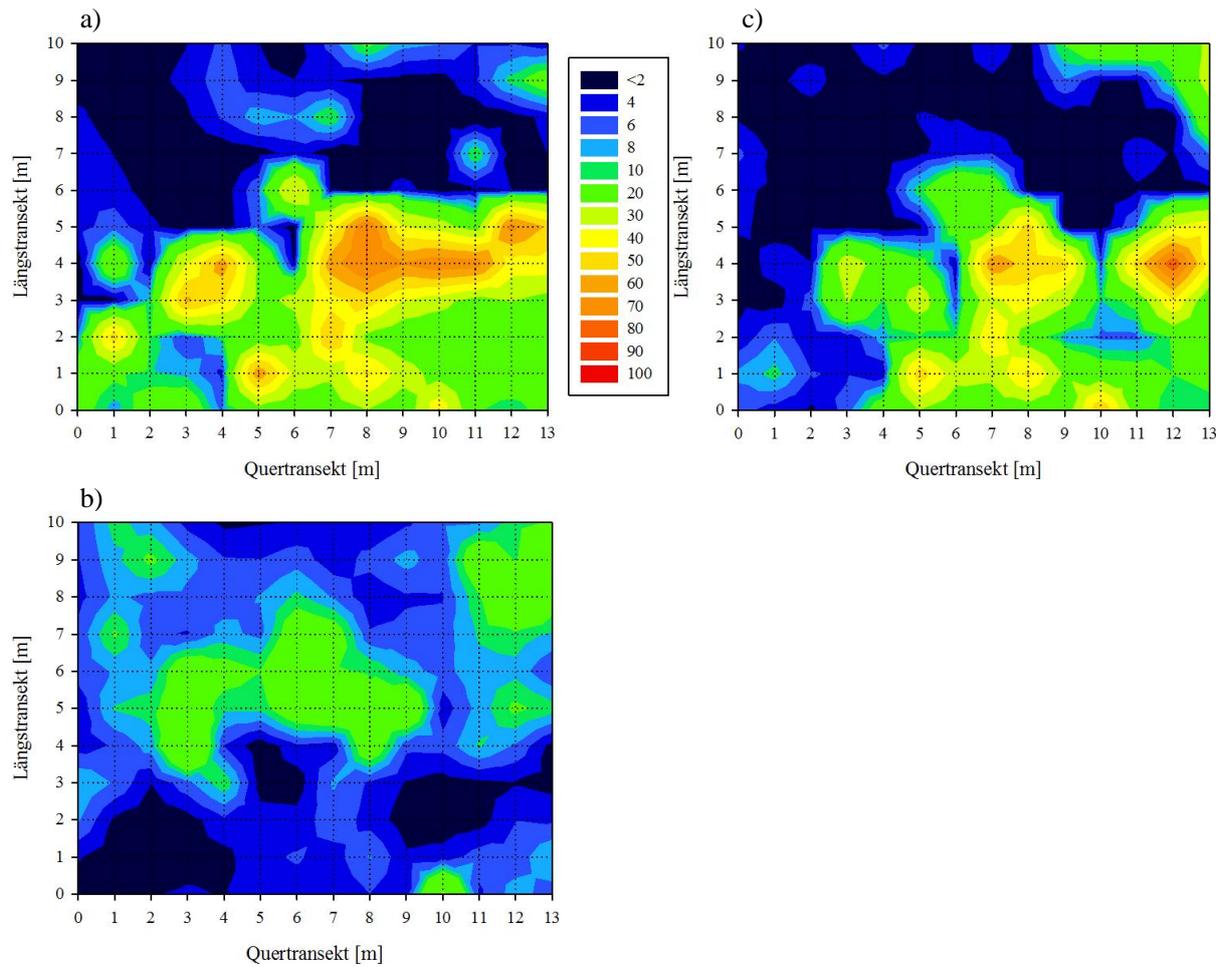


Abb. 106: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreszyklus konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

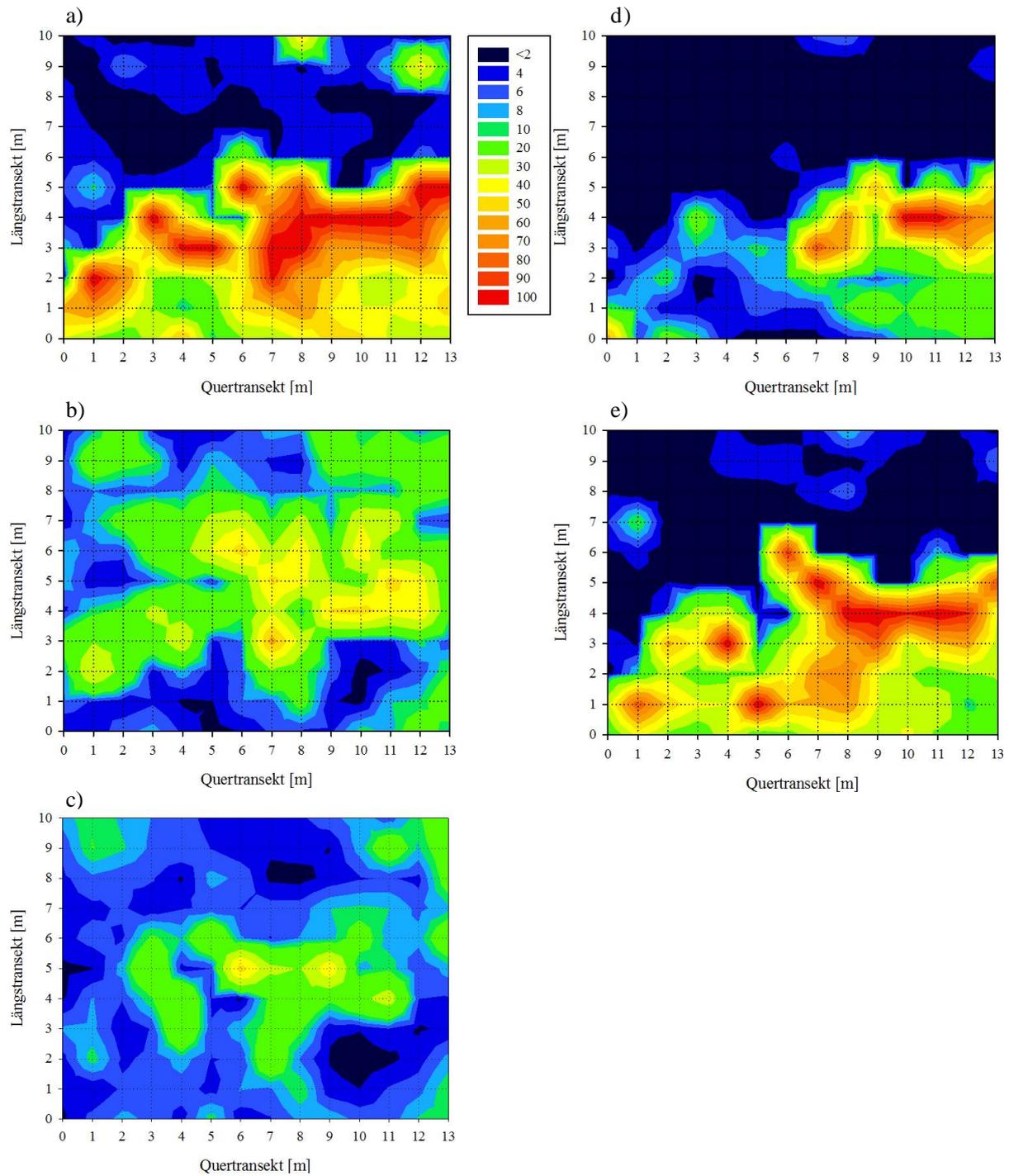


Abb. 107: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2012 bis 2013)

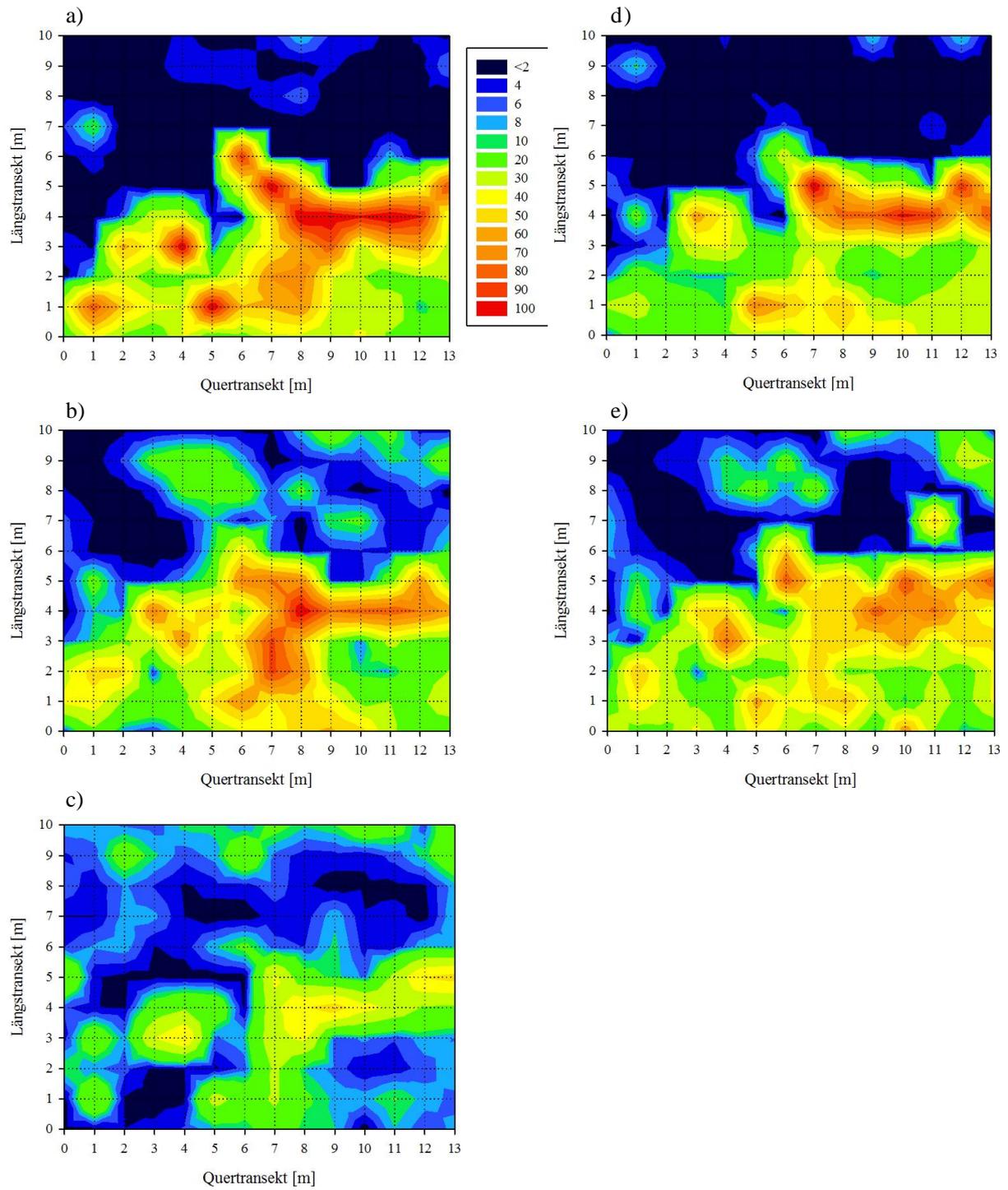


Abb. 108: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2013 bis 2014)

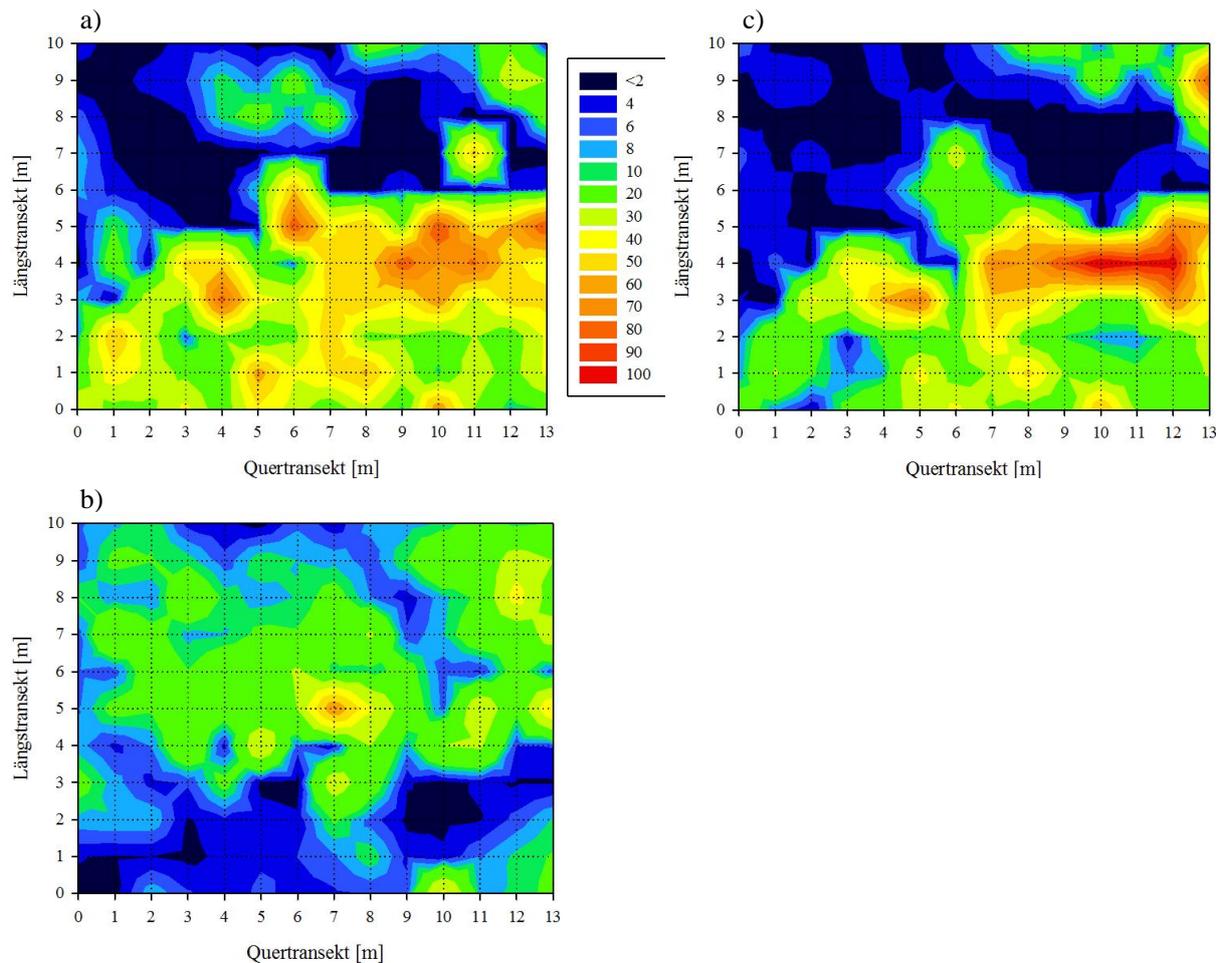


Abb. 109: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Der Jahreszyklus konnte nicht beendet werden.) (Datenerhebung 2014)

Die Jahreszyklen des Kohlendioxids in der Moosmofette weisen Gemeinsamkeiten mit den Ergebnissen der Birnenmofette auf (Kap. 3.1.2.2):

- ❖ Die Konzentrationsabnahmen in den Sommermonaten der Jahreszyklen konnten in beiden Mofetten in 10 cm Bodentiefe festgestellt werden.
- ❖ Auch der erneute Anstieg der CO₂-Konzentrationen im September 2014 konnte in beiden Flächen beobachtet werden.
- ❖ Allerdings wurde in der Birnenmofette in 20 cm Bodentiefe, im Juni 2012 ein verändertes Ausgasungsschema aufgenommen, dass sich in den zweiten Jahreslauf fortsetzt. Nicht die gleiche Veränderung aber dennoch sich fortsetzende Variationen des Exhalationsschemas, sind auch in der Moosmofette gemessen worden.
- ❖ Die Gasmessungen in den tieferen Bodenschichten zeigen in beiden untersuchten Standorten vergleichbare Entwicklungen des Kohlendioxids in den Jahresläufen.

Die sich teilweise ändernden Ausgasungsschemata die in der Birnenmofette beobachtet wurden, könnten sowohl seismische als auch nicht-seismische Ursachen haben (Kap. 3.1.2.1

und 3.1.2.2). Es bleibt jedoch zu klären, warum in der Moosmofette eine markante Verlagerung des Ausgasungsbereiches stattfindet. Diese Verlagerung könnte ein Indiz für die anfangs formulierte Annahme sein, dass sich die Moosmofette in einer rückläufigen Entwicklung befindet. Jedoch nicht unter der Annahme, dass alle Diffusionswege des Kohlendioxids verschlossen sind. Vielmehr scheint eine Verschiebung des Exhalationsbereiches stattgefunden zu haben. Diese deutet darauf hin, dass die eigentliche CO₂-Kernzone der Moosmofette lange Zeit in den südlichen Aufnahmequadranten lag, statt in den aktuell nördlichen. Seismische Bewegungen könnten zu dauerhaften Verdichtungen und Störungen in der Permeabilität im Süden der Fläche geführt haben, so dass sich zum heutigen Zeitpunkt die Diffusionswege des CO₂ verlagert haben.

Die Auswertung der Daten unter Berücksichtigung des Wetters geschieht mithilfe von zwei Auswertungsmethoden (Kap. 3.1.2.1). Aufgrund der festgestellten Parallelen zwischen beiden Mofetten sind die Kohlendioxidveränderungen in der Moosmofette auf die gleichen Ursachen zurückzuführen wie die Veränderungen in der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.2)

Möglicher Einfluss verschiedener Wetterfaktoren auf die vierteljährlichen CO₂-Schwankungen in dem gasenden Teilbereich

Für die Moosmofette sind die identischen Wetterparameter zu berücksichtigen, wie in der Birnenmofette (Tab. 32). Aufgrund der konstanten Wetterbedingungen in den Sommermonaten 2012 und 2013 waren die CO₂-Konzentrationen in der Birnenmofette in diesen Monaten gering. Durch die Messungen in der Moosmofette konnte dies erneut festgestellt werden. Die Abb. 110 zeigt, dass der Luftdruck wahrscheinlich keinen Einfluss auf die CO₂-Gehalte hatte. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den vierteljährlichen Messungen in der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.2). Abhängigkeiten konnten jedoch sowohl bei den jährlichen Messungen in der Birnenmofette (Kap. 3.1.2.1), als auch in der Moosmofette (Kap. 3.2.2.1) vermutet werden. Zusätzlich sind keine Zusammenhänge zwischen den Niederschlagsmengen und den Kohlendioxidkonzentrationen anzunehmen.

Bei den jährlichen Gasmessungen wurden bereits mögliche Abhängigkeiten von der Außentemperatur festgestellt (Kap. 3.2.2.1). Die Kurvenverläufe in Abb. 110 bestätigen die Beobachtungen. Bei hohen Temperaturen sind die CO₂-Konzentrationen niedrig, während sie bei niedrigen Temperaturwerten ansteigen. Eine Abweichung ist im Juli 2013 zu verzeichnen. Diese könnte mit einem zugleich starken Rückgang des Luftdruckes erklärt werden.

Ebenfalls kann für die Moosmofette bestätigt werden, dass die Schwarmbeben in 2011 vermutlich nicht zu Verdichtungen der Gaswege geführt haben (Kap. 3.1.2), da die CO₂-Konzentrationen im März 2012 wieder hoch sind.

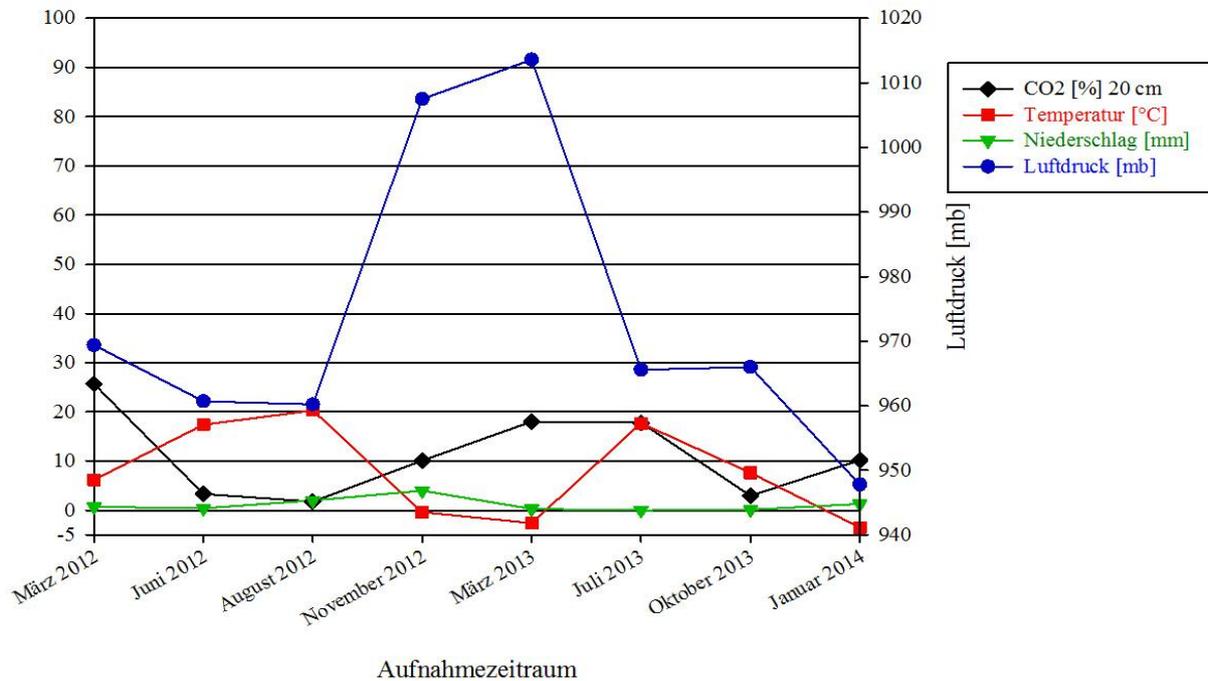


Abb. 110: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in der stabil gasenden Teilfläche der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind in Abb. 92 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Tab. 32: CO₂-Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Moosmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen. Erläuterungen sind in Tab. 29 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Jahr	Monat	CO ₂ 20 cm [%]	Temperatur [°C]	Luftdruck [mb]	Niederschlag [mm]
2012	März	25,7	6,2	969,4	0,7
2012	Juni	3,3	17,4	960,7	0,4
2012	August	1,8	20,4	960,2	2,0
2012	November	10,1	-0,4	1007,7	4,0
2013	März	18,0	-2,6	1013,6	0,3
2013	Juni	17,8	17,7	965,6	0,0
2013	Oktober	2,9	7,6	966,0	0,1
2014	Januar	10,2	3,5	947,8	1,3

Auswertung der vierteljährlichen Kohlendioxidveränderungen an den Einzelpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 im Bezug zu drei Wetterfaktoren

In der Abb. 111 sind die jahreszeitlichen CO₂-Veränderungen an den drei ausgewählten Messpunkten abgebildet, zusammen mit den Wetterfaktoren. Teilweise können die bisherigen Schlussfolgerungen in Kap. 3.1.2 und 3.2.2.1 bestätigt werden. Bereits in der Birnenmofette wurden Abweichungen festgestellt, die größtenteils durch Konkurrenzsituationen zwischen den Wetterfaktoren erklärt werden konnten. Bei einer Betrachtung der Abb. 111a-c sind ebenfalls Ausnahmen zu verzeichnen. Die stärksten Abweichungen sind bei der Abhängigkeit der Ausgasungen von dem Luftdruck zu beobachten. Zusätzlich werden erstmals Abweichungen von der Annahme festgestellt, dass die Temperatur eine mögliche Einflussgröße auf die CO₂-Konzentrationen ist (Punkt 6/6). Vermutlich bedingen unterschiedlich gewichtete Wetterkonstellationen diese Abweichungen, oder kurzfristig auftretende geodynamische Effekte.

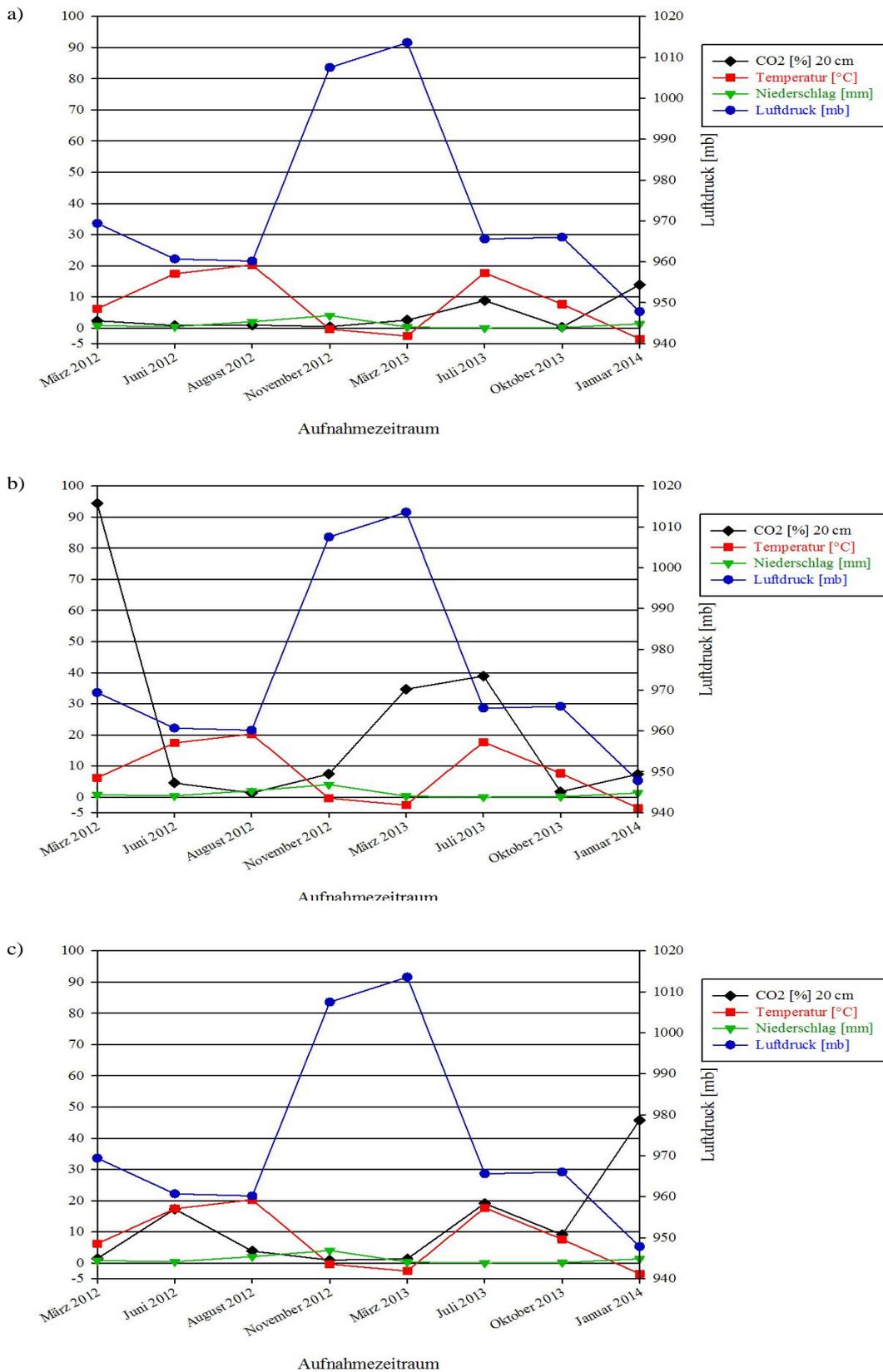


Abb. 111: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 1/5 (a), 4/7 (b) und 6/6 (c) der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. Weitere Erklärungen sind in Abb. 92 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Tab. 33: CO₂-Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 in der Moosmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen. Erläuterungen sind in Tab. 29 zu finden. (Datenerhebung 2012 bis 2014)

Jahr	Monat	CO ₂ 20	CO ₂ 20	CO ₂ 20	Temperatur [°C]	Luftdruck [mb]	Niederschlag [mm]
		cm [%] 1/5	cm [%] 4/7	cm [%] 6/6			
2012	März	2,3	94,4	1,4	6,2	969,4	0,7
2012	Juni	0,9	4,5	17,3	17,4	960,7	0,4
2012	August	0,9	1,3	3,8	20,4	960,2	2,0
2012	November	0,4	7,4	0,9	-0,4	1007,7	4,0
2013	März	2,5	34,7	1,3	-2,6	1013,6	0,3
2013	Juni	8,8	38,9	13,1	17,7	965,6	0,0
2013	Oktober	0,3	1,7	9,1	7,6	966,0	0,1
2014	Januar	13,9	7,3	45,8	3,5	947,8	1,3

Fazit

Die Auswertung der vierteljährlichen Gasmessungen unter Berücksichtigung der Wetterbedingungen konnten die Schlussfolgerungen in Kap. 3.1.2 und 3.2.2.1 bestätigen, wodurch einige Zusammenhänge bekräftigt wurden. Beobachtete Ausnahmen könnten durch verschiedene Konstellationen der Wetterfaktoren erklärt werden oder durch das potentielle Auftreten geodynamischer Einflüsse. Das Auftreten einer Verlagerung des Ausgasungsbereiches ist sowohl für die nachfolgende Auswertung der Vegetation, als auch für die weitere Forschungstätigkeit in der Moosmofette von besonderer Bedeutung.

3.2.3 Die vegetationskundlichen Untersuchungen in der Moosmofette

Bei der Aufnahme wurden insgesamt 62 Gefäßpflanzenarten verzeichnet und drei Moose. Wie in Kap. 3.1.3 erklärt, werden nicht alle Indikatorarten vorgestellt; diese sind im Anhang zu finden.

3.2.3.1 Artenvielfalt und Gesamtdeckungsgrad in der Moosmofette

Hinsichtlich der Artenzahlen pro Aufnahmequadrat ist die Moosmofette zweigeteilt. Die unteren Transekte 0 bis 3 sind im Vergleich zu den Transekten 4 bis 10 mit maximal acht Arten pro Quadratmeter sehr Arten arm (Abb. 112a). Die letzten drei Aufnahmestellen dieser Transekte sind aufgrund anthropogener Einflüsse vegetationsfrei.

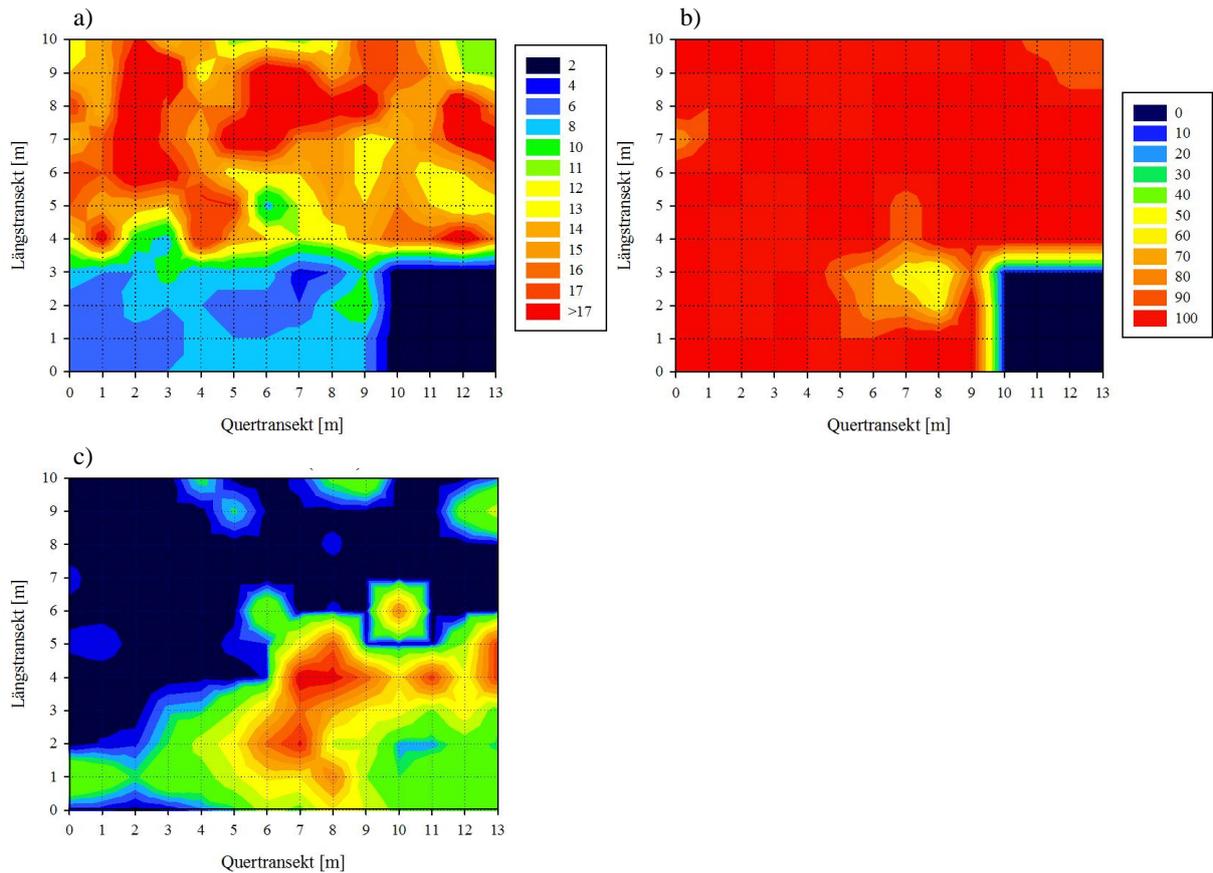


Abb. 112: Artenzahlen (a) und Gesamtdeckungsgrad [%] des Pflanzenbestandes (b) pro Aufnahmequadrat und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c) in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Die Zweiteilung der Artenverteilung folgt der Teilung der Mofette in Ausgasungs- und Kontrollbereich mit einer Überlappung hoher Artenzahlen in die Ausgasungen hinein (Abb. 112a,c). Allerdings sind auch Aufnahmequadrate mit höheren Artenzahlen in gasenden Bereichen zu finden und niedrige auf nicht-gasenden Stellen.

Als mögliche Erklärungen für die geringe Artenvielfalt in den Transekten 0 bis 3 kommt sowohl hohe die Bodenfeuchtigkeit durch den Wassergraben in Betracht, als auch die Stickstoffverfügbarkeit. In den nördlichen vier Transekten (Kap. 2.2) wurden die höchsten Wassergehalte im Boden gemessen. Die Pflanzendecke wird dort überwiegend von den Arten *Urtica dioica* und *Alopecurus pratensis* bestimmt. Beide sind Frische- oder Feuchtezeiger sowie Stickstoffzeiger (Tab. 14 und 15). Durch ihr ökologisches Verhalten sind sie in den feuchten, möglicherweise stickstoffreichen, Aufnahmequadraten im Vorteil gegenüber anderen Arten, so dass fast reine Monokulturen dieser beiden Pflanzen entstehen konnten. Begleitet werden sie hauptsächlich von *Galium aparine* oder *Cirsium arvense*. Der Stickstoff könnte entweder von den Spritzfahrzeugen direkt oder über die Wasserzufuhr in die unteren

Bodenbereiche eingebracht werden, da er nah an landwirtschaftlich genutzten Flächen entlang fließt die regelmäßig gedüngt werden.

Wie bereits in der Birnenmofette festgestellt werden konnte (Kap. 3.1.3.1), bildet der Pflanzenbestand in der Moosmofette über der ganzen Fläche eine starke Pflanzendecke aus. Zusätzlich sind zwischen Transekt 2 und 3 wenige Stellen mit geringeren Deckungsgraden zu finden. Dort ist der Boden sehr grobporig, was eine Einschränkung des Pflanzenwachstums bewirken könnte (vgl. Birnenmofette Kap. 3.1.3.1).

Eine statistische Auswertung der Beziehung zwischen den Artenzahlen und den CO₂-Gehalten ergibt eine durchgehend schwache Korrelation für alle Messtiefen, während zwischen der Gesamtdeckung und dem Kohlendioxid keine Korrelation besteht. Der letztgenannte fehlende Zusammenhang bestätigt die Resultate der Auswertungen der Birnenmofetten-Daten (Kap. 3.1.3.1). Die schwache Korrelation bezüglich der Artenzahlen und dem CO₂ ist wahrscheinlich auf die Zweiteilung der Artenvielfalt in der Fläche zurückzuführen. Die Kontrollfläche ist nahezu von vielen Arten überzogen, während der Ausgasungsbereich von wenigen Arten bedeckt wird (Abb. 112a,c). Der schmale Bereich dazwischen, in dem dieses Schema nicht aufrecht gehalten werden kann, findet keine starke Berücksichtigung in der Berechnung des Korrelationskoeffizienten.

Fazit

Die Pflanzendecke in der Moosmofette ist vergleichbar artenreich wie in der Birnenmofette (Kap. 3.1.3.1). Als Folge unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten und Ausprägungen der Bodeneigenschaften variieren die Artenverteilung und der Gesamtdeckungsgrad, wobei Parallelen zu den Ergebnissen der Birnenmofette festgestellt werden konnten (Kap. 3.1.3.1).

3.2.3.2 Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Mofettenzeiger sowie der mofettovagen Arten in der Moosmofette

Die Tab. 34 enthält eine Liste der gefundenen Zeigerarten in der Moosmofette. Ein Vergleich mit Tab. 11 zeigt, dass einige dieser Arten ebenfalls in der Birnenmofette verzeichnet wurden. Unter den positiven Mofettenzeigern sind einzig die Moose *Aulacomnium palustre* und *Polytrichum commune* neu hinzugekommen. Als neue Vertreter der negativen Mofettenzeiger konnten *Galium uliginosum* und *Lotus pedunculatus* in der Moosmofette vermerkt werden.

Tab. 34: Indikatorarten in der Moosmofette im Aufnahmejahr 2009.

positive Mofettenzeiger	negative Mofettenzeiger
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) - Sumpf-Streifensteremoos	<i>Agrostis capillaris</i> (L.)- Rotes Straußgras
<i>Calluna vulgaris</i> (L.)- Heidekraut	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.)- Wiesenkerbel
<i>Festuca ovina</i> (L.)- Schafschwingel	<i>Cirsium arvense</i> (L.)- Acker-Kratzdistel
<i>Hieracium lachenalii</i> (Gmel.) - Gemeines Habichtskraut	<i>Elymus repens</i> (L.)- Gemeine Quecke
<i>Hieracium pilosella</i> (L.) - Mausohr-Habichtskraut	<i>Galium aparine</i> (L.)- Klebkraut
<i>Luzula campestris</i> (L.)- Feld-Hainsimse	<i>Galium uliginosum</i> (L.)- Moor-Labkraut
<i>Nardus stricta</i> (L.)- Borstgras	<i>Lotus pedunculatus</i> (Schk.) - Sumpf- Hornklee
<i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) - Rotstängelmoos	<i>Polygonum bistorta</i> (L.)- Schlangenknöterich
<i>Polytrichum commune</i> (Hedw.) - Goldenes Frauenhaarmoos	<i>Populus tremula</i> (L.)- Zitterpappel
<i>Rumex acetosella</i> (L.) - Kleiner Sauerampfer	<i>Urtica dioica</i> (L.)- Große Brennnessel
	<i>Veronica chamaedrys</i> (L.) - Gamander Ehrenpreis

Der Abb. 113 ist die Ausbreitung der zwei Zeigergruppen und der mofettovagen Pflanzen zu entnehmen.

Die Verteilung der mofettophilen Arten weist fast die gleiche Zweiteilung der Fläche auf, wie es bereits bei den Artenzahlen zu beobachten war. In den unteren Transekten 0 bis 3 ist der Anteil dieser Pflanzen an der Bedeckung kleiner 2%. Hingegen dominieren die positiven Mofettenzeiger die Pflanzendecke in allen anderen Aufnahmequadraten nahezu gleich stark (Abb. 113a). Die negativen Indikatorarten sind fast in der ganzen Fläche zu finden (Abb. 113b). Alle restlichen aufgenommenen Arten bedecken die Fläche überwiegend in den Bereichen, in denen die Deckungsgrade der positiven und negativen Mofettenzeiger niedrig sind. Dabei erfolgt annähernd eine Zweiteilung der Moosmofette, allerdings nicht wie bei den positiven Zeigern nach den Längstransekten, sondern nach den Quertransekten. In den ersten

Aufnahmequadraten der Transekte ist der Anteil der mofettovagen Arten an der Pflanzendecke hoch, und nimmt dann im Verlauf der Messstellen ab (Abb. 113c).

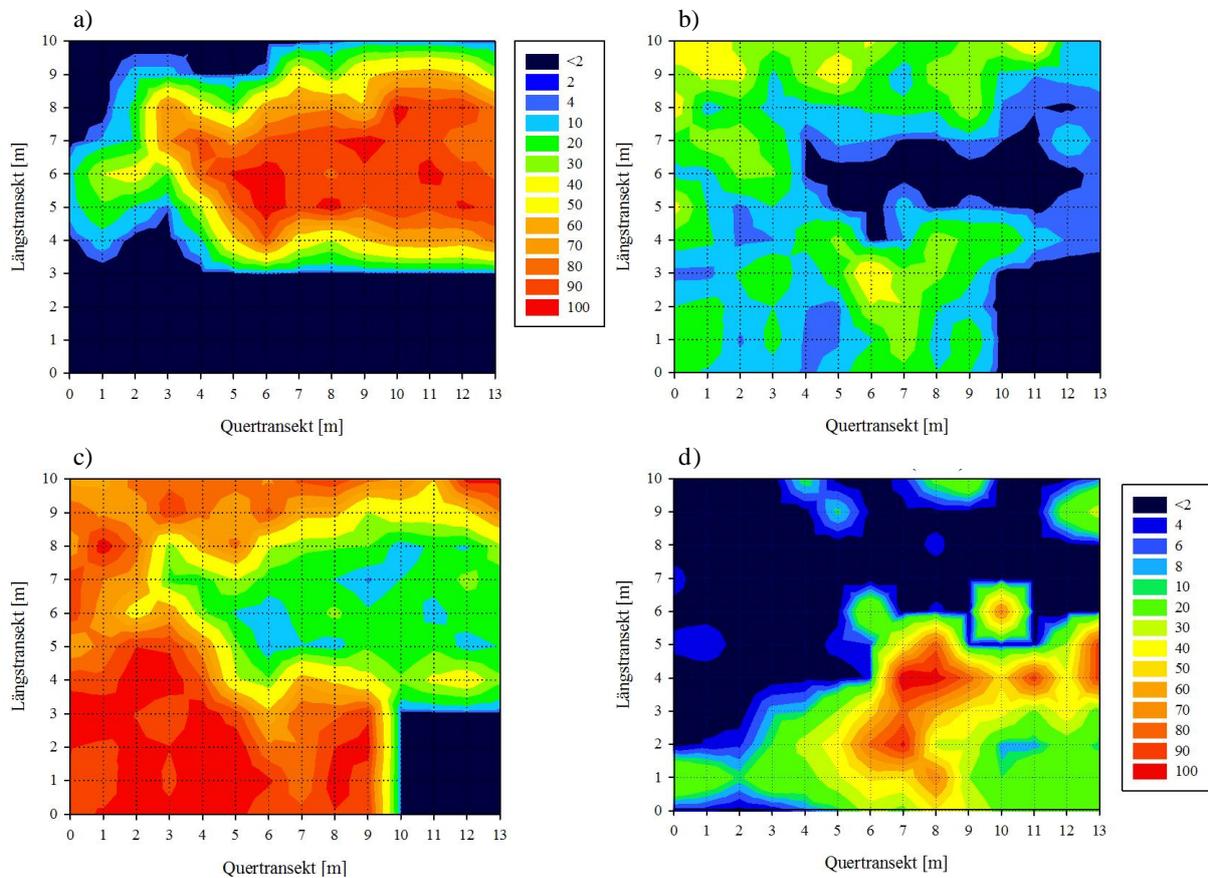


Abb. 113: Deckungsgrad [%] der positiven Mofettenzeiger (a), der negativen Mofettenzeiger (b), sowie der mofettovagen Pflanzenarten (c) und CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Im Vergleich der Abb. 113a-c mit den Kohlendioxidkonzentrationen ergibt sich kein klares Muster wie in der Birnenmofette (vgl. Kap. 3.1.3.2).

Die positiven Mofettenzeiger breiten sich hauptsächlich im südlichen Kontrollbereich der Moosmofette aus, jedoch nicht in den Transekten 0 bis 3, in denen auch erhöhte CO₂-Konzentrationen gemessen wurden. Die negativen Mofettenzeiger sind fast auf dem gesamten untersuchten Standort zu finden und meiden dabei den gasenden Bereich. Das Ausbreitungsverhalten der mofettovagen Pflanzenarten ist annähernd mit dem in der Birnenmofette zu vergleichen. Diese Pflanzen wachsen größtenteils in den Übergangs- und Kontrollquadraten der Untersuchungsfläche. Auf den stark CO₂-führenden Messstellen wurden geringere Deckungsgrade dieser Gruppe verzeichnet.

Dieses Verbreitungsmuster der drei Gruppen manifestiert sich in fehlenden Korrelationen zwischen der Vegetation und dem Kohlendioxid (Tab. 35). Mit diesen Resultaten

unterscheidet sich die Vegetationsaufnahme in der Moosmofette prägnant von der in der Birnenmofette. Mit den Birnenmofetten-Daten wurden starke Korrelationen ermittelt (Kap. 3.1.3.2).

Tab. 35: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] pro Aufnahmequadrat in der Moosmofette. Die Deckungsgrade sind die Rohwerte der Aufnahme, die CO₂-Werte sind Mittelwerte. (Datenerhebung 2009)

	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
positive Mofettenzeiger	0,19	0,19	0,11	0,14
negative Mofettenzeiger	-0,17	-0,05	-0,11	-0,22
mofettovage Pflanzenarten	-0,27	-0,16	-0,11	-0,05

In Kap. 3.2.2.2 wurde die Hypothese formuliert, dass der rezente Kernbereich der Mofettenzone in der Moosmofette nicht immer in dem beschriebenen Bereich (Kap. 3.2.1.1) gelegen hat, sondern in einem anderen. Diese Hypothese wird sowohl durch die Auswertung der bildlichen Darstellungen, als auch durch die statistische Analyse der Vegetationsaufnahme bestätigt. Die Verbreitung der positiven und negativen Mofettenzeiger könnte darauf hindeuten, dass der ursprüngliche Exhalationsbereich den südlichen Aufnahmequadraten (Kap. 2.2) zuzuordnen war, der heute von den mofettophilen Arten dominiert wird. Zieht man beispielsweise die CO₂-Abbildungen von Juni 2012 oder 2014, in 40 cm und 60 cm Bodentiefe, hinzu (Abb. 104b, 107b, 106b und 109b) ist der Zusammenhang zwischen dem Aufkommen des Mofettengases und den Deckungsgraden der Indikatorgruppen deutlicher. Daraus folgt die Annahme, dass die Vegetation einen vergangenen Mofettenbereich anzeigt, und noch keine Fluktuation oder Sukzession stattgefunden oder eingesetzt hat (Kap. 3.1.5).

Fazit

Die Bildung der Pflanzendecke in der Moosmofette ist nicht vergleichbar mit den Erkenntnissen aus der Auswertung der Birnenmofetten-Vegetation. Vermutlich fand im Laufe der Zeit in der Moosmofette eine Verlagerung des Ausgasungsbereiches statt. Es ist anzunehmen, dass dieser sowohl durch die Verteilung der mofettophilen Pflanzen, als auch der mofettophoben angezeigt wird. Die schwerpunktmäßige Ausbreitung der positiven Mofettenzeiger findet nicht, wie bei der Birnenmofette, in den gasenden Bereichen statt, sondern in den nicht-gasenden. Die Ausbreitung der mofettovagen Arten ist vergleichbar mit der in der Birnenmofette.

3.2.3.3 Das ökologische Verhalten ausgesuchter positiver Mofettenzeiger

Die nachfolgenden Detailabbildungen der ausgewählten mofettophilen, mofettophoben und mofettovagen Pflanzen in den Kap. 3.2.3.3-3.2.3.5 bekräftigen die abschließende Schlussfolgerung von Kap. 3.2.3.2 weitestgehend. Ausführliche Beschreibungen der Arten sind in Kap. 3.1.3 nachzulesen. Einzig die Beschreibung von *Hieracium lachenalii* wird in diesem Kapitel vorgenommen, da diese Indikatorart nicht in der Birnenmofette gefunden wurde.

Calluna vulgaris, Festuca ovina und Pleurozium schreberi

Die Abb. 114a,b;d zeigen die Ausbreitung von *Calluna vulgaris*, *Festuca ovina*, und *Pleurozium schreberi*. Im Falle von *Calluna vulgaris* und *Pleurozium schreberi* ist diese nahezu deckungsgleich mit der Verbreitung der positiven Mofettenzeiger (Abb. 113a).

Die Verbreitung des Schafschwingels ist nicht in dem Ausmaß flächendeckend, wie die des Heidekrautes oder des Rotstängelmooses. Diese positiven Indikatorarten wachsen hauptsächlich in den Kontrollquadraten des Messrasters, statt in den gasenden. Statistische Analysen führen zu dem Ergebnis, dass die Ausbreitung von *Calluna vulgaris* und *Festuca ovina* in der Moosmofette, aufgrund des indifferenten Verhaltens gegenüber der Bodenfeuchte (Tab. 13), hauptsächlich von dieser Bodeneigenschaft bedingt wird ($r=-0,58$ und $r=-0,40$). Auch *Pleurozium schreberi*, das zwischen den Trocknis- und Frischezeigern einzuordnen ist (Tab. 13), findet bezüglich des Bodenwassers in diesen Aufnahmequadraten optimale Bedingungen vor (Abb. 82). Der Korrelationskoeffizient beträgt $-0,66$. Das gleiche Ergebnis ist ebenfalls bei *Hieracium lachenalii* festzustellen.

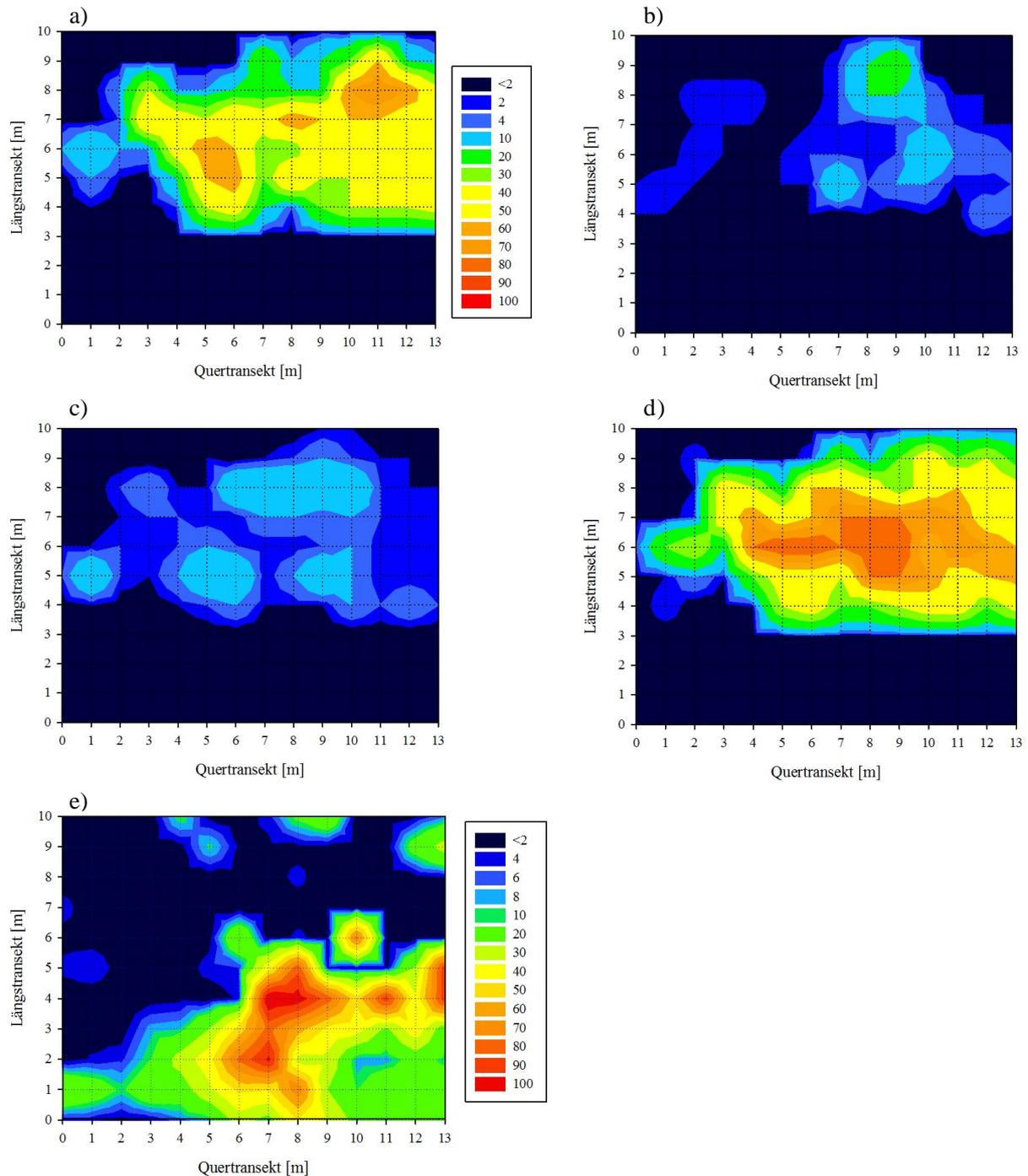


Abb. 114: Deckungsgrad [%] von *Calluna vulgaris* (a), *Festuca ovina* (b), *Hieracium lachenalii* (c) und *Pleurozium schreberi* (d), im Vergleich mit der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (e), in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Ledende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Hieracium lachenalii

Für *Hieracium lachenalii* gelten die gleichen Feststellungen wie für die oben beschriebenen mofettophilen Pflanzen. Neben dem in Kap. 3.1.3.3 charakterisierten *Hieracium pilosella*, gehört diese Asteraceae ebenfalls zu den Habichtskräutern. Das Gewöhnliche Habichtskraut ist meistens in Wäldern oder Gebüsch zu finden (Schmeil und Fitschen 2011).

In der Moosmofette ist *Hieracium lachenalii* vermehrt in den Transekten 4 bis 9 zu finden, demnach in den Aufnahmequadraten der Kontrollzone, die überwiegend von den positiven Mofettenzeigern überzogen ist (Abb. 114a). Im Vergleich mit den anderen mofettophilen Pflanzen sind die Deckungsgrade mit Werten von 2 bis 10% jedoch gering.

Die statistischen Analysen für das Gewöhnliche Habichtskraut führen, zu keinen Korrelationen hinsichtlich des Kohlendioxids, oder des pH-Wertes. Die Ausbreitung von *Hieracium lachenalii* auf dieser Untersuchungsfläche ist von dem Bodenwasser abhängig ($r = -0,41$).

Das ökologische Verhalten dieser *Hieracium*-Art umfasst folgende Eigenschaften: Halbschattenpflanze, Mäßigwärmezeiger, Trocknis- bis Frischezeiger, Säurezeiger- bis Mäßigsäurezeiger, sowie potentieller Magerkeitszeiger. Nach dem soziologischen Verhalten ist diese Art dem Verband der *Quercion robori-petraeae* zuzuordnen (Ellenberg et al. 2001). Unter Berücksichtigung der ermittelten Bodeneigenschaften können zwei Beobachtungen bezüglich des Verbreitungsverhaltens von *Hieracium lachenalii* festgehalten werden. Zum Einen wächst es überwiegend in mäßig feuchten Bereichen der Fläche, die gleichzeitig den geringsten organischen Mengenanteil aufweisen (Kap. 3.2.1.5). Zum Anderen liegt der pH-Wert der von dem Gewöhnlichen Habichtskraut bedeckten, Aufnahmequadrate im sauren Wertebereich (Kap. 3.2.1.6).

Demzufolge ist das Ausbreitungsmuster dieser mofettophilen Art verständlich. Dennoch ist es wahrscheinlich, dass eine weitere Variable als Wirkungsfaktor berücksichtigt werden muss, zum Beispiel das Kohlendioxid. Denn die Bodeneigenschaften sind in dieser Form auch an anderen Messstellen des untersuchten Standortes gemessen worden, an denen *Hieracium lachenalii* nicht zu finden war. Es kann dementsprechend auch in diesem Fall die Annahme formuliert werden, dass diese positive Zeigerart einen ursprünglichen Exhalationsbereich anzeigt.

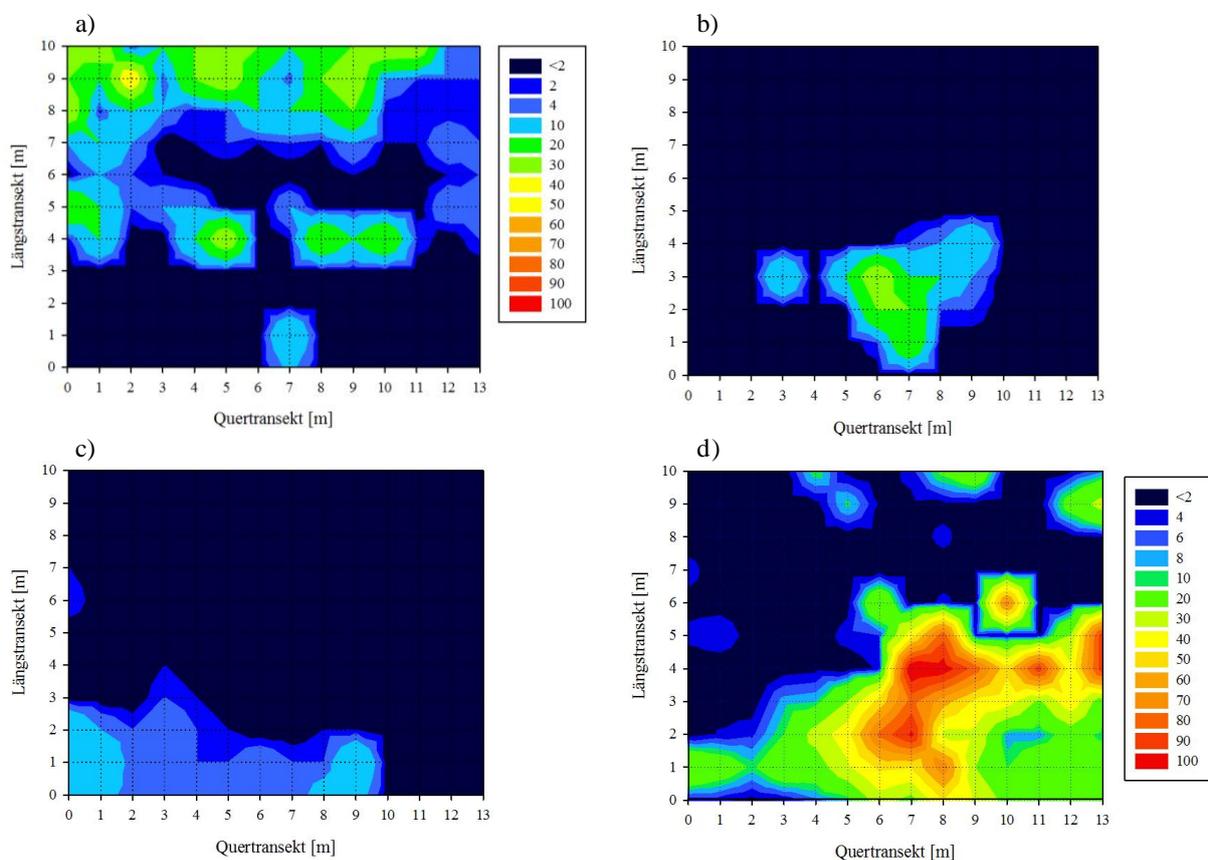
Fazit

Die Abbildungen konnten zeigen, dass die vorgestellten positiven Mofettenzeiger an der Bildung der mofettophilen Pflanzendecke beteiligt sind. Sie wachsen in den Aufnahmequadraten in denen die Deckungsgrade der positiven Indikatoren am höchsten sind. Des Weiteren bestätigen sie die bereits formulierte Annahme, dass die mofettophilen Pflanzen in einem Bereich der Moosmofette wachsen in dem vermutlich in vergangenen Zeiten der Kernbereich der Mofettenzone gelegen haben könnte.

3.2.3.4 Das ökologische Verhalten negativer Mofettenzeiger

Agrostis capillaris, *Elymus repens* und *Urtica dioica*

Das Rote Straußgras ist die einzige mofettophobe Zeigerart die hohe Deckungsgrade aufweist und flächendeckend in vielen Aufnahmequadraten gefunden wurde (Abb. 115a). Mithilfe der Abbildung wird deutlich, dass das Rote Straußgras vorwiegend im Süden der Moosmofette (Kap. 2.2) wächst sowie teilweise in mittig gelegenen Aufnahmequadraten. Das Verteilungsschema ist demnach mit der Pflanzendecke übereinstimmend, die von den negativen Mofettenzeigern gebildet wird (Abb. 113b). Die anderen Arten (*Elymus repens* und *Urtica dioica*) konnten partiell in nördlichen Aufnahmequadraten verzeichnet werden, jedoch mit nur sehr geringen Deckungsgraden (Abb. 115b,c).



Ab. 115: Deckungsgrad [%] von *Agrostis capillaris* (a), *Elymus repens* (b) und *Urtica dioica* (c), im Vergleich mit der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Als negativer Mofettenzeiger breitet sich *Agrostis capillaris* nicht im Mofettenbereich aus, jedoch auch nicht im Kontrollbereich. Unter Einbeziehung der aktuellen Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass es ebenfalls einen früheren Ausgasungsbereich meidet. Die Arten *Elymus repens* und *Urtica dioica* wachsen im heutigen gasenden Bereich (Abb. 115a-c;d).

Fazit

Die Verbreitung von *Agrostis capillaris*, *Elymus repens* und *Urtica dioica* bestärken die Annahme, dass auch das Wachstum der mofettophoben Pflanzenarten auf einen früheren Ausgasungsbereich hinweist.

3.2.3.5 Das ökologische Verhalten ausgesuchter mofettovager Arten

Deschampsia cespitosa, *Potentilla erecta*, *Succisa pratensis*

Deschampsia cespitosa wächst sowohl in den Kontroll- als auch in den Ausgasungsbereichen, und umrandet folglich einen Kontrollbereich statt die CO₂-Ausgasungen (Abb. 116a,d).

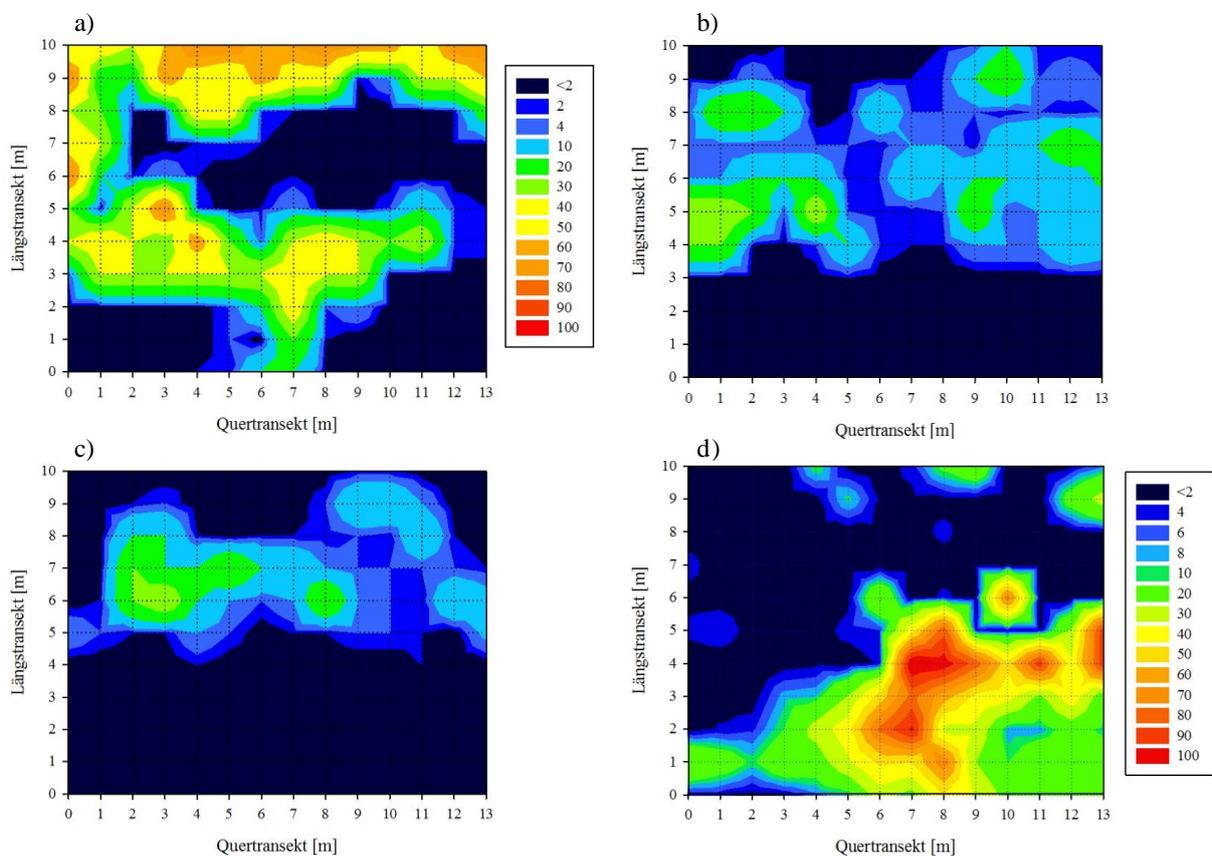


Abb. 116: Deckungsgrad [%] von *Deschampsia cespitosa* (a), *Potentilla erecta* (b) und *Succisa pratensis* (c), im Vergleich mit der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d), in der Moosmofette. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009)

Potentilla erecta und *Succisa pratensis* wachsen in den Kontrollquadraten, statt in den Übergangsbereichen (Abb. 116b-d). Dementsprechend deckt sich ihre Verbreitung mit dem Ausbreitungsverhalten der mofettophilen Zeiger.

Nach statistischen Berechnungen neigen beide Arten in ihrem Verbreitungsverhalten zu einer schwachen Abhängigkeit zu der Bodenfeuchte. Hingegen deutet das Ausbreitungsmuster von *Deschampsia cespitosa* einen früheren Ausgasungsbereich an.

Fazit

Die Verteilungsmuster der ausgesuchten mofettovagen Pflanzenarten bestätigen die oben beschriebene Vermutung über die Verschiebung der gasenden Bereiche in der Moosmofette.

3.2.4 Bewertung der Moosmofetten-Vegetation mithilfe kanonischer Korrespondenzanalysen

Nachdem sich in Kap. 3.1.4 herausgestellt hat, dass die kanonische Korrespondenzanalyse eine nützliche Methode zur Auswertung multivariabler Datensätze ist, wird diese Technik auch hier genutzt.

Auftrennung entlang der Gradienten aller gemessenen Bodeneigenschaften

Der Datensatz, der den CCA-Diagrammen in Abb. 117 zugrunde liegt, besteht aus allen gemessenen Bodeneigenschaften in Verbindung mit allen dikotylen Pflanzen (a) oder allen monokotylen Pflanzen (b).

Die Abb. 117a verdeutlicht, dass das Kohlendioxid, der Gasfluss und die Bodendichte keinen Einfluss auf die Artenzusammensetzung dieses Datensatzes haben, da die Pfeile sehr kurz sind. Die Bodenazidität, die Bodenfeuchte, die Leitfähigkeit und der organische Anteil bestimmen im höheren Maße die Verteilung der Arten.

Die meisten positiven Mofettenzeiger befinden sich mit ihren Artwerten auf den gegenüberliegenden Seiten der Pfeilspitzen. *Hieracium lachenalii* und *Rumex acetosella* beispielsweise ordnen sich sauren pH-Werten zu. Für die Verbreitung von *Hieracium pilosella* und *Calluna vulgaris* ist zum Beispiel ein niedriger Bodenwassergehalt entscheidend. Die Zuordnung der negativen Mofettenzeiger zu den Umweltgradienten führt zu starken Abhängigkeiten von mäßigen bis hohen Bodenfeuchtegehalten sowie mäßig bis schwach sauren pH-Werten. Die Schwerpunkte der Pflanzen bezüglich des organischen Anteiles werden durch diese selbst gelegt. Die mofettophilen Arten produzieren nicht so viel organischen Abfall wie die mofettophoben, wodurch sie dementsprechend vermehrt an solchen Stellen aufgenommen werden, in denen geringe Gehalte organischer Festsubstanz gemessen wurden und umgekehrt. Als Folge des indifferenten Verhaltens mancher mofettovager Pflanzen gegenüber verschiedenen Bodenvariablen, befinden sich ihre Artwerte hauptsächlich in der Nähe des Koordinatenursprunges.

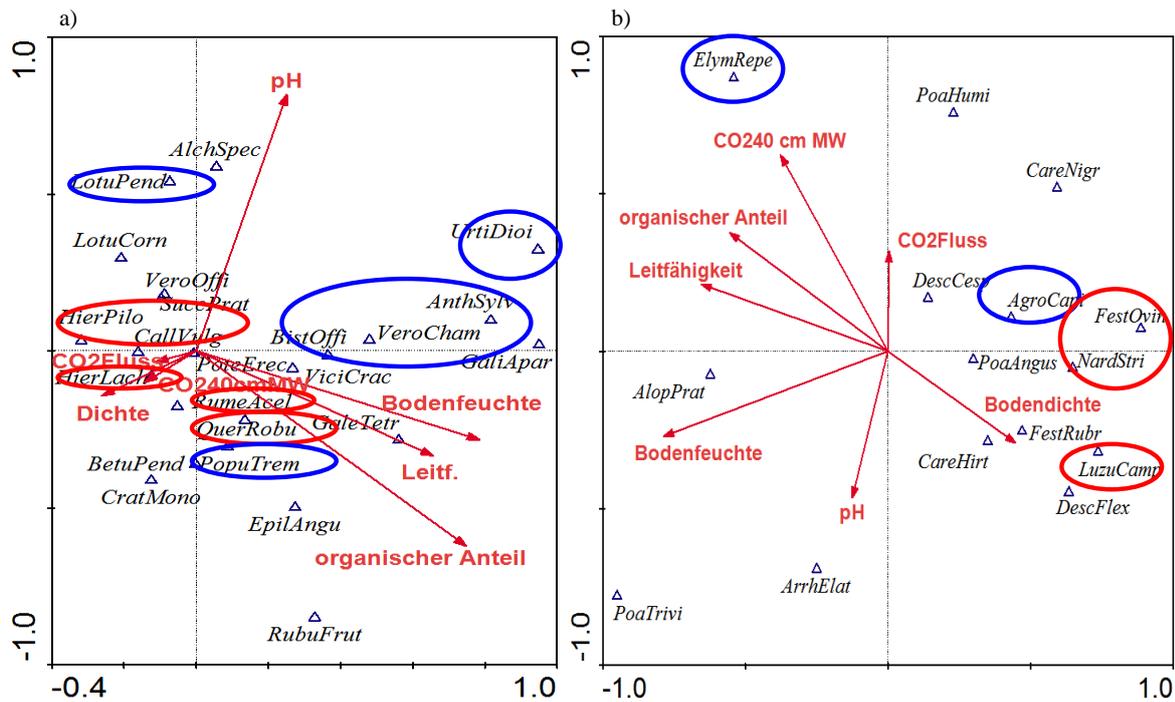


Abb. 117: CCA-Diagramm des Moosmofettendatensatzes mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,558) und monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,588) und Umweltvariablen (Vektorpfeile). Die mofettophilen Arten sind rot umrandet, und die mofettophoben Arten blau. (Datenerhebung 2009)

In der Abb. 117b ergibt sich ein ganz anderes Bild. Im Bezug auf die Grasarten hat das CO₂ einen Einfluss auf die Artenzusammensetzung, dafür jedoch nicht die Bodenazidität. Die Positionen der Artwerte in der Abb. 117b verdeutlichen die verkehrten Verteilungsmuster der Arten in der Moosmofette. Die mofettophilen Grasarten *Nardus stricta*, *Festuca ovina* und *Luzula campestris* befinden sich nach der Analyse in einer Abhängigkeit zu geringen CO₂-Konzentrationen, vergleichbar mit *Agrostis capillaris*. Weiterhin wird deutlich, dass das Ausbreitungsverhalten aller drei Arten von der niedrigen Bodenfeuchte bedingt wird. Genauso das Verteilungsverhalten verschiedener mofettovager Pflanzen, wie zum Beispiel *Deschampsia cespitosa* und *Carex nigra*.

Beide CCA-Diagramme zeigen, dass die Vegetation in der Moosmofette, neben den erhobenen Bodenparametern, anderen Einflüssen unterlegen ist. Entweder sind diese Einflussfaktoren bislang nicht gemessen worden, oder sie haben sich verändert. Die Interpretationen unterscheiden sich nicht allein von denen aus der Birnenmofette. Sie stimmen zusätzlich nicht mit Vegetations-Ergebnissen aus anderen Mofettenstandorten überein, die im Zuge der Diskussionen (Kap. 3.1.3) mehrfach Erwähnung fanden. Die Hypothese über die Existenz eines vergangenen Mofettenkernbereiches der heute noch von den Indikatorgruppen angezeigt wird, kann mithilfe der kanonischen Korrespondenzanalyse weiter bekräftigt

werden. Die Annahme wird durch das Ausbreitungsverhalten der mofettophoben (*Agrostis capillaris*) und mofettovagen (*Deschampsia cespitosa*) Pflanzenarten unterstützt. Beiden wachsen auf gasenden Bereichen, was durch die Korrespondenzanalyse bestätigt wird. Obwohl die Artwerte der monokotylen und dikotylen Indikatorarten in den Diagrammen in unterschiedlichen Richtungen eingeordnet sind, führen sie zu den gleichen Interpretationen. Die positiven dikotylen Zeigerarten ordnen sich nicht dem CO₂-Gradienten zu, da der Einfluss des Kohlendioxids auf die dikotyle Artenzusammensetzung sehr gering ist. Das ist insofern verständlich, als dass fast alle Indikatorarten in der südlichen Hälfte der Moosmofette wachsen, in dem sich zum größten Teil der nicht-gasende Bereich befindet. Diese Tatsache kommt auch bei den monokotylen Zeigerarten zum Ausdruck. Die mofettphilen Grasarten *Nardus stricta* und *Festuca ovina* wurden auf nicht-gasenden Bereichen gefunden, was durch die CCA bestätigt wird. Die Positionen ihrer Artwerte befinden sich mehr auf der gegenüberliegenden Seite des CO₂-Pfeiles, als die von *Deschampsia cespitosa* und *Agrostis capillaris*.

Fazit

Die Resultate der kanonischen Korrespondenzanalyse deuten ebenfalls auf einen verlagerten Ausgasungsbereich, von Süden nach Norden. Dieser wird weiterhin prägnant durch das Wachstum der positiven Mofettzeiger angezeigt. Sie ordnen sich geringen CO₂-Konzentrationen zu, da sie in dem heutigen Kontrollbereich wachsen, statt in dem Ausgasungsschwerpunkt. In sporadischen Abständen tritt diese Exhalation in Erscheinung, wodurch die Ergebnisse weiter bekräftigt werden.

3.2.5. Jährliche Veränderungen im Pflanzenbestand der Moosmofette

Unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse werden die Stabilität der Zusammensetzung und die der Stärke der Pflanzendecke in der Moosmofette untersucht. Aufgrund der mehrfach formulierten Hypothese über die zeitliche Verlagerung des Exhalationsbereiches, sind die jährlichen Aufnahmen des Pflanzenbestandes von vordergründigem Interesse.

Es ist offensichtlich, dass der Bereich in dem die mofettphilen Arten die Pflanzendecke dominieren, über die Jahre sehr stabil ist (Abb. 118). Einzig die Deckungsgrade sind Schwankungen unterlegen, sie nehmen im Laufe der Zeit ab. Zusätzlich kann eine Ausweitung in südlicher Richtung (Kap. 2.2) vermerkt werden, und zwar in den Jahren 2010 und 2011, sowie vereinzelt in den Jahren 2010, 2011, 2013 und 2014, in nördlicher Richtung.

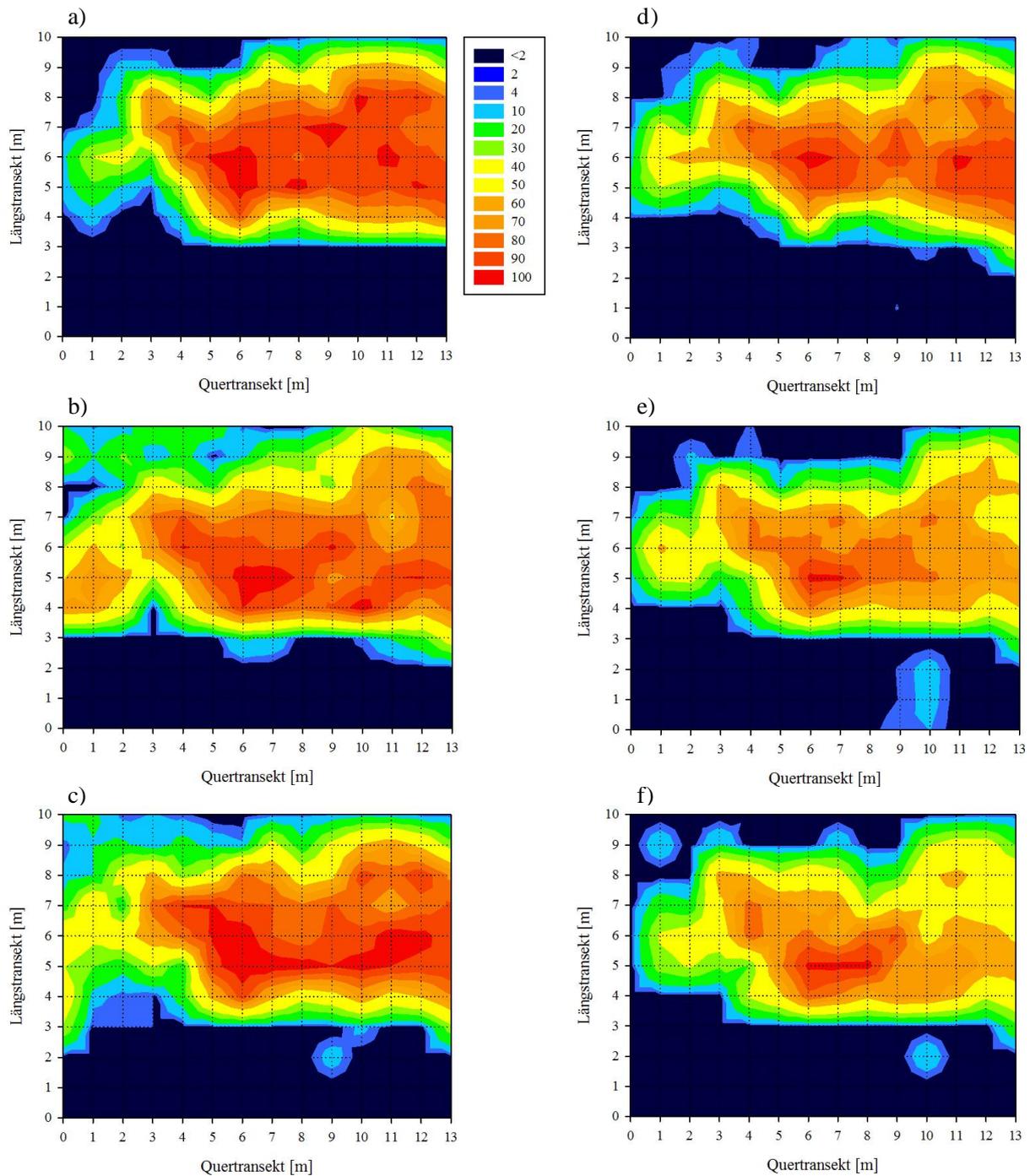


Abb. 118: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der positiven MofettENZEIGER von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

Im Vergleich mit den positiven Zeigern verändern sich die Deckungsgrade der negativen MofettENZEIGER wesentlich stärker (Abb. 119). Von 2009 bis 2011 ist eine teils extreme Abnahme der Beteiligung der mofettophoben Pflanzen an der Pflanzendecke in den mittleren Transekten festzustellen. Ab dem Aufnahmejahr 2012 ist dann wieder ein Zuwachs in den mittigen Aufnahmequadraten zu verzeichnen.

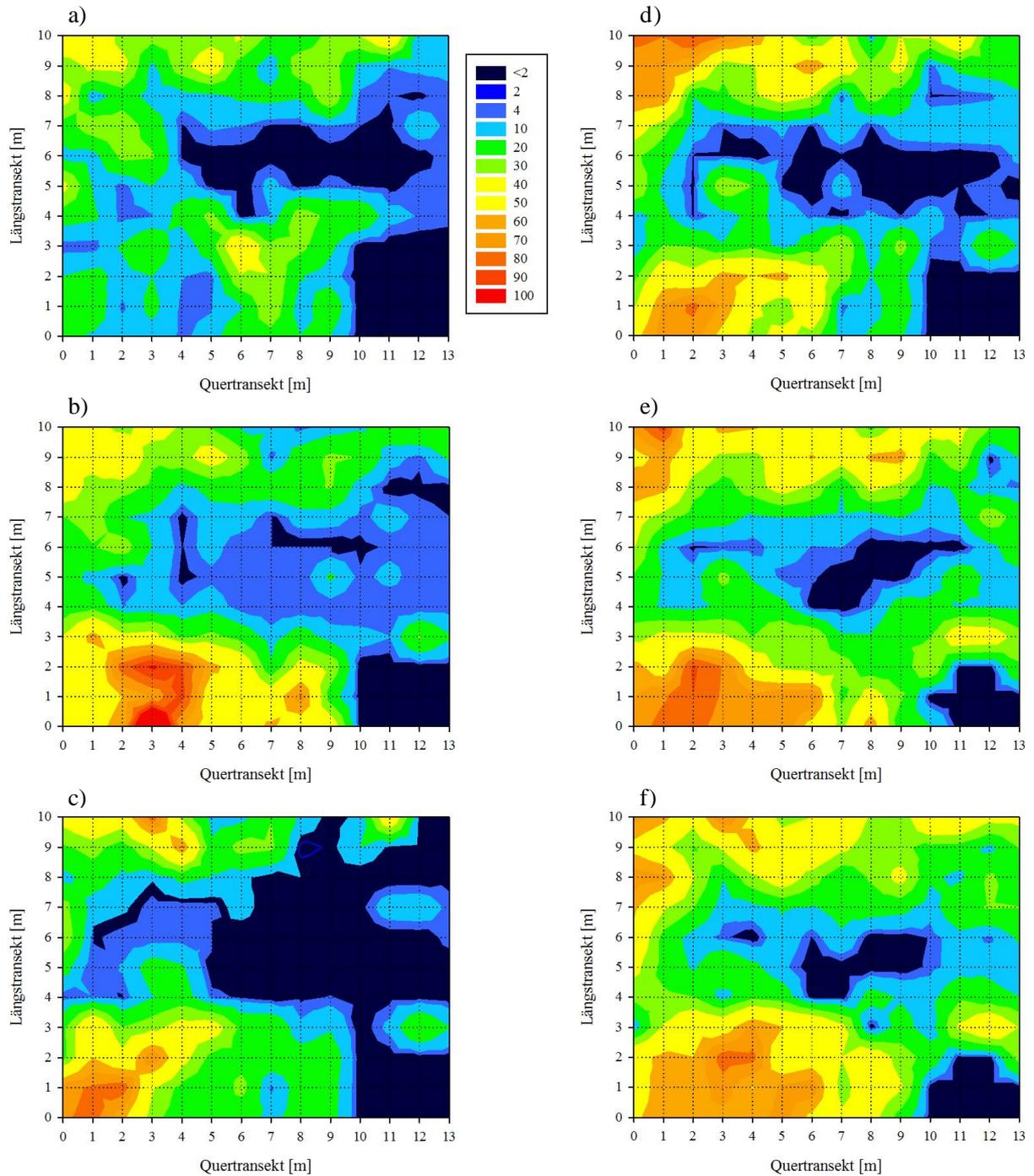


Abb. 119: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der negativen Mofettenzeiger von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

In Abb.120 sind die jährlichen Veränderungen in den Deckungsgraden der mofettovagen Pflanzenarten zu sehen. Vergleichbar mit den negativen Zeigerarten variiert auch das Wachstum dieser Arten sehr stark. Die Aufnahmen von 2010 und 2013 sind sehr ähnlich, sowie die Aufnahmen von 2011 und 2012. Hingegen wiederholen sich die Verteilungsvariationen aus den Jahren 2009 und 2014 nicht.

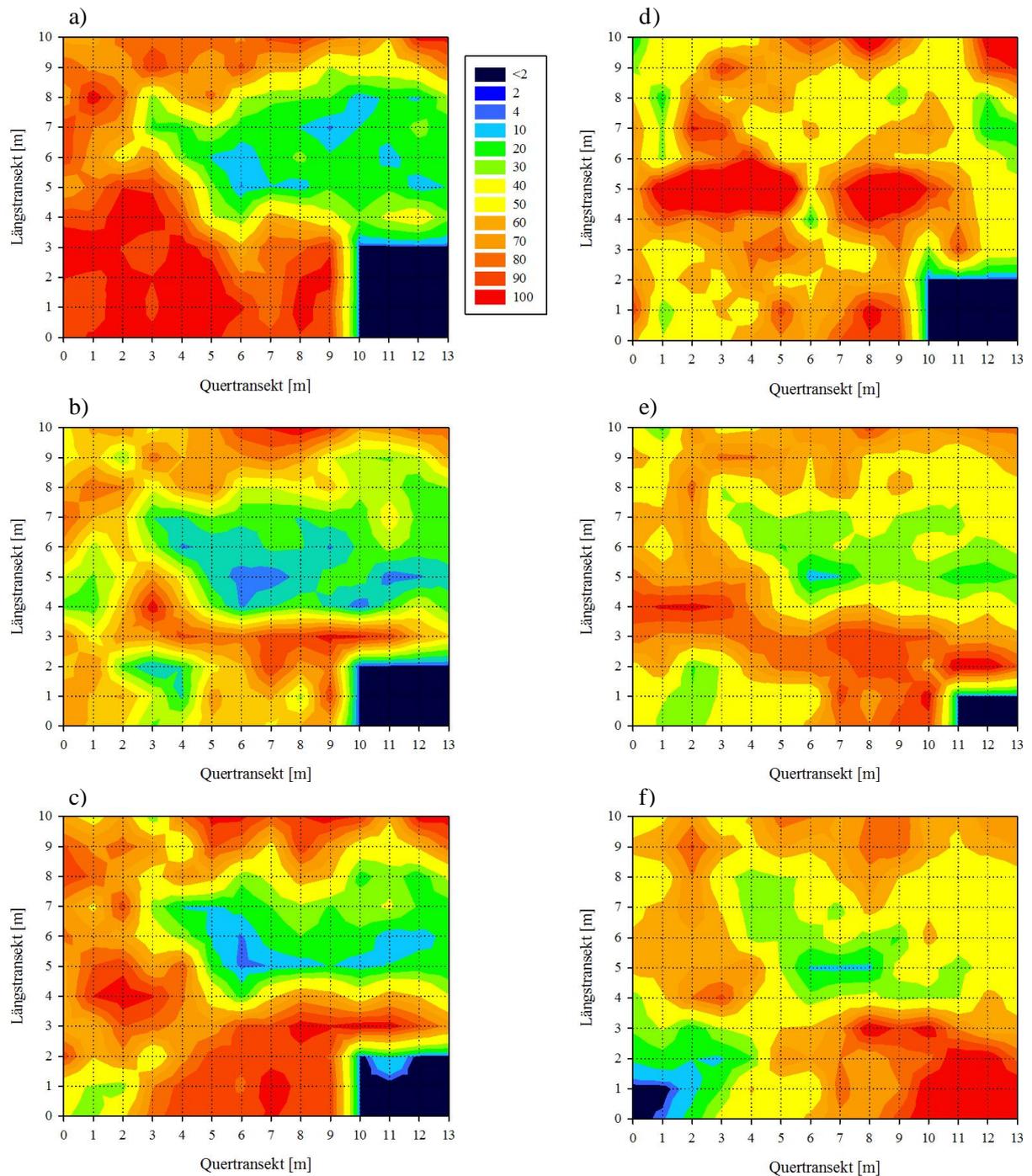


Abb. 120: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der mofettovagen Arten von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2009 bis 2014)

In Kap. 3.1.3.2 wurde festgehalten, dass die Schwankungen einer Pflanzengruppe immer einen Vor- oder Nachteil für eine andere Gruppe nach sich ziehen. Dieses Ergebnis wird mit den Abb. 118-120 bestätigt. Die starke Abnahme der Deckungsgrade innerhalb der negativen Indikatorgruppe im Jahr 2010 begünstigt die Ausbreitung der mofettovagen Arten, während

die Zunahme der positiven Mofettenzeiger im Jahr 2011 zu einer Abnahme der mofettovagen Pflanzendecke führt. Ebenso die Zunahme der mofettophoben Pflanzendecke im Jahr 2012.

Die statistischen Auswertungen führen zu stark variierenden schwachen bis gar keinen Korrelationen für alle Pflanzengruppen vor dem Hintergrund des Kohlendioxidaufkommens. Dessen ungeachtet ist an den Abbildungen ersichtlich, dass die negativen Zeiger und die mofettovagen Arten schneller und massiver auf Veränderungen und Störungen reagieren, als die positiven Zeiger (Kap. 3.1.5).

Unter Zuhilfenahme der jährlichen Gasmessungen und der CO₂-Jahreszyklen in Kap. 3.2.2 können einige Veränderungen des Pflanzenbestandes auf Veränderungen in den CO₂-Konzentrationen zurückgeführt werden, denn die Wetterbedingungen waren innerhalb der Aufnahmezeiträume konstant (Kap. 3.3.2). Die Entwicklung der Pflanzendecke vor dem Hintergrund der CO₂-Konzentrationen über die Jahre, zeigt eine vermehrte Ausbreitung der negativen Mofettenzeiger sowie der mofettovagen Pflanzen, aufgrund abnehmender Kohlendioxidgehalte in den oberen Bodenschichten. Infolgedessen werden die positiven Zeigerarten zurückgedrängt. Mit zunehmenden Kohlendioxidkonzentrationen tritt die entgegengesetzte Situation ein.

Von März 2009 nach März 2010 wurde ein massiver Rückgang der CO₂-Konzentrationen verzeichnet, der zu einem gesteigerten Wachstum der mofettophoben und mofettovagen Pflanzen geführt hat.

Die Gasmessung von 2011 ergab eine Steigerung der Konzentrationen aber auch eine Flächenzunahme der Ausgasungen in den südlicheren Transekten. Die Erweiterung des Exhalationsbereiches verursachte eine starke Abnahme der mofettophoben sowie mofettovagen Pflanzendecke.

Im März 2012 konnte ebenfalls eine Zunahme der CO₂-Gehalte verzeichnet werden. Die mofettophile Pflanzendecke bleibt im Vergleich zum Vorjahr stabil. Dennoch ist gleichzeitig eine verstärkte Ausbreitung der mofettophoben Arten zu beobachten, denn die Zunahme der Konzentrationen beschränkt sich in allen Messtiefen auf die untere Fläche der Mofette. Die Veränderungen des mofettophoben Pflanzenbestandes erfolgen in der oberen Hälfte. Infolgedessen wird das Wachstum der mofettovagen Arten beeinträchtigt.

Diese Situation wiederholt sich in den Aufnahmejahren 2013 und 2014, sowohl hinsichtlich des Kohlendioxids, als auch der Variationen in der Pflanzendecke. Weiterhin ist eine Zunahme der negativen Mofettenzeiger festzustellen. Dafür sinken die Deckungsgrade der positiven Zeigerarten. Im Jahr 2013 nehmen die Deckungsgrade der mofettovagen Arten stark zu, während die mofettovage Pflanzendecke im Jahr 2014 rückläufig ist.

Anhand der Jahreszyklen kann wiederholt gezeigt werden, dass der Pflanzenbestand der Moosmofette andere Kohlendioxidverhältnisse andeutet, als gemessen werden. Besonders aussagekräftig ist der Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013. Im Verlauf dieses Messzeitraumes werden Verschiebungen des Ausgasungsbereiches festgestellt und zwar in Aufnahmequadrate, in denen die mofettophilen Arten dominieren. Diese CO₂-Ausgasungen die zum Beispiel im Juni 2012 oder auch im September 2014 in Erscheinung treten, könnten in ähnlicher Form dauerhaft existiert haben. Die Artenzusammensetzung erfolgte dann nach diesen ursprünglichen Bedingungen und nicht nach den aktuellen. Der Ausgasungsbereich der bei den derzeitigen Gasmessungen konstant zu verzeichnen ist, war sicher noch nicht vorhanden. Wie in Kap. 3.1.2.1 erörtert, kommt es nach seismischen Einflüssen zu Öffnungen und Verschlüssen von Diffusionswegen. Folglich ist zu verschiedenen Zeitpunkten der heutige Exhalationsbereich zu verzeichnen, während zu anderen Zeiten eine messbare Verschiebung in die südlichen Transekte (Kap. 2.2) stattfindet. Die positiven Mofettenzeiger sind zum heutigen Zeitpunkt noch überwiegend auf dem sporadisch auftretenden vergangenen Ausgasungsbereich zu finden und die negativen auf Teilflächen des früheren Kontrollbereiches. Bei der Auswertung der Birnenmofetten-Vegetation konnte dokumentiert werden, dass die mofettophilen Pflanzen langsamer auf Veränderungen der Bodeneigenschaften reagieren als die mofettophoben (Kap. 3.1.5). Diese Feststellung wird durch die Vegetationsaufnahmen in der Moosmofette bestätigt, denn die Veränderungen der mofettophilen Pflanzendecke sind zu keiner Zeit vergleichbar stark, wie die der mofettophoben. Vor diesem Hintergrund wurden statistische Analysen durchgeführt, in denen die Abhängigkeit des Pflanzenbestandes von den Kohlendioxidkonzentrationen nicht auf den Märzmessungen von 2009 basierten, sondern auf den Gasmessungen, in denen die CO₂-Verlagerung festzustellen war (Tab. 36).

Tab. 36: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der zwei Zeigergruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in allen Messtiefen in der Moosmofette. (Datenerhebung Juni 2012)

	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm
positive Mofettenzeiger	0,41	0,40	0,57	0,68
negative Mofettenzeiger	-0,33	-0,36	-0,38	-0,48

Die Resultate zeigen, dass die Verteilung der Zeigergruppen erklärbar wird, wenn innerhalb der CO₂-Konzentrationen eine Verschiebung stattfindet. Auch aus der Entwicklung des Korrelationskoeffizienten ist diese Annahme, aufgrund der Steigerung ab 40 cm Messtiefe

abzuleiten. Der sporadisch auftretende Ausgasungsbereich ist erst ab 40 cm Bodentiefe deutlich auszumachen (Abb. 104-109).

Unter konstanten Bedingungen, beziehungsweise mit einem konstanten Ausgasungsbereich könnte im Pflanzenbestand der Moosmofette eine Sukzession erfolgen, die vermutlich derart von statten ginge, dass die positiven Mofettenzeiger die nördlichen Aufnahmequadrate überziehen, und die negativen die südlichen. Angedeutet wird dies durch das isolierte Auftreten mofettophiler Arten in vereinzelt Aufnahmequadraten der Transekte 0 bis 3. Es ist jedoch anzunehmen, dass es aufgrund von Schwarmbebenaktivitäten zu wiederkehrenden Veränderungen und Verschiebungen des Exhalationsbereiches kommt. Dadurch werden auch in der Moos,- wie in der Birnenmofette hauptsächlich Fluktuationen des Pflanzenbestandes festzustellen sein.

Fazit

Die jährlichen Schwankungen des Pflanzenbestandes in der Moosmofette weisen zwar Parallelen zu den Ergebnissen in der Birnenmofette auf (Kap. 3.1.5), es sind jedoch auch Abweichungen festzustellen. Es konnte gezeigt werden, dass die Verteilung der Indikatorgruppen nachhaltig durch Ausgasungen beeinflusst wird, die vermutlich in vergangenen Zeiten stabil waren, heute aber sporadisch auftreten. In den Jahreszyklen waren vorübergehende Ausgasungsbereiche in der südlichen Hälfte der Moosmofette festzustellen, also Verschiebungen der Mofettenkernzone. Die positiven Mofettenzeiger breiten sich zum heutigen Zeitpunkt überwiegend in den südlichen Transekten der Fläche aus. Die negativen Indikatorarten wachsen in den nördlichen Transekten, die teilweise zum Kontrollbereich gehören wenn sich die CO₂-Kernzone verlagert. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die mofettophilen Zeigerarten einen ursprünglichen Exhalationsbereich anzeigen, und die mofettophilen Arten einen vergangenen Kontrollbereich. Durch statistische Auswertungen konnte die Annahme bekräftigt werden.

3.3 Untersuchungen in einem Espenwäldchen

Die ersten Messungen in dem *Populus tremula*-Bestand fanden im September 2010 statt. Während dieses Messaufenthaltes wurden 128 Bäume im CO₂-Gradienten nummeriert. Außerdem wurden zu diesem Zeitpunkt zehn Bäume gefällt an denen die dendrochronologischen Messungen durchgeführt wurden. Im Jahr 2011 wurde ein Messraster

über die Fläche des Bestandes gelegt. Zusätzlich fand eine Positionierung der 128 gekennzeichneten Bäume in dem Raster statt (Abb. 121).

Die flächigen Untersuchungen wurden im Jahr 2011 durchgeführt: Die Bodengasmessungen im August und die PAR-Messungen im September. Zum Einen führte die Größe der Fläche, zum Anderen das Interesse an den speziellen Holzuntersuchungen zu der Entscheidung die Kohlendioxidmessungen einmalig durchzuführen.

An den verbliebenen 118 nummerierten Bäumen (zehn Bäume wurden im September 2010 gefällt) wiederholten sich die Gasmessungen. Hingegen wurden die Messungen des Stammdurchmessers auf Brusthöhe (DBH), die dendrochronologischen, anatomisch-morphologischen, physikalischen und bodenkundlichen Untersuchungen einmalig durchgeführt, und zwar in einem Zeitraum von September 2010 bis März 2012.

Bevor die Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen an den Espen vorgestellt werden, werden zunächst die Resultate der Messungen abiotischer Faktoren dargestellt.

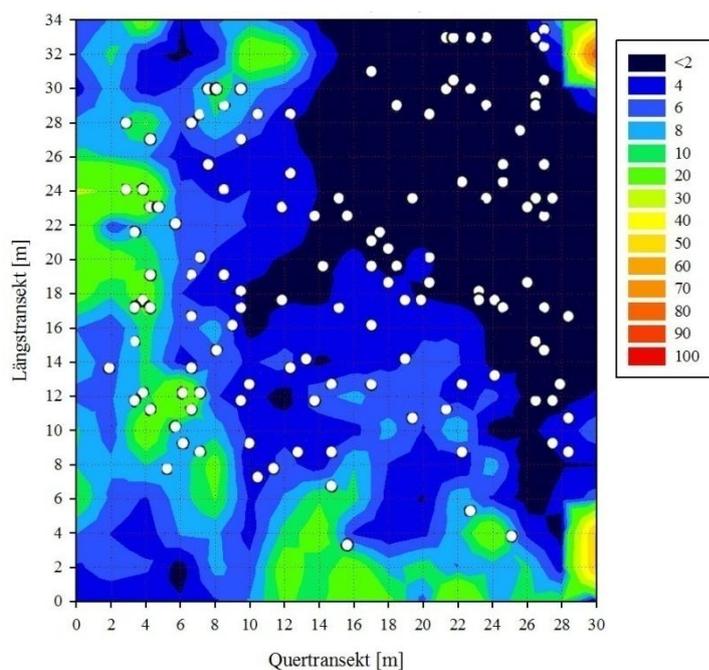


Abb. 121: Position der nummerierten Bäume innerhalb des Espen-Bestandes in Verbindung mit den gasenden und nicht-gasenden Bereichen der Fläche (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe). Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2011)

3.3.1 Abiotische Beschreibung der Fläche

3.3.1.1 Bodengasmessungen

Die Kohlendioxidkonzentrationen sind vor allem in den oberen Bodenschichten, deutlich geringer als in der Birnen- oder Moosmofette (Abb. 122). In 10 und 20 cm Bodentiefe werden überwiegend Werte von 4 bis 8% gemessen. Die gasenden Bereiche ziehen sich bogenförmig

von Süden über Südosten, Osten, Norden bis nach Nordwesten (Kap. 2.2). Hinzukommen isolierte punktuelle Ausgasungsstellen.

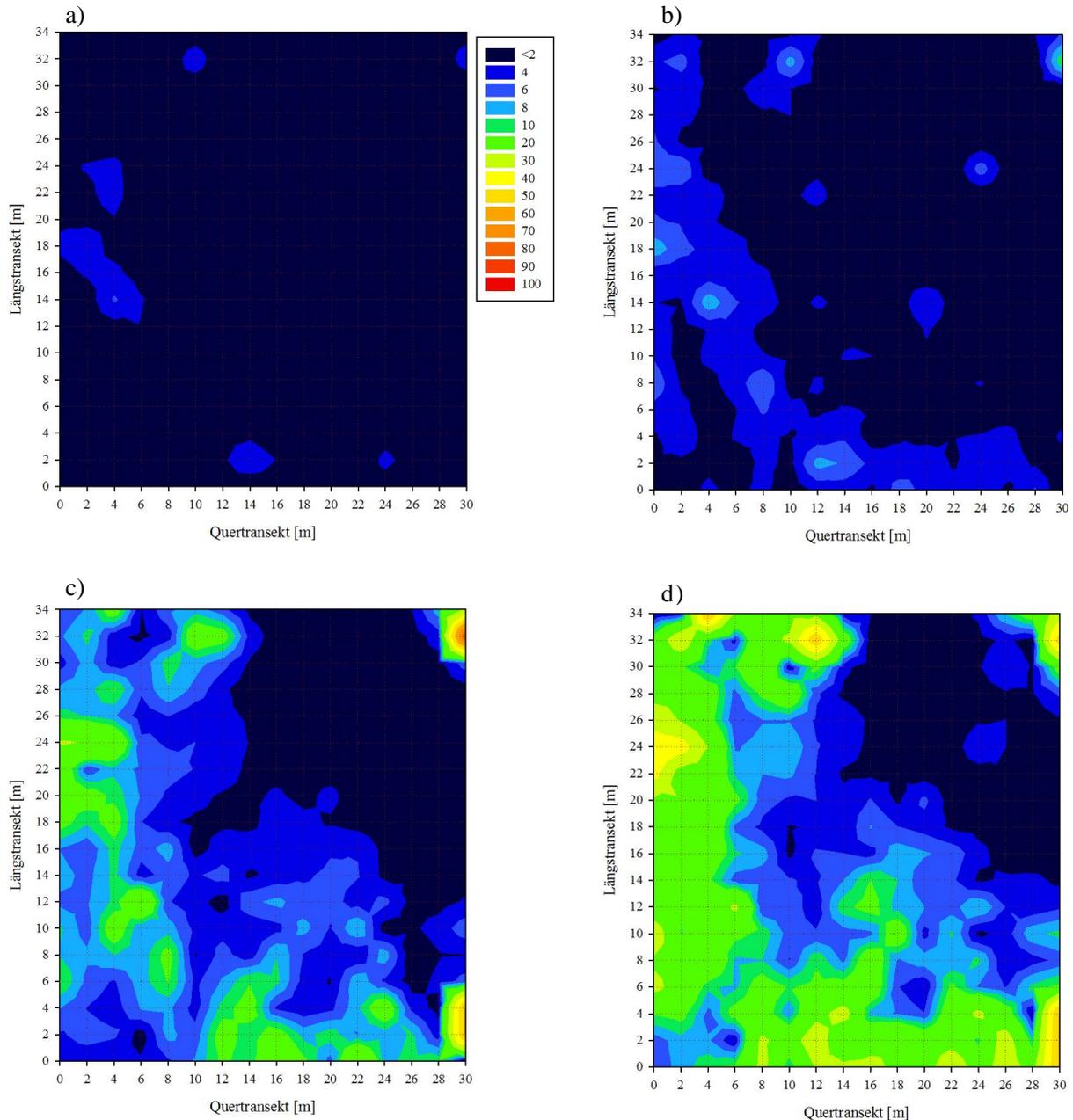


Abb. 122: Kohlendioxidkonzentrationen [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) des *Populus tremula*-Bestandes. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung August 2011)

Erst ab einer Bodentiefe von 40 cm werden höhere CO₂-Gehalte erreicht. An vielen Messstellen liegen die Werte in einem Messbereich von 10 bis 30%. Im Südwesten befindet sich eine partielle Ausgasung mit 70%. Die isolierten Ausgasungen sind nun in den flächig gasenden Bereich eingebunden, der inzwischen zwei Drittel der Gesamtfläche einnimmt.

In der Messtiefe von 60 cm befinden sich die CO₂-Konzentrationen bei 8 bis 20%; punktuell werden jedoch auch 30 bis 50% gemessen.

Im Vergleich mit den Exhalationen in der Birnen- und Moosmofette sind die Konzentrationen in dieser Waldfläche deutlich niedriger. Dennoch gibt es Parallelen in der Gasverteilung, 1) die starke Heterogenität der Ausgasungen, und 2) die steigenden Konzentrationen mit zunehmender Bodentiefe.

Das Espenwäldchen ist in unmittelbarer Nähe der Birnen- und Moosmofette positioniert (Kap. 2.2). In beiden Mofetten wurde ein gleyartiger Reduktosol festgestellt. Mit den Merkmalen dieses Bodentyps ließen sich die abrupten Konzentrationsschwankungen auf kleinem Raum erklären (Kap. 1.2.2). Diese Bedingungen der Pedosphäre gelten demnach auch für den Boden der untersuchten Espen-Gruppe.

Fazit

Die Bodengasuntersuchungen haben gezeigt, dass die Kohlendioxidkonzentrationen unterhalb des Espen-Bestandes nicht die Höhe erreichen wie es beispielsweise in der Birnen- oder Moosmofette der Fall ist. Dennoch steigen die Werte mit zunehmender Bodentiefe. Legt man die 2%-Grenzlinie für CO₂-Konzentrationen in 10 cm Bodentiefe zugrunde, ist diese Fläche als eine niedrig-gasende Mofette einzustufen.

3.3.1.2 pH-Werte, Bodenwasser und organische Mengenanteile an der Festphase

Die Probennahme der Bodenproben wurde nicht flächig durchgeführt, sondern an den 128 nummerierten Einzelbäumen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, die drei Parameter durch Abbildungen darzustellen. Es kann lediglich eine Beschreibung der Fläche mithilfe der bodenkundlichen Untersuchungen an den einzelnen Bäumen erfolgen.

Die pH-Werte der Bodenproben aus 7 bis 13 cm Bodentiefe liegen größtenteils im sehr stark sauren bis stark sauren Bereich. Diese Proben stammen hauptsächlich von Bäumen in zentral liegenden Aufnahmequadraten. In den Bodenproben die vornehmlich aus den Randbereichen des Bestandes entnommen wurden sind die pH-Werte mäßig sauer.

Die gemessenen pH-Werte sind in dem Wertebereich der für europäische Waldböden bestimmt wurde einzuordnen (Scheffer und Schachtschabel 2010; Ellenberg und Leuschner 2010). Die pH-Werte organischer Auflagehorizonte von Waldböden sind extrem stark sauer und die Mineralbodenhorizonte sehr stark sauer (Scheffer und Schachtschabel 2010). Hinzu kommt, dass der Espen-Bestand, genauso wie die Birnen- und Moosmofette, in der Hangzone

des Untersuchungsgebietes liegt. Demnach ist anzunehmen, dass die Bodenazidität eine Folge der gleichen Ursachen ist (Kap. 3.1.1.6).

Der Wertebereich der gemessenen Bodenwassergehalte ist sehr schmal (20 bis 40%). In ungefähr 50% der gesammelten Bodenproben liegt die Bodenfeuchte zwischen 20 und 30%, in den anderen 50% zwischen 30 und 40%. An wenigen Entnahmestellen beträgt das Bodenwasser weniger als 20%.

Im Gegensatz zu der Birnen- oder Moosmofette ist der Boden des Espenwäldchens nicht feuchter, es fehlen allerdings die Extreme. Die Bodenwassergehalte sind konstant feucht. Diese Beobachtung kann auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden.

Innerhalb des geschlossenen Bestandes ist die Evaporation aus dem Boden nicht so hoch wie in den beiden Mofetten die in einer Freifläche positioniert sind. In Abb. 123 wird gezeigt, dass die Strahlungsattenuation in der Baumgruppe hoch ist. Demnach dringt nicht genügend Strahlung bis zum Waldboden vor (Scheffer und Schachtschabel 2010). Zusätzlich ist die Luftfeuchtigkeit in einem geschlossenen Bestand höher als auf einer Freifläche (Pott und Hüppe 2007). Aufgrund dessen ist die Evapotranspiration in einem Wald niedriger (Lyr et al. 1992), da sich die Wasserdampfdrücke im Boden und der bodennahen Luftschicht nicht stark unterscheiden. Eine weitere Ursache für die erhöhte Luftfeuchtigkeit und den geringen Unterschied im Wasserdampfdruck ist die fehlende oder geringe Luftbewegung in Wäldern (Larcher 2001).

Die bodenkundlichen Untersuchungen ergaben, dass die Mengenanteile organischer Festsubstanz überwiegend zwischen 15 und 25% liegen. Nur an wenigen Bäumen wurden Abweichungen festgestellt.

Mit diesem konstanten Ergebnis unterscheidet sich der Boden des Espen-Bestandes wiederholt von der Birnen- oder Moosmofette. In diesen beiden untersuchten Standorten sind die Gehalte organischer Substanz an der Festphase des Bodens niedriger und die Variabilität ist höher.

Unter Berücksichtigung der vertikalen Struktur eines Waldbestandes, ist es zwangsläufig gegeben, dass in einem Wald größere Mengen pflanzlichen Abfalls anfallen, als in einer Freifläche (Otto 1994).

Fazit

Grundsätzlich wirkt die geschlossene Pflanzendecke als Abschattung des Waldbodens, sowohl auf die abiotischen Faktoren in der bodennahen Luftschicht ein, als auch auf

verschiedene Bodeneigenschaften, indem sie extreme Bedingungen abschwächt (Otto 1994). Diese Wirkungsweise konnte bei allen drei beschriebenen Parametern festgestellt werden.

3.3.1.3 PAR-Messungen

Die Stärke der Strahlungsattenuation wird mithilfe der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) innerhalb der Baumgruppe bei wolkenfreiem Himmel in Abb. 123 gezeigt.

Die Resultate weisen darauf hin, dass im überwiegenden Teil der Waldfläche schattige Lichtverhältnisse herrschen. Auf dem Boden sind die Werte niedriger als in 100 cm Höhe. Die hohen Strahlungsintensitäten im Südosten und Süden der Fläche (Kap. 2.2) kommen durch Lücken im Kronendach zustande. An diesen Stellen sind mehrere Espen durch Sturmböen umgestürzt. Die höheren Werte im mittleren Bereich der Fläche sind auf Lichtflecken zurückzuführen. An diesen Messpunkten befinden sich Lücken im Kronendach der Baumschicht durch die Sonnenlicht einfällt. Diese Lichtflecken sind beweglich, da sie mit dem Sonnenstand, oder mit der Windbewegung wandern (Roloff 2010). Diese Werte sind folglich reine Momentaufnahmen. Im Nordosten und Nordwesten des Bestandes besteht die Baumgruppe aus vereinzelt Individuen, wodurch an diesen Stellen die PAR-Werte höher sind.

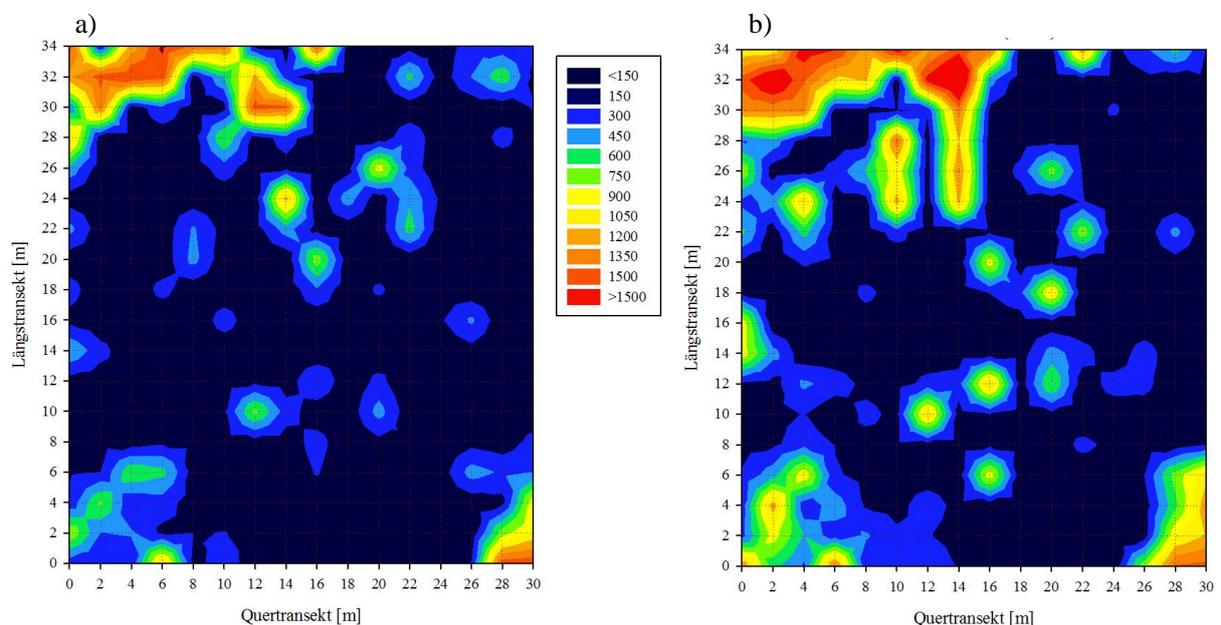


Abb. 123: Strahlungsintensität (PAR) [$\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{m}^{-2}$] auf dem Boden (a) und in 100 cm Höhe (b) im *Populus tremula*-Bestand. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung August 2011)

Die ermittelten Werte der Strahlungsintensität innerhalb des Bestandes sind beispielhaft für einen geschlossenen Pflanzenbestand. Die auftreffende Strahlung auf das Kronendach wird zu

ungefähr 50% zunächst von den obersten Blattschichten der Baumschicht absorbiert, ein geringer Teil (10 bis 15%) wird reflektiert (Larcher 2001; Ellenberg und Leuschner 2010). Je nach der Belaubungsdichte und der Blattverteilung in dem Pflanzenbestand, gelangt nur ein geringer Teil der eintreffenden Strahlung auf den Waldboden und damit in die unteren Schichten des Bestandes (Strauch- und Krautschicht). Die Werte für die Transmission in Pappelwäldern liegen bei 5 bis 20% (Ellenberg und Leuschner 2010). Die höheren Strahlungsintensitäten in verschiedenen Bereichen der Fläche sind durch Bestandeslücken zu erklären. Durch diese Lücken gelangt die Strahlung ungehindert auf den Waldboden. Die nordöstlichen und nordwestlichen Messpunkte an denen hohe PAR-Werte gemessen wurden, liegen hingegen im Bestandesrand, wo die Strahlung ebenfalls ungehindert auf den Boden trifft (Larcher 2001).

Fazit

Insgesamt sind die Strahlungsintensitäten innerhalb des Espen-Bestandes sehr niedrig, was für ein konstant geschlossenes Kronendach spricht. Hohe Strahlungsintensitäten auf dem Boden und in 100 cm Höhe konnten mit Bestandeslücken oder dem Bestandesrand erklärt werden.

3.3.2 Floristische Beschreibung der Kraut- und Baumschicht der Fläche

Die Flora des Espenwäldchens besteht aus 95 Gefäßpflanzen und zwei Moosen.

3.3.2.1 Artenvielfalt und Gesamtdeckungsgrad

In Abb. 124a sind die Artenzahlen der Aufnahmequadrate abgebildet. Im überwiegenden Teil der Fläche werden pro Aufnahmequadrat zehn Arten gezählt. Mit diesen Werten ist der Artenreichtum der Krautschicht pro Aufnahmequadrat vergleichbar mit dem der Birnen- oder Moosmofette. Mit insgesamt 97 gefundenen Arten ist die Krautschicht nach einem Richtwert von 100 Arten für mitteleuropäische Wälder trotz der Bodenazidität artenreich (Ellenberg und Leuschner 2010).

Der Gesamtdeckungsgrad in den einzelnen Aufnahmequadraten liegt im Schnitt bei 50%. Allerdings wurden im Südosten bis Nordosten (Kap. 2.2) auch Werte von 70 bis 90% aufgenommen, und teilweise auch 20 bis 40% (Abb. 124b).

Im Vergleich mit den Gesamtdeckungsgraden in der Birnen- oder Moosmofette ist die Pflanzendecke in dem Espen-Bestand wesentlich niedriger.

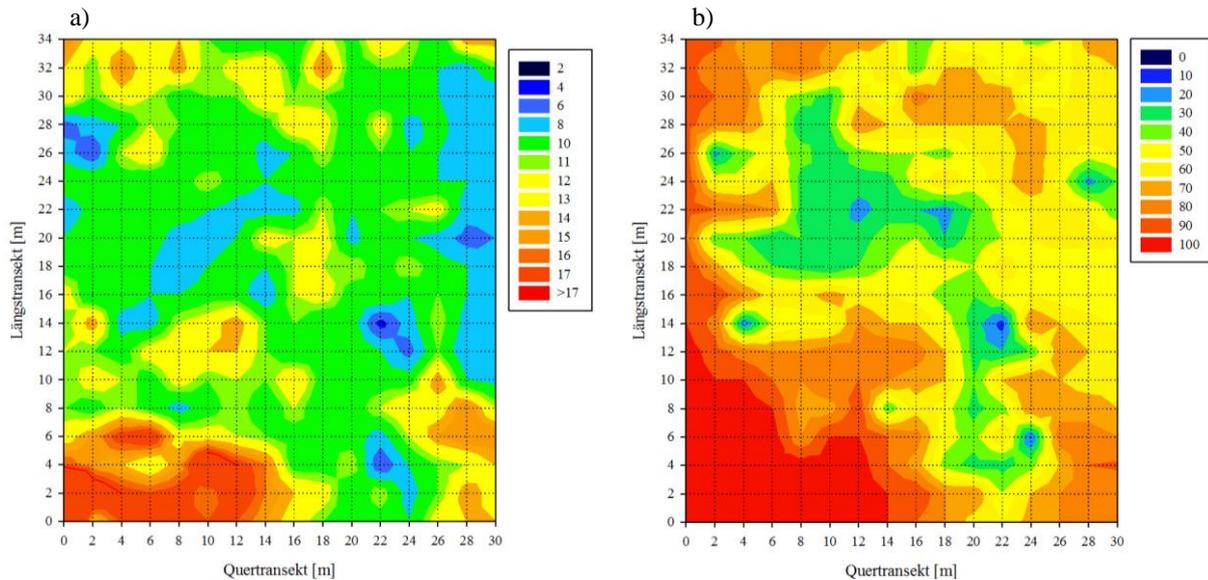


Abb. 124: Artenzahlen (a) und Gesamtdeckungsgrad der Krautschicht (b) pro Aufnahmequadrat in dem *Populus tremula*-Bestand. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juli 2011)

Durch eine Gegenüberstellung der Abb. 123 und 124 wird rasch klar, dass die höchsten Deckungsgrade in den Bereichen hoher Strahlungsintensitäten verzeichnet wurden. Das gleiche ist bei den Artenzahlen zu vermerken.

Die Auswertung der Artenzahlen und der Gesamtdeckungsgrade vor dem Hintergrund der CO₂-Ausgasungen ergibt, dass die Gesamtdeckungsgrade in den Aufnahmequadraten hoch sind, in denen die Kohlendioxidkonzentrationen leicht erhöht sind.

Zwischen den Artenzahlen und dem Kohlendioxid besteht nach einem Vergleich der Abb. 124a mit Abb. 122 keine Wechselwirkung. In diesem Fall ist eher ein Zusammenhang mit den Lichtintensitäten zu beobachten.

Fazit

Die Artenzahlen je Aufnahmequadrat sind vergleichbar mit denen der Birnen- oder Moosmofette. Durch die Abb. 124a und Abb. 123 konnte gezeigt werden, dass die höheren Artenzahlen in den Bereichen mit hohen Strahlungsintensitäten gezählt wurden. Der Gesamtdeckungsgrad ist niedriger als in der Birnen- oder Moosmofette. In den Teilflächen mit geringem Lichtgenuss für die Pflanzen, und erhöhten CO₂-Konzentrationen, sind die höchsten Deckungsgrade beobachtet worden.

3.3.2.2 Das ökologische Verhalten der positiven und negativen Mofettenzeiger sowie der mofettovagen Arten der Krautschicht

In Abb. 125 ist die Verteilung der mofettovagen Pflanzen im Vergleich mit den CO₂-Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Pflanzendecke in dem Espen-Bestand die durch die mofettovagen Arten gebildet wird, ist zweigeteilt. In ungefähr 50% der Fläche betragen die Deckungsgrade 60 bis 100%. In der anderen Hälfte liegen die Werte in einem Bereich von 10 bis 50%.

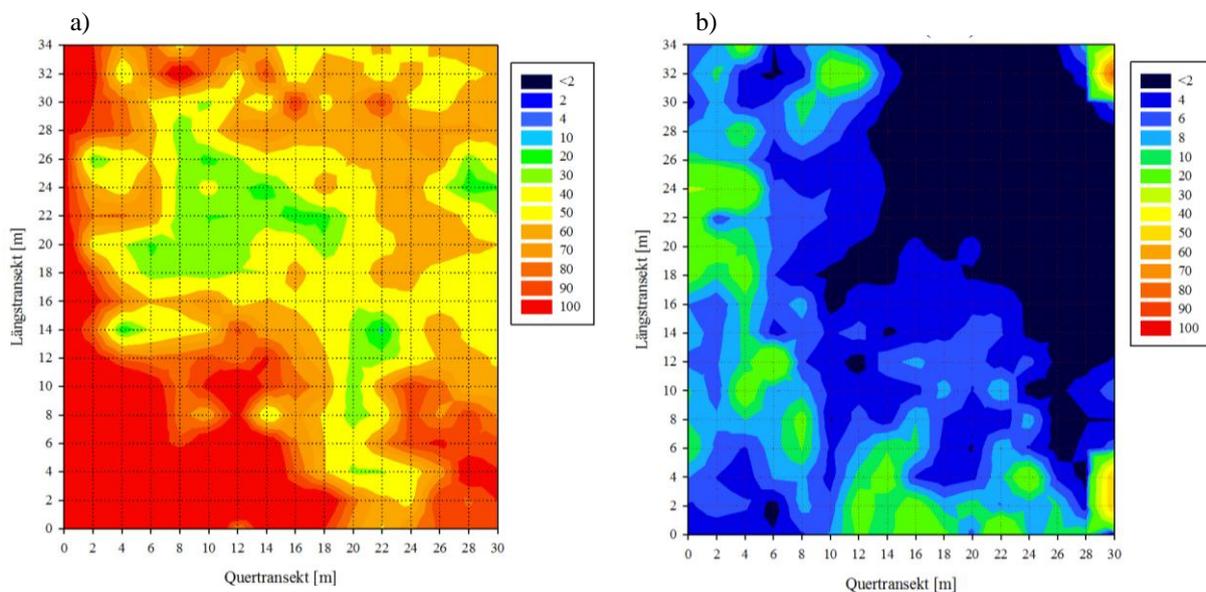


Abb. 125: Gesamtdeckungsgrad [%] der mofettovagen Pflanzenarten (a) pro Aufnahmequadrat und CO₂-Konzentration [%] in einer Tiefe von 40 cm (b) im Espen-Bestand. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juli und August 2011)

Die negativen und positiven Mofettenzeiger haben eine sehr geringe Beteiligung an der Bildung der Pflanzendecke. Der prozentuale Anteil ihrer Deckungsgrade an dem Gesamtdeckungsgrad liegt unter 2%. Das bedeutet, dass beide Abbildungen flächig dunkelblau sind und aus diesem Grund nicht gezeigt werden.

Aus einer Gegenüberstellung der Abb. 125, 122 sowie 123 sind folgende Schlüsse zu ziehen:

- ❖ Alle aufgenommenen Arten innerhalb des Bestandes sind Halbschatten- bis Lichtpflanzen. Daher sind die höheren Deckungsgrade der mofettovagen Arten in den Aufnahmequadraten mit den höheren Strahlungsintensitäten zu finden.
- ❖ Gleichzeitig liegen diese Aufnahmequadraten in den gasenden Bereichen der Fläche. Jedoch sind die Konzentrationen in den oberen Bodenschichten gering, so dass das Wachstum der Pflanzen nicht beeinträchtigt wird. Nach Mückenhausen (1993) geschieht dies erst bei 5% CO₂ im Boden. In Abb. 122 konnte festgestellt werden, dass

in 10 und 20 cm Bodentiefe CO₂-Werte von 4% selten überschritten werden. Erst ab einer Tiefe von 40 cm steigen die Kohlendioxidgehalte an.

- ❖ Folgerichtig muss davon ausgegangen werden, dass die Wurzeln der dort wachsenden Pflanzen nicht in diese Messtiefe vordringen. Dies wäre noch zu beweisen.

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die mofettovagen Arten innerhalb des *Populus tremula*-Bestandes, gegenüber den mofettophilen und mofettovagen Arten sehr konkurrenzstark sind. Obwohl die Aufnahmequadrate mit höheren Lichtintensitäten in den gasenden Bereichen der Fläche liegen, können sich die Pflanzen uneingeschränkt ausbreiten, da keine hypoxischen Bedingungen vorliegen.

3.3.2.3 Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettophiler Arten der Krautschicht

Alle mofettophilen Zeigerarten kommen in dem Espen-Bestand nur vereinzelt vor, ausgenommen das Moos *Pleurozium schreberi*. Daher wird im Folgenden einzig diese mofettophile Art vorgestellt.

Pleurozium schreberi

In dem Espen-Wäldchen ist das Rotstängelmoos im Norden, Nordwesten und Südwesten (Kap. 2.2) zu finden und zwar überwiegend in der Nähe der Bestandesränder (Abb. 126a). Die Deckungsgrade liegen überwiegend zwischen 2 bis 30%, an einer Stelle aber auch bei 50%.

Im Vergleich mit der Abb. 126b ist zu vermerken, dass sich *Pleurozium schreberi* einzig in gasenden Aufnahmequadraten ausbreitet, die zudem stark beschattet sind (Abb.123).

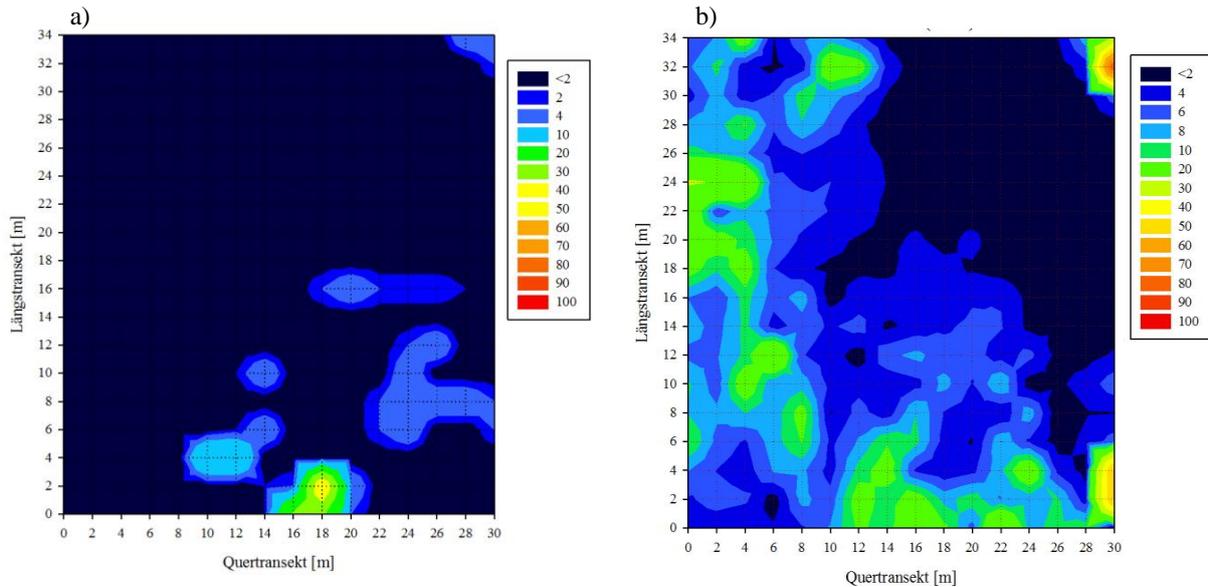


Abb. 126: Gesamtdeckungsgrad [%] von *Pleurozium schreberi* (a), im Vergleich mit den CO₂-Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im *Populus tremula*-Bestand. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juli und August 2011)

In den Aufnahmequadraten in denen *Pleurozium schreberi* aufgezeichnet wurde herrschen günstige Bedingungen für das Moos. Zunächst wächst es, wie in der Birnen- und Moosmofette in den wenigen gasenden Bereichen des Bestandes. Aufgrund der gemessenen pH-Werte ist anzunehmen, dass an diesen Stellen die Bodenversauerung ebenfalls hoch ist. *Pleurozium schreberi* ist mit einer Reaktionszahl von 2 überwiegend auf saurem Substrat zu beobachten (Ellenberg et al. 2001). Dies kann durch die Vegetationsaufnahmen in der Birnen- und Moosmofette bestätigt werden. Des Weiteren ist es ein Kühlezeiger und eine Halbschatten- bis Halblichtpflanze (Ellenberg et al. 2001). Beide Bedingungen sind an den Wuchsorten des Mooses innerhalb des Bestandes erfüllt, da es nur in den beschatteten Bereichen der Fläche verzeichnet wurde. Vermutlich sind auch die Ansprüche an die Bodenfeuchte in den betreffenden Aufnahmequadraten erfüllt (Kap. 3.3.1.2), denn *Pleurozium schreberi* ist ein Trocknis- bis Frischezeiger (Ellenberg et al. 2001).

Fazit

Innerhalb des *Populus tremula*-Bestandes ist das Vorkommen der positiven Mofettenzeiger sehr gering und auf einzelne Individuen beschränkt. Einzig *Pleurozium schreberi* ist mit höheren Deckungsgraden verzeichnet worden. Es breitet sich vor allem in den Aufnahmequadraten aus in denen günstige Wuchsortbedingungen herrschen.

3.3.2.4 Das ökologische Verhalten ausgesuchter mofettophober Arten der Krautschicht

Vergleichbar mit den positiven Mofettenzeigern ist ebenfalls das Vorkommen der negativen Mofettenzeiger kaum nennenswert. Ausschließlich das Gras *Agrostis capillaris* konnte mit höheren Deckungsgraden verzeichnet werden, alle anderen mofettophoben Arten liegen mit ihren Deckungsgraden unter 2%.

Agrostis capillaris

In dem Espen-Bestand kommt *Agrostis capillaris* in nahezu allen Aufnahmequadraten vor (Abb. 127). Die Deckungsgrade befinden sich größtenteils in einem Wertebereich von 10 bis 50%.

In südwestlichen, südöstlichen sowie zentralen Aufnahmequadraten (Kap. 2.2) ist die Beteiligung des Grases an der Pflanzendecke sehr gering oder es fehlt gänzlich.

Bei einer Gegenüberstellung der Abb. 127a,b mit Abb. 123 ist festzustellen, dass das Ausbreitungsverhalten von *Agrostis capillaris* weder im Zusammenhang mit den CO₂-Ausgasungen, noch mit den Strahlungsintensitäten steht.

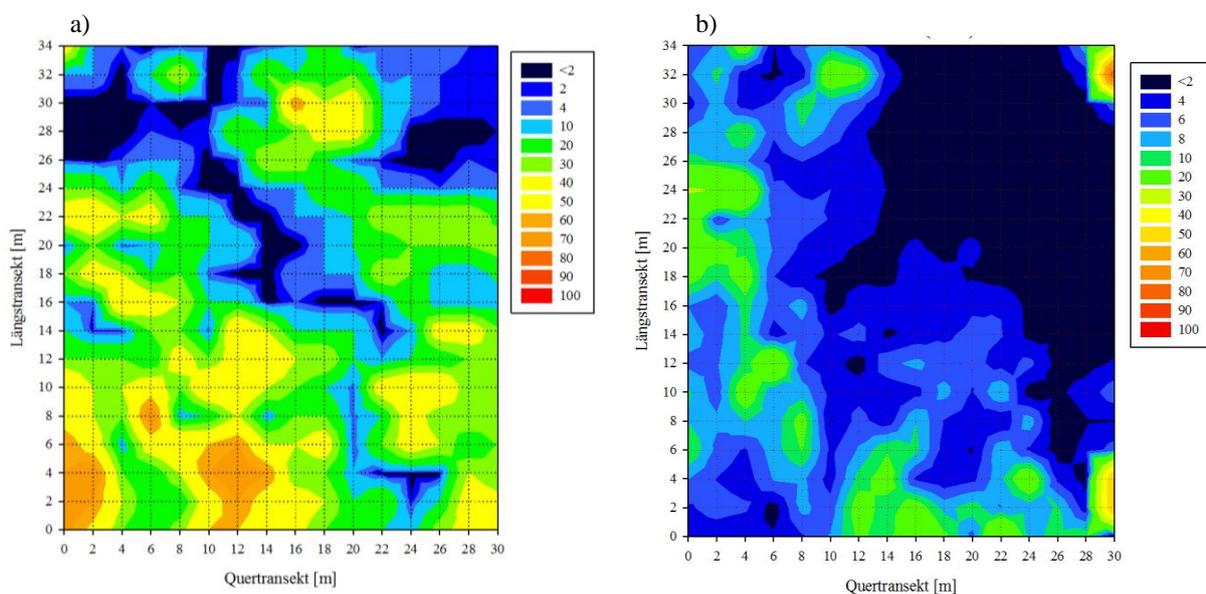


Abb. 127: Gesamtdeckungsgrad [%] von *Agrostis capillaris* (a), im Vergleich mit den CO₂-Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im *Populus tremula*-Bestand. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juli und August 2011)

Als Halblichtpflanze (Ellenberg et al. 2001) findet das Rote Straußgras bezüglich des Lichtangebotes in dem Bestand keine idealen Bedingungen vor (Kap. 3.3.1.3). Vermutlich tragen die anderen Bodeneigenschaften wie Bodenwasser und Bodenazidität zu der Verteilung der mofettophoben Art bei. Im Bezug zu der Bodenfeuchte ist das ökologische

Verhalten des Grases indifferent (Ellenberg et al. 2001). Als Säure- bis Mäßigsäurezeiger (Ellenberg et al. 2001) findet *Agrostis capillaris* in dem *Populus tremula*-Bestand günstige Bedingungen vor (Kap. 3.3.1.2).

Fazit

In dem *Populus tremula*-Bestand ist die Beteiligung der negativen Mofettenzeiger an der Pflanzendecke der Krautschicht sehr gering, und ist auf einzelne Individuen beschränkt. Ausschließlich das Gras *Agrostis capillaris* ist mit höheren Deckungsgraden aufgenommen worden.

3.3.2.5 Das ökologische Verhalten ausgewählter mofettovager Arten der Krautschicht

Mit der Abb. 125a konnte gezeigt werden, dass die mofettovagen Pflanzenarten innerhalb des *Populus tremula*-Bestandes dominieren. Im Gegensatz zur Birnen- und Moosmofette haben sie gegenüber den mofettophoben und mofettophilen Arten Konkurrenzvorteile. Diese Schlussfolgerung konnte auf die fehlenden CO₂-Ausgasungen in den oberen Messtiefen zurückgeführt werden. Im Folgenden wird die Ausbreitung des Grases *Deschampsia cespitosa* vorgestellt, da es von allen Pflanzenarten die höchsten Deckungsgrade aufweist. Neben dieser mofettovagen Art wurden jedoch ebenfalls die Gräser *Deschampsia flexuosa*, *Festuca rubra*, sowie *Poa angustifolia* mit höheren Deckungsgraden verzeichnet. Des Weiteren hat *Galeopsis tetrahit* eine hohe Beteiligung an der Pflanzendecke der Krautschicht.

Deschampsia cespitosa

Vergleichbar mit *Agrostis capillaris* wurde die Rasenschmiele in mehr als 50% der Aufnahmequadrate verzeichnet (Abb. 128). Die Deckungsgrade sind überwiegend in einen Wertebereich von 10 bis 70% einzuordnen. Vereinzelt wurden 80%, oder 2 bis 4% notiert. *Deschampsia cespitosa* fehlt in südlich bis südwestlichen Aufnahmequadraten, sowie in südöstlichen bis östlichen.

Mithilfe eines Vergleiches der Abb. 128a,b ist zu erkennen, dass das Verteilungsmuster von *Deschampsia cespitosa*, bis auf wenige Ausnahmen, den CO₂-Konzentrationen folgt. Es ist hauptsächlich in den wenig- bis nicht-gasenden Aufnahmequadraten zu finden. Trotz der wesentlich geringeren CO₂-Werte innerhalb des Bestandes im Vergleich mit denen in der Birnen- und Moosmofette, ist das Ausbreitungsverhalten der mofettovagen Art auf den drei untersuchten Flächen ähnlich (Kap. 3.1.3.5 und 3.2.3.5).

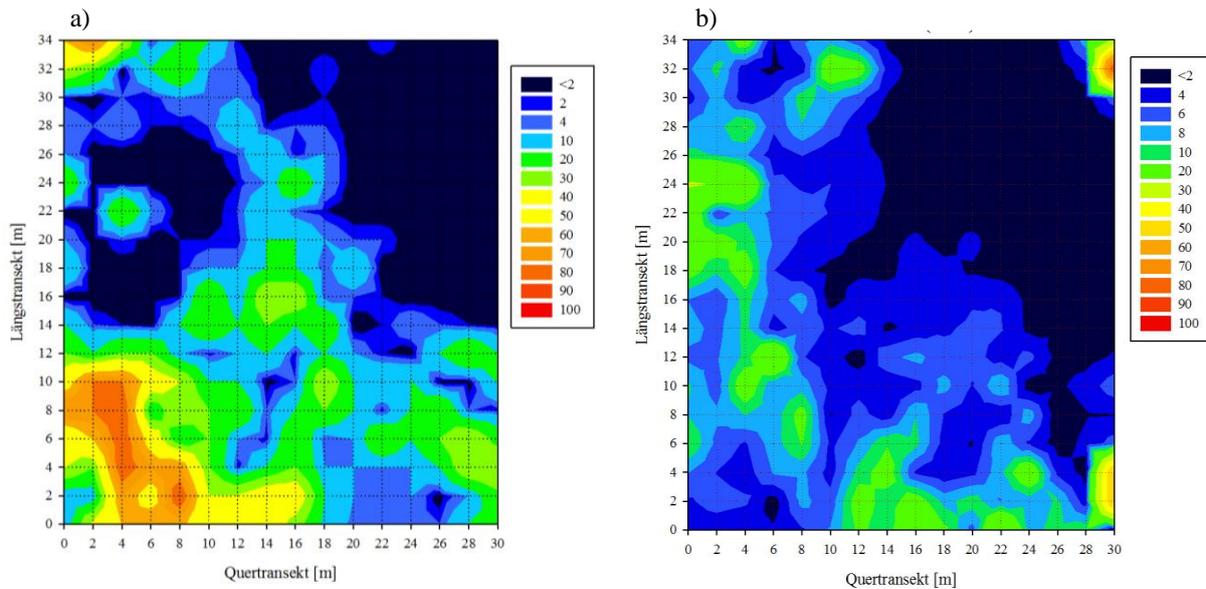


Abb. 128: Gesamtdeckungsgrad [%] von *Deschampsia cespitosa* (a), im Vergleich mit den CO₂-Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im *Populus tremula*-Bestand. Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juli und August 2011)

Aufgrund seiner tiefreichenden Wurzellänge (Kap. 3.1.3.5) fehlt *Deschampsia cespitosa* an den stärker gasenden Stellen des Espen-Bestandes. Einzig in wenigen nördlichen und östlichen Aufnahmequadraten (Kap. 2.2) sind Abweichungen festzustellen.

Zusätzlich kann die Verteilung des Grases vor dem Hintergrund seines ökologischen Verhaltens unter Konkurrenzdruck erklärt werden (Kap. 3.1.3.5). Als Halbschatten- bis Halblichtpflanze, und Frischezeiger mit einer Vorliebe für starke Bodenwasserschwankungen, liegen für die Rasenschmiele geeignete Bedingungen vor (Abb. 123, Kap. 3.3.1.2).

Fazit

Innerhalb des *Populus tremula*-Bestandes sind die mofettovagen Pflanzenarten dominant an der Bildung der Pflanzendecke beteiligt. Neben dem Gras *Deschampsia cespitosa* konnten viele weitere Arten mit höheren Deckungsgraden aufgenommen werden. Die fehlenden CO₂-Exhalationen und die Wuchsortbedingungen begünstigen die Ausbreitung der mofettovagen Pflanzen.

3.3.2.6 Charakterisierungen der Baumschicht

Die Baumschicht des Espen-Bestandes wird hauptsächlich von zwei Gehölzarten bestimmt, zum Einen von *Populus tremula* (Name der Fläche!), zum Anderen von *Quercus robur*. Mit geringen Deckungsgraden sind neben diesen beiden Arten *Acer platanoides*, *Betula pendula*, *Crataegus monogyna*, und *Sorbus aucuparia* in dem Bestand zu finden. Als einzige Art ist

Populus tremula einer Indikatorgruppe zuzuordnen, den negativen Mofettenzeigern. Im Folgenden werden die beiden wichtigsten Arten kurz vorgestellt.

Populus tremula (Salicaceae- Weidengewächse)

Populus tremula (Zitterpappel) ist ein Pionierbaum der unterschiedliche Standorte besiedeln kann. Er wächst auf Brandflächen, Rohböden, Brachen, Abgrabungsflächen, in lichten Wäldern oder auf Waldlichtungen. Dabei werden sandige bis tonige, sowie nasse bis trockene Böden bevorzugt, da die Zitterpappel sehr gut Trockenheit vertragen kann. Das Verbreitungsgebiet zieht sich von Europa nach Ostasien, und reicht vom Tiefland bis in die Gebirge, wegen guter Frostverträglichkeit (Schütt et al. 1992). Die Zitterpappel ist kurzlebig (maximal bis 100 Jahre) und nicht sehr konkurrenzfähig. Allerdings ist sie dennoch in der Lage rasch neue Flächen zu besiedeln, aufgrund vieler wurzelbürtiger Sprosse und Tochterpflanzen. Auch in dem *Populus tremula*-Bestand konnte nachgewiesen werden, dass 7% der Exemplare von einer Mutterpflanze stammen, und die restlichen 30% von zwei weiteren Mutterpflanzen (Ellenberg und Leuschner 2010; Pfanz, mündliche Mitteilung). *Populus tremula* kann eine maximale Höhe von 40 m erreichen, es werden jedoch wesentlich öfter 20 m beobachtet. Der Stammdurchmesser erreicht maximal 100 cm (Schütt et al. 1992; Mitchell und Wilkinson 2004; Schmidt und Hecker 2009). Nach dem Ablauf des Höhenwachstums bei *Populus tremula* ist diese Art dem Populus-Typ zuzuordnen. Demnach ist das Höhenwachstum hauptsächlich photo- und thermoperiodisch gesteuert. Die aktuellen Wetterereignisse sind dabei von entscheidender Bedeutung. Auf die im Vorjahr gebildeten Reservestoffe wird dabei wenig zurückgegriffen. Aufgrund hoher Temperatur- und Niederschlagsschwankungen ist das Höhenwachstum der Zitterpappel sehr unterschiedlich. Die Dauer der Vegetationsperiode wird durch ideale Bodenfeuchtigkeit, Nährstoffversorgung und Temperaturverhältnisse begünstigt. Sind die Bedingungen nicht optimal tritt eine vorzeitige Alterung des Assimilationsapparates ein (Lyr et al. 1992; Matyssek et al. 2010).

Das Wurzelsystem der Zitterpappel ist ein Horizontalwurzelsystem mit Senkerwurzeln. In diesem Fall ist die verstärkte Ausbildung eines kräftigen Horizontalwurzelsystems (was in dem Espen-Bestand gut beobachtet werden kann) ebenso dominant, wie das Wachstum tiefreichender Senkerwurzeln. Im Gegensatz zu einer Pfahlwurzel entspringen die Senkerwurzeln an den Seitenwurzeln (Schütt et al. 1992; Roloff 2010).

Innerhalb des Bestandes weist *Populus tremula* eine hohe Beteiligung an der Bildung des Kronendaches auf. Einzig an wenigen Stellen im Nordosten, Osten und Süden (Kap. 2.2) fehlt sie (Abb. 129a). Teilweise liegen diese Lücken an den Bestandesrändern. Im Vergleich mit

Abb. 129c ist zu erkennen, dass das Kohlendioxid keinen Einfluss auf die Verbreitung der Zitterpappel hat, denn sie ist sowohl auf gasenden, als auch auf nicht-gasenden Aufnahmequadraten aufgenommen worden.

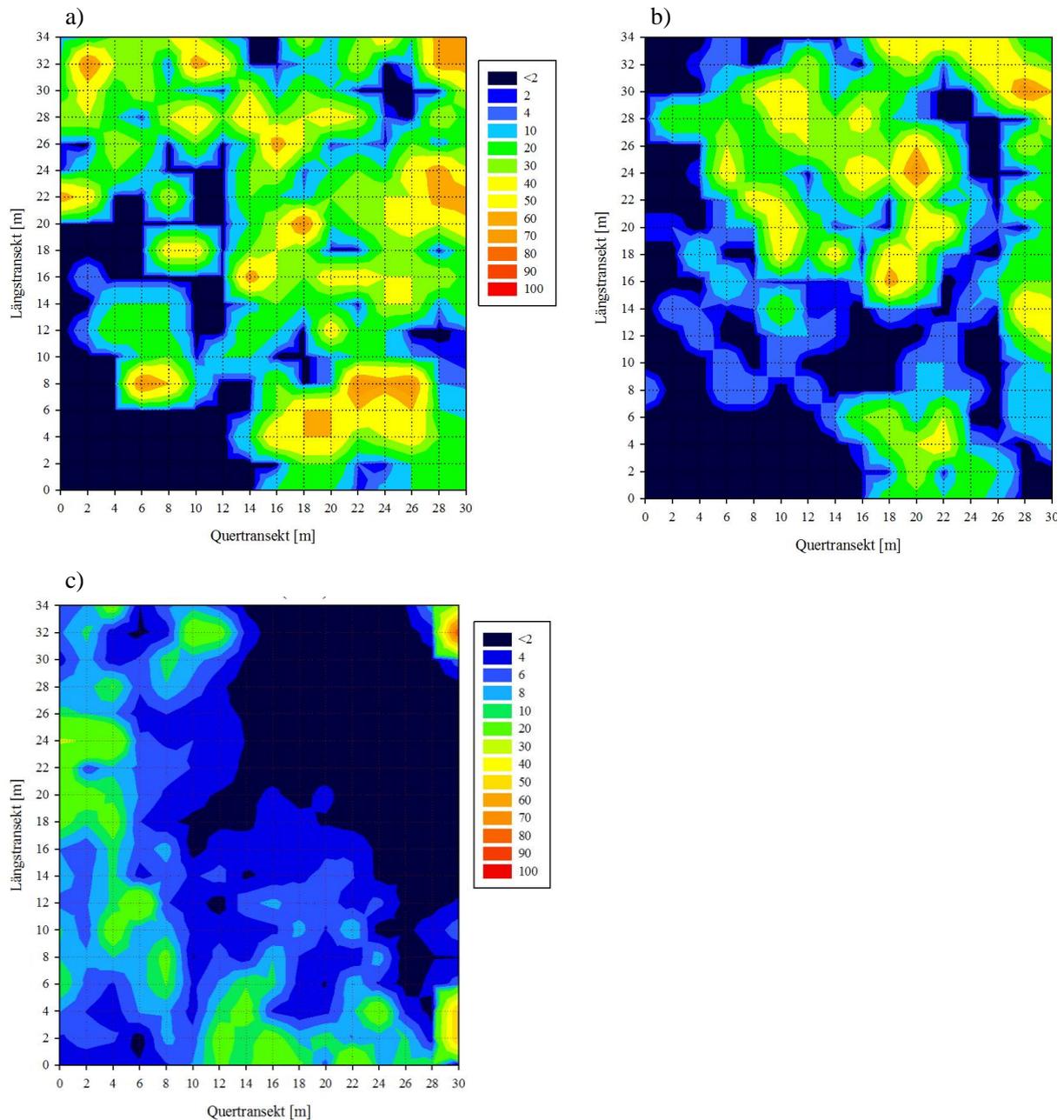


Abb. 129: Deckungsgrad [%] von *Populus tremula* (a) und *Quercus robur* (b) in der Baumschicht des Espen-Bestandes, im Vergleich mit der CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c). Die jeweilige Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung 2011)

Quercus robur (Fagaceae- Buchengewächse)

Quercus robur (Stiel-Eiche) ist eine typische Art europäischer Laubwälder. Sie wächst auf feuchten bis nassen, nährstoffreichen bis nährstoffarmen, sowie stark versauerten Böden. Außerdem ist die Frostverträglichkeit sehr hoch. Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich über

Europa bis zum Ural. Nach 120 Jahren wird in der Regel die maximale Höhe erreicht; in der Jugend kann eine Stiel-Eiche zwischen 50 und 85 m hoch werden. Der Stammdurchmesser beträgt höchstens 250 cm (Schütt et al. 1992; Schmidt und Hecker 2009; Ellenberg und Leuschner 2010). Das Höhenwachstum von *Quercus robur* ist dem Quercus-Typ zuzuordnen. Das bedeutet, dass das Wachstum sehr früh im Jahr eingestellt wird, ungeachtet günstiger Wetterbedingungen. Das stärkste Höhenwachstum wird noch vor dem Laubaustrieb erreicht. Aufgrund dessen muss dabei auf die Assimilationsleistung des Vorjahres (Reservestoffe) zurückgegriffen werden. Folglich wird das Höhenwachstum nicht abiotisch gesteuert, sondern endogen. Während das Triebwachstum eingestellt wird dauern das Wachstum der Wurzeln und das Dickenwachstum noch an (Lyr et al. 1992; Matyssek et al. 2010).

Die Stiel-Eiche bildet ein Pfahlwurzelsystem aus, mit einer tiefreichenden dicken Hauptwurzel. Diese kann maximal 200 cm lang werden. Von der Pfahlwurzel zweigen schwächere Seitenwurzeln ab (Schütt et al. 1992; Roloff 2010; Ellenberg und Leuschner 2010).

In dem Espen-Bestand nimmt *Quercus robur* sehr viel Fläche ein, insgesamt aber weniger als *Populus tremula*. Die stärkste Ausbreitung ist in der südlichen Hälfte (Kap. 2.2) zu verzeichnen (Abb. 129b). Im Vergleich mit Abb. 129c ist zu erkennen, dass die Stiel-Eiche die gasenden Bereiche der Fläche meidet.

Ein Grund für das unterschiedliche Ausbreitungsverhalten von *Populus tremula* und *Quercus robur* ist vermutlich ein verschieden ausdifferenziertes Wurzelwachstum.

Fazit

Der *Populus tremula*-Bestand wird im Wesentlichen von zwei Gehölzarten beherrscht, zum Einen von *Populus tremula* und zum Anderen von *Quercus robur*. Beide Arten finden in der Fläche günstige Standortbedingungen vor, werden aber in ihrer Ausbreitung unterschiedlich durch die CO₂-Ausgasungen beeinflusst.

3.3.3 Ökophysiologische, physikalische und dendrochronologische Untersuchungen an *Populus tremula* im CO₂-Gradienten

Für die ökophysiologischen, physikalischen und dendrochronologischen Untersuchungen wurden sowohl alle nummerierten Bäume verwendet, als auch einzelne Individuen von *Populus tremula* die anhand eines CO₂-Gradienten bestimmt wurden. In den Tab. 37 und 38 sind Listen der untersuchten Bäume zu finden, zusammen mit einigen bodenkundlichen und anatomischen Parametern.

Tab. 37: Anatomische und bodenkundliche Parameter (aus 40 cm Bodentiefe) der gefälltten Bäume aus dem *Populus tremula*-Bestand für die dendrochronologischen Untersuchungen. Die Angaben des Baumalters, des Stammdurchmessers (DBH) und der Baumhöhe, sowie in veränderter Form die Tabelle, stammen aus Vejputsková et al. (2015, eingereicht). Die rot-markierte Hälfte der Tabelle beinhaltet die hoch CO₂-Bäume, die blau-markierte die niedrig CO₂-Bäume (Datenerhebung 2010 bis 2012)

CO ₂ -Gruppe	Baumnummer	CO ₂ [%] in 40 cm	Baumalter	DBH [cm]	Baumhöhe [m]	pH in 40 cm	Bodenfeuchte [%] in 40 cm
hoch CO ₂	3	9,5	22	11,4	13,5	4,3	14,0
	5	16,4	21	13,9	12,9	4,3	19,0
	8	21,0	22	11,0	11,9	4,2	22,7
	74	9,8	29	14,5	14,1	4,3	14,4
	88	13,0	27	14,6	14,6	4,4	17,4
niedrig CO ₂	13	0,9	31	14,2	13,6	4,3	21,9
	15	1,0	30	16,0	14,4	4,4	19,0
	50	3,0	30	11,1	13,2	4,0	24,3
	102	0,8	28	12,2	12,5	4,2	15,4
	102a	0,6	31	11,2	12,0	4,3	15,8

3.3.3.1 Baumhöhen und Längenwachstum

Baumhöhen

Die Messungen der Baumhöhen wurden an allen gekennzeichneten Individuen durchgeführt, die gefälltten Bäume ausgenommen.

In Abb. 130 sind die CO₂-Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe abgebildet, zusammen mit den Baumhöhen, die durch die weißen Punkte dargestellt werden.

Die kleinsten Punkte bilden die niedrigsten Höhen (5,5 bis 6,5 m) ab, die nächst größeren Punkte Baumhöhen von 7 bis 12,5 m, die mittelgroßen 13 bis 15,5 m und die großen Punkte ab 16 bis 18,5 m.

Kein Exemplar erreicht die arttypische Baumhöhe von 20 m (Kap. 3.3.2.6). Ein Zusammenhang mit den CO₂-Konzentrationen ist nicht festzustellen. Hochgewachsene Bäume sind sowohl in gasenden, als auch in nicht-gasenden Bereichen der Fläche zu finden. Genauso sind niedrige Exemplare auf erhöhten und niedrigen CO₂-Werten zu finden (Abb. 130).

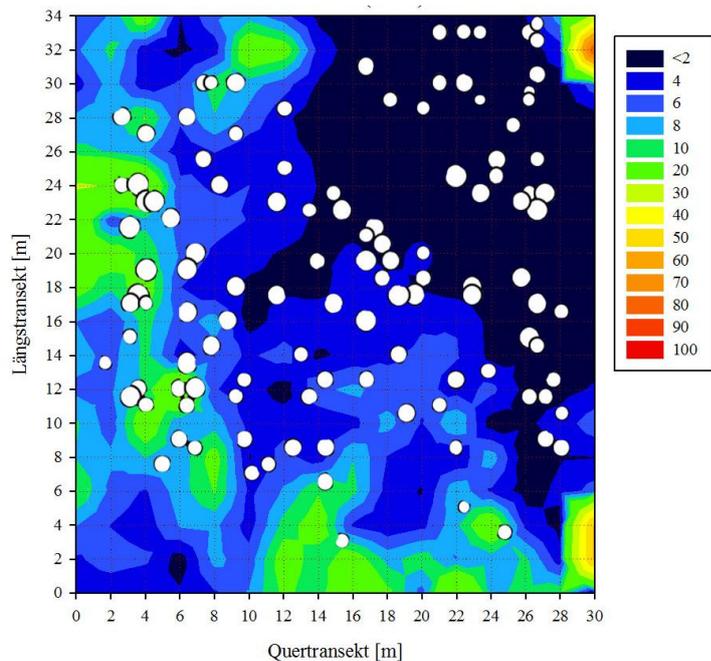


Abb. 130: Baumhöhe [m] ausgewählter *Populus tremula*-Individuen des Espen-Bestandes im CO₂-Gradienten (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe). Kleinste Kreise=5,5-6,5 m, kleine Kreise=7-12,5 m, mittlere Kreise=13-15,5 m und große Kreise=16-18,5 m Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung September 2011)

Längenwachstum

Neben den Baumhöhen wurde der Längenzuwachs an zehn bestimmten Bäumen untersucht (Vejpustková et al. 2015, eingereicht). In Tab.37 sind die untersuchten Bäume mit unterschiedlichen anatomischen und bodenkundlichen Faktoren aufgelistet.

In den ersten Wachstumsjahren wuchsen alle Exemplare schnell bis auf Brusthöhe. Danach unterscheiden sich die Kurvenverläufe dahingehend, dass die Bäume auf gasenden Stellen intensiver wuchsen, als Kontrollbäume (Abb. 131). Während ihrer gesamten Lebensphase betrug der durchschnittliche Längenzuwachs der CO₂-Bäume 56 cm pro Jahr und der der Kontrollbäume 44 cm im Jahr (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

Die Untersuchungen ergaben weiterhin, dass die Wetterbedingungen keinen Einfluss auf das unterschiedliche Längenwachstum der CO₂- und Kontrollbäume hatten. Für beide Gruppen konnte eine Abhängigkeit des Längenzuwachses von milden Winter- und Frühlingsmonaten, sowie einem niederschlagsreichen Sommer beobachtet werden (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

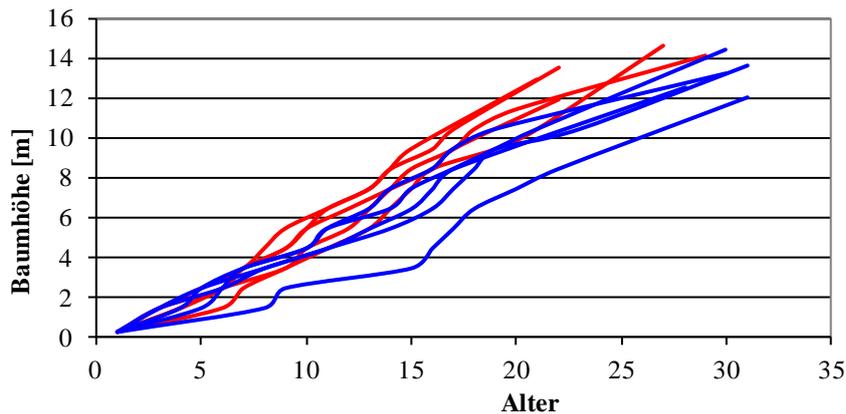


Abb. 131: Längenzuwachs der zehn *Populus tremula*-Exemplare nach einem CO₂-Gradienten (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem Espen-Bestand. Die Bäume wurden im September 2010 gefällt und untersucht. Die roten Linien bilden die Höhenzuwachsrate der CO₂-Bäume ab, die blauen die Werte der Kontrollbäume (Vejpustková et al. 2015, eingereicht, leicht verändert). (Datenerhebung 2010)

In Kap. 3.3.2.6 wurde der Ablauf des Höhenwachstums bei *Populus tremula* beschrieben, der dem witterungsabhängigen Populus-Typ zuzuordnen ist. Danach richtet sich der Längenzuwachs nach optimalen Witterungsverhältnissen, vor allem hinsichtlich der Temperatur und des Niederschlages. Die Klimadaten haben gezeigt, dass die intensiven Wachstumsjahre der untersuchten Exemplare durch hohe Winter- und Frühlingstemperaturen, sowie erhöhte Niederschläge gekennzeichnet waren. Demnach lagen für die Espen in dem untersuchten Bestand günstige Wachstumsbedingungen vor: gute Bodendurchfeuchtung und milde Temperaturen (Lyr et al. 1992; Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

Für das intensivere Höhenwachstum der CO₂-Bäume kann es mehrere Gründe geben. Es ist bekannt, dass nicht allein die Blätter Orte der Photosynthese sind, sondern auch andere Pflanzenorgane, beispielsweise Früchte, grüne Blüten, Wurzeln oder Stammgewebe (Pfanzen et al. 2002). Genauso wie die Blätter erfüllen diese pflanzlichen Gewebe alle Voraussetzungen für eine effiziente Photosynthese. Neben vielen anderen Faktoren, wie Licht, Wasser, eine entsprechende Enzymausstattung oder Nährstoffe ist das Vorhandensein von Chloroplasten in den photosynthetisch aktiven Geweben von entscheidender Bedeutung. Bei *Populus tremula*, wie bei vielen anderen Gehölzarten, konnte eine Rindenphotosynthese in dem Chlorenchym der Zweige und des Stammes nachgewiesen werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass der Chlorophyllgehalt im Chlorenchym, ähnlich wie in den Blättern, mit sinkenden Strahlungsintensitäten zunahm (Wittmann et al. 2001). Eine Konsequenz aus dem zusätzlichen Chrophyllgehalt in dem Chlorenchym der lebenden Borke ist eine erhöhte CO₂-Assimilation. Eine zusätzliche Konsequenz ist, dass dann auch in diesem Gewebe Atmung stattfindet. Während der Atmung wird Kohlendioxid freigesetzt, welches nach dem 1.

Fick'schen Gesetz entlang eines Konzentrationsgradienten durch die Pflanze diffundiert und durch die Stomata in die Atmosphäre austritt. Jedoch sind die äußeren Rindenschichten wenig gasdurchlässig, wodurch es zu einer CO₂-Akkumulation im Stamm kommt. Eine Folge sind stark erhöhte CO₂-Konzentrationen die im Prozentbereich liegen können, und dadurch eine zunehmende Azidifizierung verursachen (Pfanzen et al. 2002; Pfanzen et al. 2004). Aufgrund der sauerstoffverdrängenden Wirkung des Kohlendioxids (Kap. 1.2.2) entstehen hypoxische Bedingungen im Stamm. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass es sowohl Anpassungen dieser Pflanzenteile an erhöhte CO₂-Gehalte gibt, als auch Mechanismen zur Verhinderung einer beginnenden Fermentation (Pfanzen et al. 2002; Pfanzen et al. 2004).

In Kap. 1.2.2 wurde erläutert, dass sich das aufsteigende CO₂ in Ausgasungsbereichen im Bodenwasser löst, und dann in Form der Kohlensäure vorliegt. Zusammen mit anderen Nährstoffen wird es über die Wurzeln aufgenommen und gelangt über den apoplastischen Transport in das geschlossene Zellsystem und in die Interzellularen des Rindenparenchyms der Wurzeln (Larcher 2001; Teskey et al. 2008). Weiterhin gelangt es dann mit dem Xylemtransport weiter in die Pflanze. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass das CO₂ als Gas aus dem Xylemwasser austritt, und sich entlang eines Konzentrationsgradienten in der Pflanze verteilt bis es schließlich die Blätter erreicht (siehe oben) (Pfanzen 2008b; Teskey et al. 2008; Vajpustková et al. 2015, eingereicht).

Aus diesen Erläuterungen können verschiedene Schlüsse gezogen werden. Es ist davon auszugehen, dass *Populus tremula* an erhöhte CO₂-Konzentrationen im Stamm angepasst ist, und Mechanismen zur Vermeidung hypoxischer Bedingungen hat. Dies würde ebenfalls auf die untersuchten *Populus tremula*-Exemplare zutreffen und erklären aus welchem Grund die CO₂-Bäume keine Einschränkungen im Längenzuwachs aufweisen. Die Abb. 131 hat vielmehr einen intensiveren Längenzuwachs der CO₂-Bäume aufgezeigt. Es ist zu vermuten, dass die Photosyntheseleistung, beziehungsweise die CO₂-Fixierung durch das zusätzliche Kohlendioxid gesteigert wurde. In Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich nicht unbedingt die Photosyntheserate bei *Populus tremula* erhöhte. Es konnte jedoch eine Reduzierung der Atmung, und somit der CO₂-Freisetzung, gemessen werden. Das bedeutet, dass das CO₂ im Rindenparenchym refixiert wurde, und letztendlich der Photosynthese zur Verfügung stand (Wittmann et al. 2001). Die Folge ist eine Förderung des Wachstums, und folglich des Längenzuwachstums der CO₂-Bäume.

Hinzukommt das Alter der Bäume. Wittmann et al. (2001) konnten nachweisen, dass der Chlorophyllgehalt des Rindenparenchyms altersabhängig ist. In jüngeren Zweigabschnitten wurden höhere Chlorophyllgehalte gemessen als in älteren (Wittmann et al. 2001). Die CO₂-

Bäume waren im Durchschnitt 24 Jahre alt, die Kontrollbäume 30 Jahre (Tab. 37). Folglich wäre es wahrscheinlich, dass in den Kontrollbäumen eine geringere assimilatorische CO₂-Fixierung stattgefunden hat, als in den jüngeren CO₂-Bäumen.

Fazit

Die Untersuchungen an den Espen-Exemplaren ergaben zum Einen, dass kein Baum die Höhe von 20 m erreichte. Zum Anderen konnte gezeigt werden, dass Bäume auf gasenden Bereichen der Fläche einen stärkeren Längenzuwachs hatten als Exemplare in Kontrollbereichen. Vermutlich verbirgt sich hinter diesen Resultaten eine CO₂-Förderung der Bäume auf Stellen mit höheren CO₂-Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe.

3.3.3.2 Stammdurchmesser und Ringzuwachs

Stammdurchmesser

Der Stammdurchmesser wurde an 118 gekennzeichneten *Populus tremula*-Exemplaren gemessen. Die Abb. 132 ist ähnlich zu deuten wie die Abb. 130.

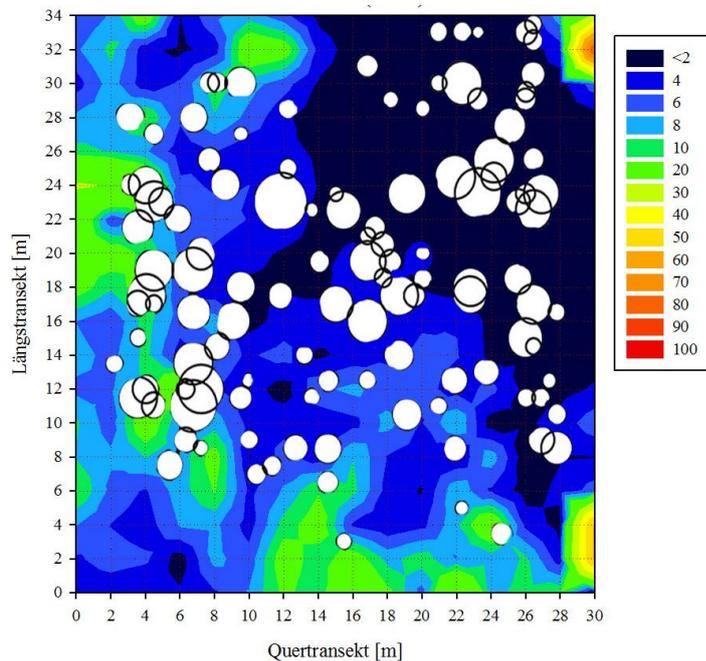


Abb. 132: Stammdurchmesser [cm] in circa 140 cm Höhe von 118 Individuen des *Populus tremula*-Bestandes im CO₂-Gradienten (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe). Kleinster Kreis=6 cm, mittlere Kreise=8-20 cm und große Kreise=27 cm. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung September 2011)

Dargestellt sind die CO₂-Konzentrationen in 40 cm Bodentiefe der Fläche, zusammen mit den gemessenen Stammdurchmessern, die durch die weißen Punkte abgebildet werden. Der kleinste Wert betrug 6 cm (kleinster Punkt), der höchste 27 cm (größter Punkt). Insgesamt

befindet sich der größte Teil aller ermittelten Stammdurchmesser in einem Wertebereich von 8 bis 20 cm.

Ringzuwachs

In Ergänzung zu den Stammdurchmessern wurde an den gefälltten *Populus tremula*-Exemplaren der jährliche Ringzuwachs ermittelt (Abb. 133).

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die CO₂-Bäume einen höheren radialen Zuwachs aufweisen, als die Kontrollbäume. Das gleiche Ergebnis ist in allen Stammdurchmessern festzustellen. Im Durchschnitt ist die Ringweite der CO₂-Bäume mit 1,43 mm pro Jahr weiter als die der Kontrollbäume. In den Jahren mit günstigen Wachstumsbedingungen sind die Unterschiede besonders deutlich (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

Auch hinsichtlich des Ringzuwachses konnte festgestellt werden, dass die Wetterbedingungen keinen Einfluss auf das unterschiedliche Dickenwachstum der CO₂- und Kontrollbäume hatten. Beide Gruppen zeigen eine Abhängigkeit des Ringzuwachses von milden Winter- und Frühlingsmonaten, sowie reichlichem Niederschlag im Sommer (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

Neben dem Längenzuwachs ist auch das Dickenwachstum von den Wetterverhältnissen abhängig. Abgesehen von der Temperatur ist die Wasserversorgung der Pflanzen von entscheidender Bedeutung. Vor allem in trockenen Sommermonaten macht sich Wassermangel an den Jahrringbreiten bemerkbar, da im Sommer (Juni bis Juli) die höchste Substanzproduktion erfolgt (Lyr et al. 1992; Ellenberg und Leuschner 2010). In einigen Jahren konnten günstige Wetterverhältnisse für das Wachstum der CO₂- und Kontrollbäume nachgewiesen werden (Vejpustková et al. 2015, eingereicht). Daraus ergibt sich keine Begründung für die Unterschiede im Dickenwachstum der beiden Gruppen.

In Kap. 3.3.3.1 wurde erklärt, dass *Populus tremula* zur Rindenphotosynthese fähig ist, und dass eine erhöhte CO₂-Fixierung vorliegt, wenn zusätzliches Kohlendioxid in die Pflanze gelangt. Es wurde erläutert, dass diese Umstände zu einem gesteigerten Wachstum führen können. Das Dickenwachstum lässt sich ähnlich begründen. Die zusätzliche Aufnahme von Kohlendioxid bei den CO₂-Bäumen mündet in einer erhöhten CO₂-Assimilation, was letztendlich zu einer höheren Photosyntheseleistung führt. In den Jahren mit optimalen Wetterbedingungen machte sich die CO₂-Fixierung im Stamm noch deutlicher im Wachstum bemerkbar, als in Jahren mit ungünstigen Wetterverhältnissen (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

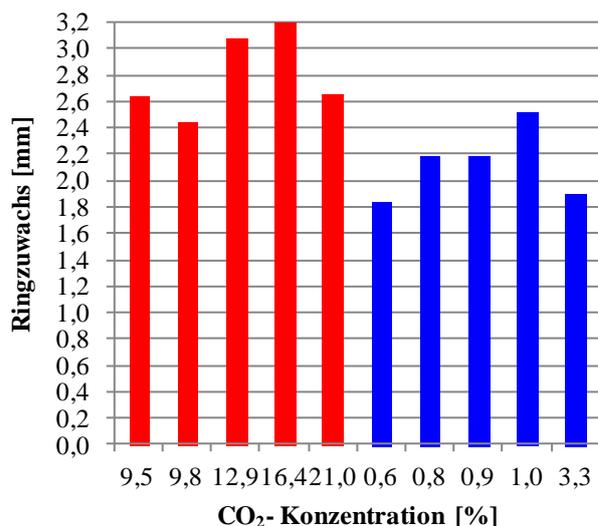


Abb. 133: Ringzuwachs in 140 cm Stammhöhe der zehn *Populus tremula*-Exemplare nach einem CO₂-Gradienten (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem Espen-Bestand. Die abgebildeten Werte sind die Mittelwerte der jährlichen Zuwachsraten. Die Bäume wurden im September 2010 gefällt und untersucht. Die roten Säulen bilden die Längenzuwachsraten der CO₂-Bäume ab, die blauen die Werte der Kontrollbäume. Die Daten stammen von Monika Vejpusťková (Vejpusťková et al. 2015, eingereicht). (Datenerhebung 2010)

Fazit

Mit der Abb. 133 konnte aufgezeigt werden, dass auch das Dickenwachstum der CO₂-Bäume durch das zusätzliche Kohlendioxid begünstigt wird. Dies konnte vor allem in Jahren mit optimalen Wetterbedingungen festgestellt werden. In Jahren mit ungünstigen Wetterverhältnissen hatte das aufsteigende Kohlendioxid weder Einfluss auf das Wachstum der CO₂-Bäume, noch auf das der Kontrollbäume (Vejpusťková et al. 2015, eingereicht). Des Weiteren wurde dargestellt, dass die Stammdurchmesser der untersuchten Bäume weit unter den Literaturwerten liegen.

3.3.3.3 Lentizellen

Lentizellen ermöglichen den Gasaustausch aus der suberinisierten gasundurchlässigen Rinde (Roloff 2010). Mit der Aufnahme der Lentizellen im März 2012, wurde der Hypothese nachgegangen, ob Bäume auf Ausgasungen mehr Lentizellen ausbilden, als Bäume auf nicht-gasenden Stellen.

In Abb. 134 sind die Summen der Lentizellen der Borke pro Fläche aller Bäume der CO₂-Gruppe und der Kontrollgruppe, pro Himmelsrichtung abgebildet. Es ist offensichtlich, dass die CO₂-Bäume in jeder Himmelsrichtung mehr Lentizellen ausbilden, als die Kontrollbäume. Bei der westlichen Stammseite ist der Unterschied besonders deutlich und bei der östlichen am geringsten.

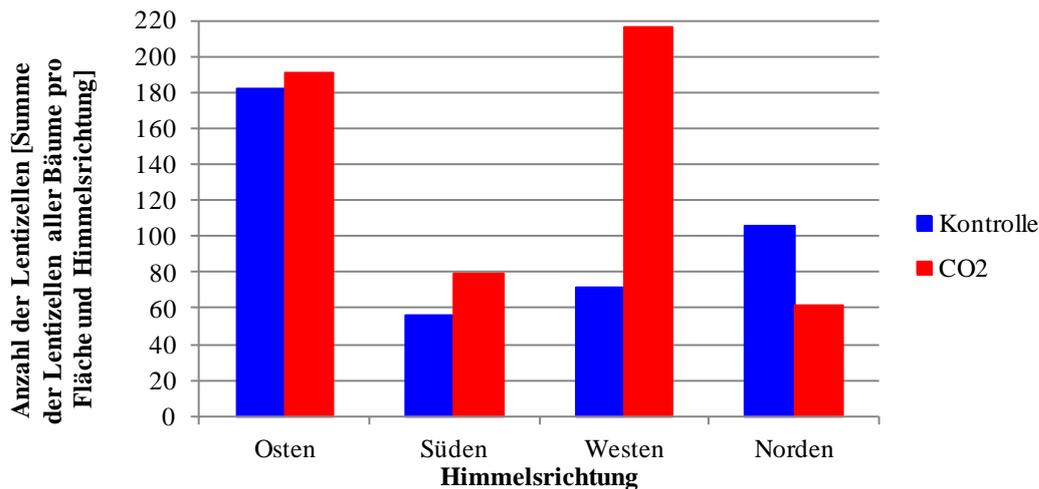


Abb. 134: Anzahl der Lentizellen bei ausgesuchten *Populus tremula*-Exemplaren nach einem CO₂-Gradienten (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem *Populus tremula*-Bestand. Die Anzahl der Lentizellen ergibt sich aus den Summen der gezählten Lentizellen pro Himmelsrichtung und Fläche. Die roten Säulen markieren die Werte der CO₂-Bäume, die blauen die Werte der Kontroll-Bäume. (Datenerhebung März 2012)

Der Tab. 38 sind Informationen über die untersuchten Bäume zu entnehmen. Demnach gibt es keinen anderen gemessenen Parameter der eine Wirkung auf die Ausbildung der Lentizellen hatte, da die Variabilität dieser Parameter zwischen den zwei Baumgruppen sehr gering ist.

Ungeachtet der Möglichkeit, dass der beeinflussende Faktor nicht erfasst wurde, ist die Annahme zu formulieren, dass das Kohlendioxid die Bildung von Lentizellen beeinflusst hat. Aufgrund der mangelnden O₂-Versorgung der Stammgewebe durch die Suberineinlagerungen werden Lentizellen ausgebildet, aus denen CO₂ entweichen und Sauerstoff eindringen kann (Lüttge und Kluge 2012). Folgerichtig ist es höchst wahrscheinlich, dass die Bäume auf gasenden Stellen mehr Lentizellen ausgebildet haben, als die Kontrollbäume. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit zusätzliches Kohlendioxid, dass durch die Wurzeln aufgenommen wurde, wieder an die Atmosphäre abzugeben. Dadurch wird eine beginnende Gärung durch Sauerstoffmangel verhindert, da durch die Lentizellen gleichzeitig Sauerstoff eintritt.

Tab. 38: Anatomische und bodenkundliche Parameter (aus 40 cm Bodentiefe) nummerierter Bäume aus dem Espen-Bestand für die Erfassung der Lentizellen. In der roten Hälfte der Tabelle befinden sich die Informationen zu den CO₂-Bäumen, in der blau markierten Hälfte die Informationen zu der Kontrollgruppe. (Datenerhebung 2011 und 2012)

CO ₂ -Gruppe	Baum-nummer	CO ₂ [%] in 40 cm	DBH [cm]	Baum-höhe [cm]	pH in 40 cm	Boden-feuchte [%] in 40 cm	Lenti-Zellen (Gesamt)
CO ₂	2	35,3	14,1	13,5	4,1	16,0	8
	4	38,9	10,0	10,0	4,3	13,2	26
	6	32,9	9,6	8,0	4,5	15,6	106
	7	37,0	15,3	13,5	4,2	20,1	18
	9	10,0	7,4	9,5	4,0	21,5	25
	20	19,2	11,2	10,0	4,3	20,5	67
	21	47,5	9,9	9,5	4,1	22,0	6
	22	26,1	8,6	7,5	4,3	21,7	46
	35	15,3	7,1	9,0	4,1	22,1	20
	36	26,7	7,0	9,0	4,1	20,4	47
	39	18,9	15,0	13,5	4,1	24,6	27
	41	38,0	10,4	12,5	4,0	18,7	10
	52	45,6	12,4	15,0	3,9	25,6	10
	53	40,5	10,3	11,0	4,0	21,8	0
	67	18,4	9,2	11,0	4,0	23,3	16
	68	18,6	10,7	15,5	3,8	24,0	50
	69	26,4	18,9	17,0	3,6	24,1	19
71	28,2	20,5	20,5	17,0	4,0	16,6	36
Kontrolle	14	0,3	8,3	9,5	4,3	20,2	0
	16	1,5	9,5	10,0	4,6	15,6	35
	24	1,8	9,2	6,0	4,0	18,0	34
	25	1,0	10,3	6,5	4,0	21,3	30
	26	0,2	16,4	9,5	4,0	22,9	13
	27	0,2	10,3	5,5	4,3	15,7	24
	28	0,7	20,1	13,5	4,3	20,8	24
	29	0,2	10,9	9,5	4,8	18,2	5
	30	0,4	20,7	13,0	5,1	24,0	0
	31	1,0	12,4	9,5	6,1	16,3	2
	32	0,0	20,2	18,5	4,7	18,6	25
	61	0,8	23,5	14,5	5,5	16,2	0
	62	0,4	9,5	8,5	4,9	16,1	12
	63	0,4	17,8	15,5	4,5	17,4	9
	64	0,2	18,1	16,5	4,7	20,2	23
	65	0,5	11,9	13,0	5,0	18,0	37
	84	0,4	9,0	8,0	4,1	18,6	45

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Bäume auf gasenden Stellen des Espen-Bestandes mehr Lentizellen gebildet haben, als Bäume auf nicht-gasenden Bereichen. Aufgrund der Funktion von Lentizellen wurde die Annahme formuliert, dass die erhöhte

Entstehung von Lentizellen bei den CO₂-Bäumen eine Anpassung an das Bodengas ist. Auf diese Weise kann eine zunehmende Azidität als Folge erhöhter CO₂-Akkumulation in den Stammgeweben verhindert werden.

3.3.3.4 Physikalische Holzuntersuchungen (Fractometrie)

Aufgrund der Resultate der anatomisch-morphologischen sowie dendrochronologischen Untersuchungen entstand die Fragestellung, ob erhöhte CO₂-Konzentrationen im Bodengas auf die physikalischen Eigenschaften des Holzes einwirken. Bei den physikalischen Eigenschaften ist vor allem die Festigkeit des Holzes zu berücksichtigen. Mechanische Belastungen abiotischen Ursprunges beeinflussen die Festigkeit des Holzes und somit das äußere Erscheinungsbild von Bäumen (Götz und Mattheck 1999). Eine Modifikation des Holzes welche beispielsweise durch einseitige Windbelastungen entsteht ist Reaktionsholz, das weiterhin in Zug- oder Druckholz zu unterscheiden ist.

Zugholz entsteht auf der windzugewandten Seite (Luv-Seite) des Stammes oder der Äste geneigter Bäume. Es verstärkt die Widerstandskraft gegen Zugkräfte. Gegenüber windgeschützten aufrecht wachsenden Bäumen enthält das Zugholz mehr Zellulose und weniger Lignin. Die Holzfasern sind dickwandig und unregelmäßig voluminös. Die Zellwände haben eine zusätzliche gelatineartige Schicht.

Druckholz hingegen wird an der windabgewandten Seite (Lee-Seite) des Stammes und der Äste schief stehender Bäume gebildet, und verstärkt demnach die Widerstandskraft gegen Druckkräfte. Im Vergleich mit Normalholz hat es weniger Lignin aber mehr Zellulose. Zusätzlich hat es einen erhöhten Spätholzanteil in den Jahrringen, sowie dickwandige rundliche Tracheiden (Schütt et al. 1992; Roloff 2010). Zusätzlich beeinflussen weiterhin die Licht-, Wasser-, und Nährstoffverhältnisse des Bodens die Festigkeit des Holzes (Götz et al. 2001).

Das Messverfahren und die Beschreibung der Festigkeitskenngrößen sind in Kap. 2.4.4 nachzulesen.

Die ermittelten Festigkeitskenngrößen zeigen keine Variabilität zwischen den CO₂-Gruppen (Abb. 135). Die Mittelwerte sind sehr konstant. Einzig bei der axialen Druckfestigkeit ist eine leichte Erhöhung, mit steigender CO₂-Konzentration festzustellen. Allerdings muss in diesem Fall die recht hohe Standardabweichung berücksichtigt werden.

Die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen liegen in den Wertebereichen für *Populus x canadensis* (Schwarzpappel-Hybrid) (Götz und Mattheck 1999).

Anhand der ermittelten Werte ist zunächst die Schlussfolgerung zu formulieren, dass das aufsteigende Kohlendioxid keinen Einfluss auf die Festigkeit des Holzes hat. Des Weiteren besteht kein Zusammenhang mit einem anderen gemessenen Bodenparameter, da die Bodeneigenschaften innerhalb der Fläche ziemlich homogen sind.

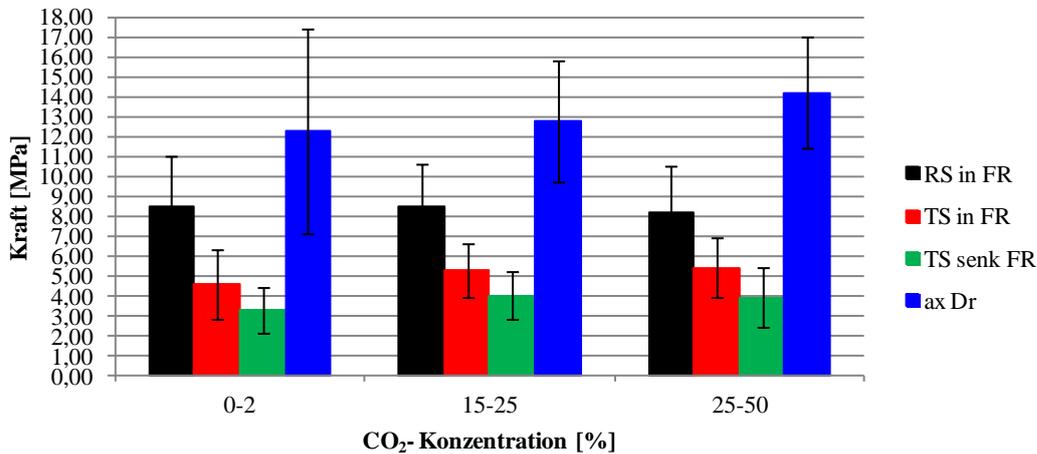


Abb. 135: Festigkeitskenngrößen der untersuchten *Populus tremula*-Individuen aus dem Espen-Bestand, eingeordnet in verschiedene CO₂-Gruppen (CO₂-Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe). RS in FR=radialen Scherfestigkeit in Faserrichtung, TS in FR=tangentiale Scherfestigkeit in Faserrichtung, TS senk FR=tangentiale Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung, ax Dr=axiale Druckfestigkeit. Die abgebildeten Werte sind Mittelwerte der ermittelten Festigkeiten der Bäume einer CO₂-Gruppe. (Datenerhebung September 2011)

Fazit

Die physikalischen Holzuntersuchungen führen zu dem Resultat, dass mit den ermittelten Werten kein Zusammenhang zwischen der Holzfestigkeit und den CO₂-Konzentrationen oder einer anderen Bodeneigenschaft besteht.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen die dieser Arbeit zugrunde liegen waren zwei Schwerpunktbereichen der Mofettenforschung zuzuordnen, aus denen sich mehrere Hypothesen ableiten ließen (Kap. 1.3). Der erste Bereich umfasste im Wesentlichen die Auswirkungen von aufsteigendem geogenen Kohlendioxid auf die Pedosphäre, sowie die pedologischen und geologischen Gegebenheiten der Gasdiffusion. Neben der Charakterisierung der Pedosphäre der Birnen- und Moosmofette in Form einer Momentaufnahme, stand vor allem eine Überprüfung der zeitlichen Mofettendynamik im Vordergrund. Unter der Mofettendynamik wurden die Fragestellungen verstanden, die sich auf Veränderungen innerhalb der Mofettenböden bezogen. Als Auslöser zeitlicher pedologischer Variationen wurden die seismischen Aktivitäten, sowie die Wetterbedingungen fokussiert.

Für die Erforschung des Einflusses von Kohlendioxid auf die drei Phasen der Pedosphäre wurden in der Birnen- und Moosmofette bodenkundliche Messungen durchgeführt. Die Resultate zeigten in beiden Untersuchungsstandorten, dass erhöhte CO₂-Konzentrationen im Boden Veränderungen der Bodeneigenschaften verursachen. Die Resultate der Bodengasmessungen in der Birnen- und Moosmofette wiesen abweichende Bodengaszusammensetzungen im Vergleich zu CO₂-unbelasteten Böden auf. Diese führten zu hypoxischen Bedingungen im Wurzelraum der Pflanzen. Ferner war in beiden Standorten eine weitere Antriebskraft des Gastransportes zu beobachten. In gasenden Bereichen fand nicht ausschließlich Diffusion statt, sondern eine verstärkte CO₂-Ausströmung durch Konvektion. Die Resultate wurde durch weitere Untersuchungen bestätigt (Vodnik et al. 2009; Kämpf et al. 2013).

Anhand vergleichender Interpretationen der Kohlendioxidkonzentrationen, mit dem Anteil organischer Festsubstanz, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt in der Birnenmofette, wurden Abhängigkeiten deutlich. Diese wiesen eine Hemmung des Abbaus organischer Bestandteile auf oder ein verringertes Aufkommen organischen Abfalls. In der Moosmofette konnte dieser Zusammenhang ebenfalls dokumentiert werden. Durch weitere Untersuchungen an anderen Mofettenstandorten des Untersuchungsgebietes konnten die Erkenntnisse bestätigt werden (Flehsig et al. 2008; Rennert et al. 2011; Rennert und Pfanz 2015, eingereicht). Des Weiteren bestand in beiden Mofetten eine Wechselbeziehung zwischen dem Gasfluss, den CO₂-Konzentrationen und der Bodendichte. Die Bodenazidität war in beiden Flächen stark fortgeschritten. Diese Ergebnisse sind typisch für das Untersuchungsgebiet und eine indirekte Folge der CO₂-Exhalationen (Heinicke et al. 2009; Rennert et al. 2011; Weinlich 2014).

Insgesamt wurde deutlich, dass sich durch die Komplexität des Drei-Phasen-Systems Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bodeneigenschaften überlagern können.

Für die Untersuchungen der Ausgasungsdynamik war das Untersuchungsgebiet im Plesnátal, das entlang der Počátky Plesná fault zone liegt (Bankwitz et al. 2003), insofern von Vorteil, als dass sich dort in verschiedenen Abständen Schwarmbebenereignisse verzeichnen lassen (Neunhöfer und Hemmann 2005). Diese werden durch geodynamische Prozesse und das Kohlendioxid selbst ausgelöst (Heinicke et al. 2009; Weinlich et al. 2013). Innerhalb des Untersuchungszeitraumes kam es zu mehreren Schwarmbeben unterschiedlicher Stärke, wobei das intensivste im Oktober 2008 festzustellen war (Horálek et al. 2009). Für die Erfassung von Zusammenhängen zwischen den seismischen Aktivitäten und den temporären Exhalationsveränderungen, wurden in der Birnen- und Moosmofette jährliche Bodengasmessungen durchgeführt. In der Birnenmofette kam diese Form der seismischen Aktivität in Veränderungen der Bodengaszusammensetzung zum Ausdruck. Nach den Beben erhöhten sich die Kohlendioxidkonzentrationen aufgrund neu entstandener Diffusionswege (Weinlich et al. 2013). In Zeiten seismischer Ruhe sanken sie wieder. Kurzzeitig erhöhte CO₂-Gehalte, die nicht in Verbindung mit Schwarmbeben standen, konnten mit den Erdzeiten erklärt werden (Weinlich et al. 2013). Die Messungen in der Moosmofette bestätigten die Schlussfolgerungen aus den Birnenmofetten-Daten.

Der Hypothese, ob sich die Jahreszeiten auf die Kohlendioxidausgasungen auswirken, wurde mithilfe vierteljährlicher Gasmessungen in beiden untersuchten Flächen nachgegangen. Für die Auswertung der Kohlendioxidveränderungen wurden die Wetterparameter, Luftdruck, Niederschlagsmenge und Temperatur hinzugezogen. Einzig der Luftdruck und die Temperatur wiesen Variationen zwischen den Messaufenthalten auf. Die Mengen an Niederschlägen waren zu allen Aufnahmezeiträumen sehr konstant. Aus diesem Grund stand die Wechselwirkung zwischen dem Niederschlag und den CO₂-Ausströmungen in beiden Flächen im Hintergrund. Allerdings konnte in beiden Mofetten eine Abhängigkeit der Kohlendioxidausgasungen von dem Luftdruck und der Temperatur nachgewiesen werden. Der Luftdruck als atmosphärischer Gegendruck auf das aufsteigende Kohlendioxid bewirkte eine Verringerung der Ausgasung in den oberen Schichten des Bodens.

In den kalten Jahreszeiten waren die Kohlendioxidkonzentrationen im Boden höher als in den wärmeren. Bei niedrigen Bodentemperaturen löste sich mehr CO₂ im Bodenwasser als bei hohen, wodurch höhere CO₂-Konzentrationen zu verzeichnen waren.

In den Jahreszyklen der Moosmofette wurde eine Verlagerung des Ausgasungsbereiches aus den nördlichen in südliche Transekte festgestellt. Obwohl noch zu klären bliebe, welche

Ursachen diese Verlagerung hatte, war sie für die Auswertung der Moosmofetten-Vegetation von Bedeutung.

In dem zweiten Themenbereich befindet sich der Schwerpunkt mit den Auswirkungen des Kohlendioxids auf die mofettentypische azonale Vegetation. Erhöhte CO₂-Gehalte in der Pedosphäre führen zu hypoxischen bis anoxischen Bedingungen im Wurzelraum der Pflanzen. Dies wirkt sich in der Vegetationszusammensetzung auf Mofettenstandorten aus, aber auch auf die Morphologie, Anatomie und Physiologie der Pflanzen (Selvi und Bettarini 1993; Pfanz et al. 2004; Vodnik et al. 2006; Saßmannshausen 2010). Die floristischen Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich auf die Stärke des pflanzlichen Bewuchses, die Zusammensetzung der positiven und negativen Zeigerarten sowie die mofettovagen Arten und die Vegetationsdynamik.

In der Birnen- und Moosmofette war insgesamt eine starke flächige Pflanzendecke zu verzeichnen, die sich teilweise aus wenigen Arten zusammensetzte. In der Birnenmofette konnte ein optischer und statistischer Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der positiven und negativen Indikatorarten und den CO₂-Exhalationen festgestellt werden. Die mofettophile Pflanzengruppe wuchs überwiegend auf den gasenden Bereichen der Fläche. Konsequenterweise wurden die mofettophoben Zeigerarten auf den nicht-gasenden Stellen vorgefunden. Die mofettovagen Pflanzen hatten ihre Wachstumsschwerpunkte in den Übergangsbereichen zwischen den Ausgasungs- und Kontrollstellen. Die Ergebnisse bestätigen andere Untersuchungen (Greiß 2008; Saßmannshausen 2010). Die Verteilung der Indikatorgruppen innerhalb der Birnenmofette spiegelte sich in der Verbreitung der ihnen zugehörigen Indikatorarten wider.

Die Schlussfolgerungen aus der Birnenmofetten-Vegetation konnten durch die Auswertung der Vegetation in der Moosmofette nicht bestätigt werden. Die Annahme, dass sich die Moosmofette aufgrund der Ausgasungen von anderen Mofetten unterscheidet, zeigte sich bereits bei den Untersuchungen der Bodengase (siehe oben). Zu Beginn der Messungen im Jahr 2009 wurde vermutet, dass die Exhalationen in der Moosmofette zum Erliegen gekommen waren. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, die Rückentwicklung eines Mofettenstandortes zu untersuchen. Wie sich herausstellte, ließen sich in dieser Fläche Veränderungen feststellen. Diese äußerten sich jedoch nicht in einem Verschluss der Diffusionswege für das aufsteigende Kohlendioxid sondern in einer Verschiebung der Exhalationen. In den Jahreszyklen konnte eine Verlagerung der gasenden Bereiche festgestellt werden, die vermuten lässt, dass ein früherer Ausgasungsbereich in der südlichen Hälfte der

Fläche existierte. Zum heutigen Zeitpunkt sind die Ausgasungen im Norden der Moosmofette positioniert.

In den Vegetationsaufnahmen wurde der frühere Ausgasungsbereich durch das Vorkommen der Indikatorgruppen und der mofettovagen Pflanzenarten angezeigt. Die positive Zeigergruppe wuchs in den heutigen Kontrollbereichen, während die Verbreitung der negativen Indikatorarten in den aktuellen Ausgasungen und in den Kontrollflächen stattfand. Durch die Darstellung einzelner mofettophober und mofettovager Pflanzenarten wurde gezeigt, dass sie südliche Aufnahmequadrate meiden. Daraus folgt die Schlussfolgerung, dass, obwohl diese Aufnahmequadrate in den nicht-gasenden Bereichen lagen, sie dennoch, aufgrund der vergangenen Ausgasungen nicht von mofettophoben Zeigerarten bedeckt waren.

Die dokumentierten Resultate führten zugleich zu dem Ergebnis, dass in der Moosmofette noch keine Sukzession der Vegetation stattfand. Durch die Auswertung der Vegetationsdynamik in der Birnenmofette wurde dokumentiert, dass das Reaktionsvermögen der Pflanzen unterschiedlich schnell ist. Die positiven Mofettenzeiger zeigten eine langsamere Reaktion auf Veränderungen der Bodengase als die negativen und die mofettovagen. Vor diesem Hintergrund war es verständlich, dass derzeit keine Änderungen in der Vegetationszusammensetzung der Moosmofette festzustellen waren. Dabei muss weiter berücksichtigt werden, dass die Verlagerung der Exhalationen wiederholt zu messen war. In beiden Mofetten waren ausschließlich Fluktuationen in der Vegetation zu verzeichnen.

Der Schwerpunkt der Messungen in dem Espen-Bestand konzentrierte sich hauptsächlich auf die dendrochronologischen und holzphysikalischen Untersuchungen (Fractometrie). Die fractometrischen Messungen führten zu keinen Zusammenhängen zwischen den Kohlendioxidkonzentrationen und der Festigkeit des Holzes.

Bei der Auswertung der Dendrochronologie stellte sich heraus, dass die Bäume aus der CO₂-Gruppe ein stärkeres Längen- und Dickenwachstum zeigten als die Bäume der Kontrollgruppe. Aufgrund der niedrigen CO₂-Konzentrationen innerhalb der Fläche wird vermutet, dass durch das zusätzliche Kohlendioxid eine Förderung des Wachstums bei den CO₂-Bäumen stattfand (Vejpustková et al. 2015, eingereicht).

5 Ausblick

Mofetten sind als natürliche Kohlendioxidquellen geeignete Standorte für die Untersuchung von kurz- und langzeitigen Auswirkungen des Kohlendioxids auf die Ökosphäre. Der zusätzliche CO₂-Eintrag in die Atmosphäre beeinflusst das Leben aller Organismen, sowohl im Boden als auch auf der Erdoberfläche. Demgegenüber sind die Exhalationen des Kohlendioxids von atmosphärischen Bedingungen (Wetter) und den geologischen sowie pedologischen Gegebenheiten abhängig (Raschi et al. 1997; Etiope und Lombardi 1997; Etiope 1999; Pfanz et al. 2004). Neben vielen anderen Mofettengebieten, beispielsweise in Italien, Afrika oder Nordamerika (Raschi et al. 1997) eignet sich das west-tschechische Mofettengebiet im Plesnátal für dauerhafte Untersuchungen. Von Vorteil sind beispielsweise die Menge an geeigneten Mofettenstandorten, die Stabilität der Ausgasungen sowie die geologischen Rahmenbedingungen.

Die zugrundeliegenden Untersuchungen dieser Arbeit führen zu weiteren Fragestellungen und Hypothesen, so dass eine Fortsetzung der pedologischen und vegetationskundlichen Forschungsarbeiten zu empfehlen ist.

Bezüglich der Auswirkungen des Kohlendioxids auf die Bodeneigenschaften könnten weitere Bodenuntersuchungen durchgeführt werden. Meines Erachtens wären Messungen verschiedener Bodenparameter in tieferen Bodenschichten empfehlenswert, da sie eine exaktere Überprüfung der Wechselwirkungen zwischen dem Anteil der organischen Bodensubstanz, der Kohlendioxidkonzentrationen, der Bodenazidität und des Bodenwassers zuließen. Auch im Unterboden, ab circa -40 cm, kommt es zu organischen Substratanreicherungen durch anfallende Wurzelreste und Verlagerungen von Humusanteilen aus dem Ober- in den Unterboden (Scheffer und Schachtschabel 2010). Probenentnahmen aus tieferen Bodenschichten brächten für die Analysen zwei deutliche Vorteile mit sich: 1) Die Verdünnung der CO₂-Konzentrationen durch mögliche Luftverwirbelungen (Kap. 3.1) in den ersten Zentimetern des Oberbodens würde ausgeschlossen. Dadurch käme dem Mofettengas als Einflussgröße auf den Humusgehalt mehr Bedeutung zu. 2) Die stabileren Bodenwassergehalte des Unterbodens könnten einen weiteren Vorteil darstellen. Die genannten Faktoren, die den Wassergehalt der obersten Bodenschichten beeinflussen (Mückenhausen 1993; Scheffer und Schachtschabel 2010) könnten im Unterboden vernachlässigt werden.

Verschiedenste Untersuchungen im Zusammenhang mit Kohlendioxid haben gezeigt, dass die Streuzersetzung zum Einen von den Pflanzenarten abhängig ist und zum Anderen von den

CO₂-Werten. Es konnte resümiert werden, dass der Anteil der organischen Bodensubstanzen sowie die Konservierung von organischem Material mit steigenden CO₂-Konzentrationen zunimmt (Ross et al. 2002; Kool et al. 2007; Rennert und Pfanz 2015, eingereicht). Diese Resultate verdeutlichen, dass es unter bestimmten Bedingungen zu einer Abhängigkeit zwischen der Humusbildung und den Kohlendioxidgehalten kommen kann. Eventuell ließen sich bei oben den beschriebenen Messungen im Unterboden ähnliche Erkenntnisse dokumentieren.

Die Auswirkungen der seismischen Aktivität auf die gasenden Flächen könnten mithilfe stationärer Kohlendioxidmessungen untersucht werden. Auf diese Weise wären Erkenntnisse über kurzzeitige Auswirkungen seismischer Bewegungen, vor, während und nach den Schwarmbeben auf die Ausgasungen möglich. In Verbindung mit einer stationären Wetterstation könnten zudem weitere Studien zu Abhängigkeiten zwischen den CO₂-Exhalationen und Wetterbedingungen stattfinden. Aus den gleichen Gründen wäre die Fortsetzung der jährlichen und vierteljährlichen Gasmessungen sinnvoll. Diese Untersuchungen wären vor allem für die Forschungstätigkeit in der Moosmofette von Bedeutung, da bislang nicht geklärt werden konnte, unter welchen Bedingungen die Verschiebung des Ausgasungsbereiches stattfindet.

Des Weiteren könnten die Gasflussmessungen in den Flächen erweitert werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Diffusion beispielsweise von der Temperatur und den Druckverhältnissen würden vierteljährliche CO₂-Flussmessungen neue Resultate über den Gastransport im Boden erbringen. Zusätzlich wären vergleichende Flussmessungen mit und ohne Wurzelfilz zu empfehlen. Auf diese Weise könnte der Fragestellung nachgegangen werden, inwieweit die Wurzeln eine Barriere für das aufsteigende Kohlendioxid darstellen.

Hinsichtlich der Vegetation sind neben physiologischen Studien vor allem anatomisch-morphologische Wurzeluntersuchungen empfehlenswert. Wie sich herausgestellt hat, haben viele der mofettentypischen Indikatorarten, aber auch der mofettovagen Pflanzen spezielle Anpassungen der Wurzeln an ihre Standorte. Die meisten mofettophilen Arten weisen verschiedenste Wurzelanpassungen an nährstoffarme, stark saure und mangelhaft durchlüftete Böden auf. Zusätzlich haben die Pflanzen der positiven Indikatorgruppe ein kurzes Wurzelsystem gemeinsam. Die mofettophoben Pflanzen besitzen ebenfalls morphologische Anpassungen der Wurzeln, beispielsweise an Wasser- und Nährstoffüberschuss. Außerdem wachsen sie mit ihren Wurzeln in tiefere Bodenschichten ein. Die mofettovagen Pflanzenarten zeigen oft Wurzelanpassungen an Fäulnis oder Trockenheit (Kutschera und Lichtenegger 1992). Erkenntnisse über die Wurzelanatomie und Morphologie von Mofettenpflanzen

könnten zu neuen Einblicken in das Ausbreitungsverhalten der azonalen Vegetation in Mofetten führen.

Für die Auswirkungen der Ausgasungen auf die Mofettenvegetation sollten in der Birnen- und Moosmofette die regelmäßigen Vegetationsaufnahmen weiterhin fortgeführt werden. In der Moosmofette wäre die Fortsetzung dieser Arbeiten, wegen der Verschiebung des gasenden Bereiches, von besonderer Bedeutung. Die jährlichen Aufnahmen der Vegetation könnten die Beobachtung einer eventuell einsetzenden Sukzession in der Fläche ermöglichen.

Anhand der dendrochronologischen Untersuchungen wurde gezeigt, dass auch Messungen an Gehölzen auf gasenden Stellen einen Einblick in die Auswirkungen des Kohlendioxids ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wären weitere Untersuchungen erforderlich. In diesen könnte die Fragestellung verfolgt werden, ob erhöhte CO₂-Konzentrationen im Wurzelraum von Bäumen den Xylemfluss beeinflussen.

Eine abschließende Empfehlung betrifft die Auswertung der Daten mithilfe der kanonischen Korrespondenzanalyse. Vor der bimodalen Artenauftrennung entlang der Umweltvariablen, wäre eine unimodale Überprüfung der Artenzusammensetzung sinnvoll. Mithilfe einer unimodalen Verteilung erhielte man einen genauen Überblick über die Zusammensetzung der Arten, bezogen auf einen Umweltparameter. Mit diesem Wissen könnte die Auftrennung der Arten in der bimodalen Analyse mit mehreren Umweltvariablen detaillierter betrachtet werden (Leyer und Wesche 2007).

6 Literatur

Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.

Aichele D, Schwegler H-W (1998): Unsere Gräser. Süßgräser, Sauergräser, Binsen. 11. Auflage, Kosmos, Stuttgart.

Ansyco GmbH (2006): Bedienungsanleitung GA 2000/GA 2000 Plus Teil 1/2. Ansyco GmbH, Karlsruhe.

Arbeitskreis Standortkartierung (Hrsg.) (1985): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland, Münster.

Armstrong J, Armstrong W (1991): A convective trough-flow of gases in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Aquatic botany 39, 75-88.

Armstrong J, Armstrong W, Beckett P M (1992): *Phragmites australis*: Venturi- and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation. New Phytologist 120, 197-207.

Armstrong J, Armstrong W, Beckett P M, Halder J E, Lythe S, Holt R, Sinclair A (1996): Pathways of aeration and the mechanisms and beneficial effects of humidity- and Venturi-induced convections in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Aquatic botany 54, 177-197.

Baakes Ch (2009): Pedologische und vegetationskundliche Untersuchungen an der Birnenmofette im westtschechischen Plesnátal. Seismologisch induzierte Veränderungen. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Badiani M, Paolacci A R, D'Annibale A, Miglietta F, Raschi A (1997): Can rising CO₂ alleviate oxidative risk for the plant cell? Testing the hypothesis under natural CO₂ enrichment. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 209-220.

Bahlburg H, Breitzkreuz Ch (2004): Grundlagen der Geologie. 2. Auflage, Spektrum, München.

Baltisberger M, Nyffeler R, Widmer A (1997): Systematische Botanik. Einheimische Farn- und Samenpflanzen. 4. Auflage, vdf Hochschulverlag AG, Zürich.

Bankwitz P, Schneider G, Kämpf H, Bankwitz E (2003): Structural characteristics of epicentral areas in Central Europe: study case Cheb Basin (Czech Republic). Journal of Geodynamics 35, 5-32.

Bettarini I, Miglietta F, Raschi A (1997): Studying morpho-physiological responses of *Scirpus lacustris* from naturally CO₂-enriched environments. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 133-147.

Blume H-P (1997): Reduktosole- eine neue Klasse der deutschen Bodensystematik. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 85, III, 1103-1106.

Blume H-P, Felix-Henningsen P (2009): Reductosols: Natural soils and Technosols under reducing conditions without an aquic moisture regime. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 172, 808-820.

Blume H-P, Stahr K, Leinweber P (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Auflage, Spektrum, München.

Bräuer K, Kämpf H, Niedermann S, Strauch G (2005): Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, Central Europe. Geophysical Research Letters 32, 1-4.

Bräuer K, Kämpf H, Niedermann S, Strauch G, Tesař J (2008): Natural laboratory NW Bohemia: Comprehensive fluid studies between 1992 and 2005 used to geodynamic processes. Geochemistry Geophysics Geosystems 9, 1-30.

Bräuer K, Kämpf H, Strauch G (2009): Earthquake swarms in non-volcanic regions: What fluids have to say. Geophysical Research Letters 36, 1-5.

Bräuer K, Kämpf H, Koch U, Strauch G (2011): Monthly monitoring of gas and isotope compositions in the free gas phase at degassing locations close to the Nový Kostel focal zone in the western Eger Rift, Czech Republic. Chemical Geology 290, 163-176.

Bräuer K, Kämpf H, Strauch G (2014): Seismically triggered anomalies in the isotope signatures of mantle-derived gases detected at degassing sites along two neighboring faults in NW Bohemia, central Europe. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 119, 5613-5632.

Brown T L, Le May H E, Burston B E (2011): Chemie: Studieren kompakt. 10. Auflage, Pearson, München.

Chiodini G, Cioni R, Guidi M, Raco B, Marini L (1997): Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. Applied Geochemistry 13 (5), 543-552.

Conert H J (2000): Pareys Gräserbuch. Die Gräser Deutschlands erkennen und bestimmen. Parey Buchverlag, Berlin.

Cook A C, Oechel W C, Sveinbjornsson B (1997): Using Icelandic CO₂ springs to understand the long-term effects of elevated atmospheric CO₂. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 87-102.

Dierschke H (1994): Pflanzensoziologie. Ulmer, Stuttgart.

Dräger Safety AG & Co. KGaA (2002): Polytron Transmitter IR CO₂, IR N₂O Betriebsanleitung. 2. Ausgabe, Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck.

Düll R, Kutzelnigg H (1994): Botanisch-ökologisches Exkursionstaschenbuch. 5. Auflage, Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

Düll R, Kutzelnigg H (2011): Taschenlexikon der Pflanzen Deutschlands und angrenzender Länder: die häufigsten mitteleuropäischen Arten im Porträt. 7. Auflage, Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

Eijkelkamp Agrisearch Equipment (2012): Penetrologger Gebrauchsanweisung. Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek (NL).

Ellenberg H, Weber H E, Düll R, Wirth V, Werner W (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3. Auflage, Verlag Erich Goltze GmbH & Co KG, Göttingen.

Ellenberg H, Leuschner Ch (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 6. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Etiopie G (1997): Migration in the ground of CO₂ and other volatile contaminants. Theory and survey. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 7-20.

Etiopie G (1999): Subsoil CO₂ and CH₄ and their advective transfer from faulted grassland to the atmosphere. Journal of Geophysical Research 104 (D14), 16,889-16,894.

Etiopie G, Lombardi S (1997): Levels of CO₂ leakage in relation to geology. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 21-33.

Faber E, Horálek J, Boušková A, Teschner M, Koch U, Poggenburg J (2009): Continuous gas monitoring in the West Bohemian earthquake area, Czech Republic: First results. Studia Geophysica et Geodaetica 53, 315-328.

Fang C, Moncrieff J B (2001): The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. Soil Biology & Biochemistry 33, 155-165.

Farrar C D, Sorey M L, Evans W C, Howle J F, Kerr B D, Kennedy B M, King C-Y, Southon J R (1995): Forest-killing diffuse CO₂ emission at Mammoth Mountain as a sign of magmatic unrest. Letters to nature 376, 675-677.

Faust D (2011): Definition und Bodenbildungsfaktoren. In Gebhardt H, Glaser R, Radtke U, Reuber P (Hrsg.). Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. 2. Auflage, Spektrum, München, pp 470-471.

Fischer T, Horálek J (2003): Space-time distribution of earthquake swarms in the principal focal zone of the NW Bohemia/Vogtland seismoactive region: period 1985-2001. Journal of Geodynamics 35, 125-144.

Fischer T, Horálek J (2005): Slip-generated patterns of swarm microearthquakes from West Bohemia/Vogtland (central Europe): Evidence of their triggering mechanism? *Journal of Geophysical Research* 110, 1-14.

Fischer T, Michálek J (2008): Post 2000-Swarm microearthquake activity in the principal focal zone of the West Bohemia/Vogtland: space-time distribution and waveform similarity analysis. *Studia Geophysica et Geodaetica* 52, 493-511.

Fischer T, Horálek J, Hrubcová P, Bräuer K, Kämpf H (2014): Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: a review. *Tectonophysics* 611, 1-27.

Flehsig Ch, Bussert R, Rechner J, Schütze C, Kämpf H (2008): The Hartoušov Mofette Field in the Cheb Basin, Western Eger Rift (Czech Republic): a comparative Geoelectric, Sedimentologic, and Soil Gas Study of a Magmatic Diffuse CO₂-Degassing Structure. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften* 36, 177-193.

Flehsig Ch, Fabig T, Rücker C, Schütze C (2010): Geoelectrical investigations in the Cheb Basin/W-Bohemia: an approach to evaluate the near-surface conductivity structure. *Studia Geophysica et Geodaetica* 54, 443-463.

Fordham M C, Barnes J D, Bettarini I, Griffiths H G, Miglietta F, Raschi A (1997): The impact of elevated CO₂ on the growth of *Agrostis canina* and *Plantago major* adapted to contrasting CO₂ concentrations. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 174-196.

Frank A B, Liebig M A, Hanson J D (2002): Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry* 34, 1235-1241.

Frey W, Lösch R (2010): *Geobotanik. Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit*. 3. Auflage, Spektrum, Heidelberg.

Gaždová R, Novotný O, Málek J, Valenta J, Brož M, Kolínský P (2011): Groundwater Level Variations in the seismically active region of western Bohemia in the Years 2005-2010. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 8 (161), 17-27.

Geissler H W, Kämpf H, Kind R, Bräuer K, Klinge K, Plenefisch Th, Horálek J, Zedník J, Nehybka V (2005): Seismic structure and location of a CO₂ source in the upper mantle of the western Eger (Ohře) Rift, central Europe. *Tectonophysics* 24, 1-23.

Gerlach T M, Doukas M P, Mc Gee K A, Kessler R (1998): Three-year decline of magmatic CO₂ emissions from soils of a Mammoth Mountain tree kill. Horseshoe Lake, CA, 1995-1997. *Geophysical Research Letters* 25 (11), 1947-1950.

Gisi U (1997): *Bodenökologie*. 2. Auflage, Thieme, Stuttgart.

Götz K, Mattheck C (1999): Festigkeitsuntersuchungen an grünen Bäumen mit dem Fractometer III. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Karlsruhe.

Götz K, Bethge K, Mattheck C (2001): Das Fractometer III- Ein feldtaugliches Holzprüfgerät. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Karlsruhe.

Grace J, van Gardingen P R (1997): Sites of naturally elevated carbon dioxide. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 1-6.

Greiß N (2008): Mofetten in Westtschechien. Boden- und vegetationskundliche Charakterisierung von Mofetten im Plesnátal. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Hartge K H, Horn R (2009): Die physikalische Bodenuntersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Hein H, Kunze W (2012): Umweltanalytik mit Spektrometrie und Chromatography: Von der Laborgestaltung bis zur Dateninterpretation. 3. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim.

Heinicke J, Braun T, Burgassi P, Italiano F, Martinelli G (2006): Gas flow anomalies in seismogenic zones in the Upper Tiber Valley, Central Italy. Geophysical Journal International 167, 794-806.

Heinicke J, Fischer T, Gaupp R, Götze J, Koch U, Konietzky H (2009): Hydrothermal alteration as a trigger mechanism for earthquake swarms: the Vogtland/NW Bohemia region as a case study. Geophysical Journal International 178, 1-13.

Hintermaier-Erhard G, Zech W (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Enke, Stuttgart.

Hirner A V, Rehage H, Sulkowski M (2000): Umweltgeochemie. Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Pedosphäre. Steinkopff, Darmstadt.

Hohberg K, Schulz H-J, Balkenhol B, Pilz M, Thomalla A, Russell D, Pfanzen H (2015): Soil faunal communities from mofette fields: Direct and indirect effects of high geogenic carbon dioxide concentration. Soil Biology and Biochemistry, Revision eingereicht.

Horálek J, Šílený J, Fischer T, Slancová A, Boušková A (2000): Scenario of the January 1997 West Bohemia earthquake swarm. Studia Geophysica et Geodaetica 44, 491-512.

Horálek J, Fischer T (2008): Role of crustal fluids in triggering the West Bohemia/Vogtland earthquake swarms: Just what we know (a review). Studia geophysica et Geodaetica 52, 455-478.

Horálek J, Fischer T, Boušková A, Michálek J, Hrubcová P (2009): The West Bohemia 2008-earthquake swarm: when, where, what size and data. Studia Geophysica et Geodaetica 53, 351-358.

Hupfer P, Kuttler W (Hrsg.) (2006): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Auflage, Teubner, Wiesbaden.

IML GmbH: Fractometer III. Gebrauchsanweisung und Gewährleistungsbestimmung. IML GmbH, Wiesloch.

Ineson P, Cotrufo F (1997): Increasing concentrations of atmospheric CO₂ and decomposition processes in forest ecosystems. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 242-267.

Jägers J (2015): Pflanzen an einem Mofettenstandort in West-Tschechien- geogenes CO₂ als Standortfaktor. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Joos K: Zuwachsbohrer. Anleitung und Pflege. IML GmbH, Wiesloch.

Kämpf H, Bräuer K, Schumann J, Hahne K, Strauch G (2013): CO₂ discharge in an active, non-volcanic continental rift area (Czech Republic): Characterisation ($\delta^{13}\text{C}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$) and quantification of diffuse and vent CO₂ emissions. Chemical Geology 339, 193-208.

Kies A, Hengesoch O, Tosheva Z, Raschi A, Pfanz H (2015): Diurnal CO₂-cycles and temperature regimes in a natural CO₂ gas lake. International Journal of Greenhouse Gas Control 37, 142-145.

Klötzli F, Dietl W, Marti K, Schubiger-Bossard C, Walther G-R (2011): Vegetation Europas. Das Offenland im vegetationskundlich-ökologischen Überblick. hep, Bern.

Koch U, Bräuer K, Heinicke J, Kämpf H (2008): The gas flow at mineral springs and mofettes in the Vogtland/NW Bohemia: an enduring long-term increase. Geofluids 8, 274-285.

Köhler W, Schachtel G, Voleske P (2002): Biostatistik. 3. Auflage, Springer, Berlin.

Kölbach E (2008): Ökologische Charakterisierung schlenkenartiger Strukturen in einem Mofettenfeld im Plesnátal. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Kool D M, Chung H, Tate K R, Ross D J, Newton P C D, Six J (2007): Hierarchal saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring. Global Change Biology 13, 1282-1293.

Köster R (2003): Eigennamen im deutschen Wortschatz: Ein Lexikon. 1. Auflage, Gruyter, Berlin.

Kramer H, Akça A (1982): Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.

Kraus H (2008): Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie. Einführung in die Physik der Atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie. Springer, Berlin.

Kuntze H, Roeschmann G, Schwerdtfeger G (1994): Bodenkunde. 5. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Kutschera L (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.

Kutschera L, Lichtenegger E (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen Band 1 Monocotyledonae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

Kutschera L, Lichtenegger E (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen Band 2 Pteridophyta und Dicotyledoneae (Magnoliopsida). Teil 1 Morphologie, Anatomie, Ökologie, Verbreitung, Soziologie, Wirtschaft. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

Larcher W (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Lege T, Kolditz O, Zielke W (1996): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Band 2. Strömungs- und Transportmodellierung. Springer, Berlin.

Leyer I, Wesche K (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. Springer, Berlin.

Lüttge U, Kluge M (2012): Die einführende Biologie der Pflanzen. 6. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim.

Lyr H, Hoffmann G (1992): Wachstum und Umwelt. In Lyr H, Fiedler H J, Tranquillini W (Hrsg.) (1992). Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, pp 397-402.

Maček I, Pfanz H, Francetič V, Batič F, Vodnik D (2005): Root respiration to high CO₂ concentrations in plants from natural CO₂ springs. *Environmental and Experimental Botany* 54, 90-99.

Maček I, Videmšek U, Kastelec D, Stopar D, Vodnik D (2009): Geological CO₂ affects microbial respiration rates in Stavešinci mofette soils. *Acta Biologica Slovenica* 52, 41-48.

Maček I, Kastelec D, Vodnik D (2012): Root colonization with arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein (GRSP) concentration in hypoxic soils from CO₂ springs. *Agricultural and Food Science* 21, 62-71.

Malkovský M (1987): The Mesozoic and Tertiary basins of the Bohemian Massif and their evolution. *Tectonophysics* 137, 31-42.

Martini M (1997): CO₂ emissions in volcanic areas: case histories and hazards. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 34-44.

Matyssek R, Fromm J, Rennenberg H, Roloff A (2010): Biologie der Bäume- von der Zelle zur globalen Ebene. Ulmer, Stuttgart.

Michael Th (2008): Diercke Weltatlas. Westermann, Braunschweig.

Mielnick P C, Dugas W A (2000): Soil CO₂ in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 221-228.

Miglietta F, Raschi A, Bettarini I, Resti R, Selvi F (1993): Natural CO₂-springs in Italy: a resource for examining long-term response of vegetation to rising atmospheric CO₂ concentrations. *Plant Cell and Environment* 16, 873-878

Mitchell A, Wilkinson J (2004): Pareys Buch der Bäume. Nadel- und Laubbäume in Europa nördlich des Mittelmeeres. Kosmos, Stuttgart.

Mousseau M, Enoch Z H, Sabroux J C (1997): Controlled degassing of lakes with high CO₂ content in Cameroon: an opportunity for ecosystems CO₂-enrichment experiments. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 45-55.

Murawski H, Meyer W (2004): Geologisches Wörterbuch. 12. Auflage, Spektrum, Heidelberg.

Mückenhausen E (1993): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. 4. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main.

Müller W (1995): Ökoklimatologie. In Kuttler W (Hrsg.). Handbuch zur Ökologie. 2. Auflage, Analytica, Berlin, pp 225-232.

Neunhöfer H, Meier T (2004): Seismicity in the Vogtland/Western Bohemia earthquake region between 1962 and 1998. *Studia Geophysica et geodaetica* 48, 539-562.

Neunhöfer H, Hemmann A (2005): Earthquake swarms in the Vogtland/Western Bohemia region: Spatial distribution and magnitude-frequency distribution as an indication of the genesis of swarms. *Journal of Geodynamics*, 361-385.

Oppermann B I, Michaelis W, Blumenberg M, Frerichs J, Schulz H M, Schippers A, Beaubien S E, Krüger M (2010): Soil microbial community changes as a result of long-term exposure to a natural CO₂ vent. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 2697-2716.

Otto H-J (1994): Waldökologie. Ulmer, Stuttgart.

Paoletti E, Miglietta F, Raschi A, Manes F, Grossoni P (1997): Stomatal numbers in holm oak (*Quercus ilex* L.) leaves grown in naturally and artificially CO₂-enriched environments. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 197-208.

Pelz A (2010): Vegetationsökologische und pedologische Untersuchungen an einer Sumpfmofette im west-tschechischen Plesnátal. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Pfanz H, Aschan G, Langenfeld-Heyser R, Wittmann Ch, Loose M (2002): Ecology and ecophysiology of tree stems: corticular and wood photosynthesis. *Naturwissenschaften* 89, 147-162.

Pfanz H, Vodnik D, Wittmann Ch, Aschan G, Raschi A (2004): Plants and Geothermal CO₂ Exhalations- Survival in and Adaption to a High CO₂ Environment. *Progress in Botany* 65, 499-538.

- Pfanz H, Vodnik D, Wittmann Ch, Aschan G, Batic F, Turk B, Maček I (2007):** Photosynthetic performance (CO₂-compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas. *Environmental and Experimental Botany* 61, 41-48.
- Pfanz H (2008a):** Mofetten. Kalter Atem schlafender Vulkane. RVDL, Köln.
- Pfanz H (2008b):** Bark photosynthesis. *Trees* 22, 137-138.
- Pichler H, Pichler Th (2007):** Vulkangebiete der Erde. Spektrum, München.
- Pinol J, Terradas J (1997):** Preliminary results on dissolved inorganic ¹³C and ¹⁴C content of a CO₂-rich mineral spring of Catalonia (NE Spain) and of plants growing in its surroundings. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 165-173.
- Pott R, Hüppe J (2007):** Spezielle Geobotanik. Pflanze-Klima-Boden. Springer, Berlin.
- Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997):** *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rennert T, Eusterhues K, Pfanz H, Totsche K U (2011):** Influence of geogenic CO₂ on mineral and organic soil constituents on a mofette site in the NW Czech Republic. *European Journal of Soil Science* 62, 572-580.
- Rennert T, Pfanz H (2015):** Geogenic CO₂ affects stabilization of soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, eingereicht.
- Roloff A (2010):** Bäume. Lexikon der praktischen Baumbiologie. 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim.
- Ross D J, Tate K R, Newton P C, Wilde R H, Clark H (2000):** Carbon and nitrogen pools and mineralization in a grassland gley soil under elevated carbon dioxide at a natural CO₂ spring. *Global Change Biology* 6, 779-790.
- Ross D J, Tate K R, Newton P C D, Clark H (2002):** Decomposability of C₃ and C₄ grass litter sampled under different concentrations of atmospheric carbon dioxide at a natural CO₂ spring. *Plant and Soil* 240, 275-286.
- Rudolf M, Kuhlisch W (2008):** Biostatistik. Eine Einführung für Biowissenschaftler. Pearson Studium, München.
- Saßmannshausen F (2010):** Vegetationsökologische Charakterisierung terrestrischer Mofettenstandorte am Beispiel des west-tschechischen Plesná-Tals. Inaugural-Dissertation am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie der Universität Duisburg-Essen.
- Sauer M, Philippi G (2001):** Hypnaceae, Schlafmoose. In Nebel M, Philippi G (Hrsg.) (2001). *Die Moose Baden-Württembergs. Band 2: Spezieller Teil (Bryophytina II, Schistostegales bis Hypnobryales)*. Ulmer, Stuttgart, pp 513-515.

Scheffer F, Schachtschabel P, Blume H-P (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum, Heidelberg.

Schellmann G (2011): Geologische Grundlagen. In Gebhardt H, Glaser R, Radtke U, Reuber P (Hrsg.). Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. 2. Auflage, Spektrum, München, pp 365.

Schinner F, Öhlinger R, Kandeler E, Margesin R (Hrsg.) (1993): Bodenbiologische Arbeitsmethoden. 2. Auflage. Springer, Berlin.

Schinner F, Sonnleitner R (1996): Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik Band I, Springer, Berlin.

Schmeil O, Fitschen J (2011): Die Flora Deutschlands und der angrenzenden Länder. Ein Buch zum Bestimmen aller wildwachsenden und häufig kultivierten Gefäßpflanzen. 95. Auflage, Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

Schmidt P A, Hecker U (2009): Taschenlexikon der Gehölze. Ein botanisch-ökologischer Exkursionsbegleiter. Quelle und Meyer, Wiebelsheim.

Schulz H-J, Potapov M B (2010): A new species of *Folsomia* from mofette fields of the Northwest Czechia (Collembola, Isotomidae). Zootaxa 2553, 60-64.

Schultz J (2000): Handbuch der Ökozonen. Ulmer, Stuttgart.

Schultz J (2002): Die Ökozonen der Erde. 4. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Schütt P, Schuck H J, Stimm B (Hrsg.) (1992): Lexikon der Baum- und Straucharten. Das Standardwerk der Forstbotanik. Nikol, Hamburg.

Schütze C, Sauer U, Beyer K, Lamert H, Bräuer K, Strauch G, Flechsig Ch, Kämpf H, Dietrich P (2012): Natural analogues: a potential approach for developing reliable monitoring methods to understand subsurface CO₂ migration processes. Environmental Earth Science 67, 411-423.

Selvi F (1994): *Agrostis canina* L. subsp. *monteluccii* Selvi, subsp. nov. (Poaceae). Webbia 49 (1), pp 51-58.

Selvi F (1997): Acidophilic grass communities of CO₂ springs in central Italy: composition, structure and ecology. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs. Cambridge University Press, Cambridge, pp 114-133.

Selvi F, Bettarini I (1999): Geothermal Biotopes in Central-Western Italy from a botanical view point. In Raschi A, Vacceri F P, Miglietta F (Hrsg.). Ecosystem Responses to CO₂: The Maple Project. Office for official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp 1-12.

Smith T M, Smith R L (2009): Ökologie. 6. Auflage, Pearson Studium, München.

Špičák A, Mrlina J, Jindra D, Mervart L (1999): Monitoring of geodynamic activity in the West Bohemia seismoactive region between 1993-1996. *Geodynamics* 27, 119-132.

Špičáková L, Uličný D, Koudelková G (2000): Tectonosedimentary evolution of the Cheb basin (NW Bohemia, Czech Republic) between Late Oligocene and Pliocene: a preliminary note. *Studia geophysica et geodaetica* 44, 556-580.

Strahler A H, Strahler A N (1999): *Physische Geographie*. Ulmer, Stuttgart.

Stubbe K (2002): Wirkungen geogener CO₂-Exhalationen auf Physiologie und Wachstum von *Phacelia tanacetifolia*. Untersuchungen an einem Standort in der Eifel. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Systat Software GmbH: Sigma Plot 11.0 Handbuch Teil 1. Systat Software GmbH, Wuppertal.

Take E S, Massman W J, Brandle J R, Schmidt R A, Zhou X, Litvina I V, Garcia R, Doyle G, Rice C W (2004): Influence of high-frequency ambient pressure pumping on carbon dioxide efflux from soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 193-206.

Tank V, Pfanz H, Gemperlein H, Strobl P (2005): Infrared remotes sensing of earth degassing- ground study. *Annals of Geophysic* 48, 181-194.

ter Braak C J F, Šmilauer P (2002): Canoco Reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power, Ithaca.

Teskey R O, Saveyn A, Steppe K, Mc Guire M A (2008): Origin, fate and significance of CO₂ in tree stems. *New Phytologist* 177, 17-32.

Thomalla A (2009): Pedologische und vegetationskundliche Untersuchungen an der Moosmofette im Mofettengebiet des west-tschechischen Plesnátales. Examensarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Botanik und Vulkanbiologie an der Universität Duisburg-Essen.

Turk B, Pfanz H, Vodnik D, Bernik R (2002): The Effects of Elevated CO₂ on Bog Rush (*Juncus effuses* L.) Growing Near a Natural CO₂ Spring. I. Effects on Shoot Anatomy. *Phyton* 42, 13-23.

Vacek S, Vančura K, Zingari P C, Jeník J, Simon J, Smejkal J (2003): Mountain Forests of the Czech Republic. Forestry Department Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

van Gardingen, P R, Grace J, Jeffree C E, Byari S H, Miglietta F, Raschi A, Bettarini I (1997): Long-term effects of enhanced CO₂ concentrations on leaf gas exchange: research opportunities using CO₂ springs. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 69-86.

Vejpoustková M, Thomalla A, Čihák T, Lomský B, Pfanz H (2015): Different growth rate of aspen trees (*Populus tremula* L.) at the naturally CO₂-enriched mofette site. eingereicht.

Vodnik D, Pfanz H, Wittmann Ch, Maček I, Kastelec D, Turk B, Batič F (2002): Photosynthetic Acclimation in Plants Growing Near a Carbon Dioxide Spring. *Phyton* 42, 239-244.

Vodnik D, Kastelec D, Pfanz H, Maček I, Turk B (2006): Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses. *Geoderma* 133, 309-319.

Vodnik D, Maček I, Videmšek U, Hladnik J (2007): The life of plants under extreme CO₂. *Acta Biologica Slovenica* 50, 31-39.

Vodnik D, Videmšek U, Pintar M, Maček I, Pfanz H (2009): The characteristics of soil CO₂ fluxes at a site with natural CO₂ enrichment. *Geoderma* 159, 32-37.

Vodnik D, Hladnik J, Vrešak M, Eler K (2013): Interspecific variability of plant stomatal response to step changes of [CO₂]. *Environmental and Experimental Botany* 88, 107-112.

Weinlich F H, Bräuer K, Kämpf H, Strauch G, Tesař J, Weise S M (1999): An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger Rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 3653-3671.

Weinlich F H, Faber E, Boušková A, Horálek J, Teschner M, Poggenburg J (2006): Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemia swarm quake region, Czech Republic- A continuous gas monitoring. *Tectonophysics* 421, 89-110.

Weinlich F H, Stejskal V, Teschner M, Poggenburg J (2013): Geodynamic processes in the NW Bohemian swarm earthquake region, Czech Republic, identified by continuous gas monitoring. *Geofluids* 13, 305-330.

Weinlich F H (2014): Carbon dioxide controlled earthquake distribution pattern in the NW Bohemian swarm earthquake region, western Eger Rift, Czech Republic- gas migration in the crystalline basement. *Geofluids* 14, 143-159.

Weise S M, Bräuer K, Kämpf H, Strauch G, Koch U (2001): Transport of mantle volatiles through the crust traced by seismically released fluids: a natural experiment in the earthquake swarm area Vogtland/NW Bohemia, Central Europe. *Tectonophysics* 336, 137-150.

West Systems (2007): Portable diffuse flux meter Carbon dioxide hi-flux Handbook Release 7.0. West Systems, Pisa.

Wittmann Ch, Aschan G, Pfanz H (2001): Leaf and twig photosynthesis of young beech (*Fagus sylvatica* L.) and aspen (*Populus tremula*) trees grown under different light regime. *Basic and Applied Ecology* 2, 145-154.

Woodward F I, Beerling D J (1997): Plant CO₂ responses in the long term. Plants from CO₂ springs in Florida and tombs in Egypt. In Raschi A, Miglietta F, Tognetti R, van Gardingen P R (1997). *Plant Responses to Elevated CO₂. Evidence from Natural Springs*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 103-113.

Ziegler P A (1992): European Cenozoic rift system. *Tectonophysics* 208, 91-111.

Internetquellen

Internetquelle 1

<http://www.ig.cas.cz/en/structure/observatories/west-bohemia-seismic-network-webnet/map-epicenters> (Zugriff am 9.10.2014)

Internetquelle 2

<http://www.geodata.us/weather/> (Zugriff am 27.12.2014)

Internetquelle 3

<https://www.google.de/maps/@50.1337853,12.4688909> (Zugriff am 9.10.2014)

Internetquelle 4

http://www.poh.cz/dotacni_tituly/101_STUDIE_19_DE_FINAL_KOREKTURA.pdf
(Zugriff am 4.2.2015)

Internetquelle 5

<http://marianske-lazne.info/de/daten/> (Zugriff am 4.2.2015)

Internetquelle 6

http://www.wmo.int/pages/themes/climate/causes_of_climate_change.php
(Zugriff am 10.3.2015)

7 Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Einordnung des Mofettenstandortes Hartoušov (a) (grüne Markierung) und Lage der Birnen (B)- und Moosmofette (M), und des Espenwäldchens (E) (b). H=Hartoušov-Wiese (aus Internetquelle 3)..... 31
- Abb. 2:** Ausrichtung des Messrasters nach den Himmelsrichtungen am Beispiel der Birnenmofette. (Der Nordpfeil ist leicht nach links gekippt)..... 32
- Abb. 3:** Die Birnenmofette im Juli 2013. Blickrichtung von Osten nach Westen..... 33
- Abb. 4:** Die Moosmofette im Juli 2013. Blickrichtung von Nordosten nach Nordwesten..... 34
- Abb. 5:** Das Espenwäldchen im März 2011. Blickrichtung von Nordwesten nach Südosten. 35
- Abb. 6:** Ausschnitt aus einer Roh-tabelle, beziehungsweise eines Handzettels, wie er im Feld angefertigt wird, aus der Vegetationsaufnahme von 2011, der Birnenmofette..... 37
- Abb. 7:** Ausschnitt aus der überarbeiteten Roh-tabelle, aus der Vegetationsaufnahme von 2011, der Birnenmofette..... 39
- Abb. 8:** Vergleich von graphischen Darstellungen der CO₂-Konzentration in 10 cm Bodentiefe der Moosmofette gemessen im März 2009, die mit unterschiedlichen Programmen, oder Programmeinstellungen angefertigt wurden. a) Verwendung des Excel-Programms 2007, b) Anfertigung durch Sigma Plot 12.0 mit automatischer Z-Intervall- und Achsenskalierung, sowie voreingestellter Färbung, c) Anfertigung mit Sigma Plot 12.0 mit benutzerdefinierter Z-Intervall- und Achsenskalierung, jedoch voreingestellte Färbung, d) ebenfalls Anfertigung mit Sigma Plot 12.0, alle Einstellungen benutzerdefiniert..... 51
- Abb. 9:** Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 5 der Birnenmofette im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche. 52
- Abb. 10:** CCA-Diagramm eines Moosmofetten-Datensatzes. Der Datensatz enthält alle gefundenen Pflanzenarten mit einer maximalen Wurzellänge von 0 bis 10 cm, sowie alle erhobenen Bodeneigenschaften..... 57
- Abb. 11:** CO₂-Konzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette.60
- Abb. 12:** Vergleich der CO₂-Konzentration [%] (a) und der O₂-Konzentration [%] (b) in 40 cm Bodentiefe der Birnenmofette. 63
- Abb. 13:** Sauerstoffkonzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette..... 64
- Abb. 14:** CO₂- und O₂-Antagonismus in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Birnenmofette. (Datenerhebung März 2009) 66
- Abb. 15:** Vergleich der CO₂- und O₂-Konzentration [%] auf der Erdoberfläche (a) und (b) mit der CO₂- und O₂-Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) und (d) in der Birnenmofette. . 68

Abb. 16: CO ₂ -Fluss [mol CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (a), CO ₂ -Fluss [g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (b) und CO ₂ -Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) in der Birnenmofette.....	69
Abb. 17: Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	74
Abb. 18: Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Birnenmofette. Die Farbgebung ist der Legende zu entnehmen. (Datenerhebung Juni 2014)	77
Abb. 19: Anteil organischer Substanz an der Festphase [%] (a) und Bodenwassergehalt [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.....	79
Abb. 20: Korrelationsanalyse mit dem Bodenwassergehalt [%] und dem Anteil des organischen Materials an den festen Bodenbestandteilen [%] in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm der Birnenmofette.....	80
Abb. 21: Vergleich des Gehaltes der organischen Festsubstanz [%] der Birnenmofette in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm im März 2009 (a) mit Juni 2014 (b).....	82
Abb. 22: Korrelationsanalyse mit dem Bodenwassergehalt [%] und dem Anteil des organischen Materials an den festen Bodenbestandteilen [%] in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm in der Birnenmofette.....	82
Abb. 23: pH-Wert in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] in einer Tiefe von 40 cm (b) in der Birnenmofette.....	84
Abb. 24: Vergleich des pH-Wertes in 7 bis 13 cm Bodentiefe im Juni 2014 (a) mit März 2009 (b) in der Birnenmofette.	85
Abb. 25: Kohlenstoffgehalt [%] (a) und Stickstoffgehalt [%] (b) im Vergleich mit der Menge des organischen Anteils an der Festphase [%] (c) in 7 bis 13 cm Bodentiefe, sowie der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Birnenmofette.	87
Abb. 26: Korrelationsanalysen mit Stickstoffgehalt [%] (a) und dem Kohlenstoffgehalt [%] (b) mit dem Mengenanteil der organischen Festsubstanz, sowie dem Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt [%] des Bodens in einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm der Birnenmofette. .	88
Abb. 27: Durchdringungswiderstand [MPa] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d), sowie CO ₂ -Fluss [mol CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (e) in der Birnenmofette.	91
Abb. 28: Durchdringungswiderstand [MPa] des Bodens in Transekt 5 gemessen von der Erdoberfläche bis in 80 cm Tiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 5 im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche (b) in der Birnenmofette.....	92
Abb. 29: CO ₂ -Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe der Birnenmofette von 2008 bis 2014 a) bis g).....	95
Abb. 30: CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette.....	96
Abb. 31: CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette.....	97
Abb. 32: CO ₂ -Konzentration [%] in 60 cm Bodentiefe von 2008 bis 2014 a) bis g) in der Birnenmofette.....	98

Abb. 33: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe einer konstant gasenden Teilfläche der Birnenmofette, in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	101
Abb. 34: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 5/10 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	103
Abb. 35: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 6/10 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	104
Abb. 36: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 7/9 der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	105
Abb. 37: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014) in Abhängigkeit von den Erdbebenstärken [M_L] von 2007 bis 2014 (aus Internetquelle 1).	108
Abb. 38: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an den Messpunkten 5/10 (a), 6/10 (b) und 7/9 (c) in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014), im Zusammenhang mit den Erdbebenstärken [M_L] von 2007 bis 2014 (aus Internetquelle 1)..	113
Abb. 39: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette.....	116
Abb. 40: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette.....	117
Abb. 41: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette.	118
Abb. 42: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette.....	119
Abb. 43: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette.....	120
Abb. 44: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette.	121
Abb. 45: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette.....	122
Abb. 46: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette.....	123
Abb. 47: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette.	124
Abb. 48: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Birnenmofette.....	125
Abb. 49: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Birnenmofette.....	126
Abb. 50: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Birnenmofette.	127

Abb. 51: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in der stabil gasenden Teilfläche der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	129
Abb. 52: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 5/10 (a), 6/10 (b) und 7/9 (c) der Birnenmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.	132
Abb. 53: Artenzahl (a), Gesamtdeckungsgrad [%] des Pflanzenbewuchses (b) pro Aufnahmequadrat und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c) der Birnenmofette.	137
Abb. 54: Deckungsgrad [%] der positiven Mofettenzeiger (a), der negativen Mofettenzeiger (b) und der mofettovagen Arten (c) pro Aufnahmequadrat, im Vergleich mit der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Birnenmofette.	140
Abb. 55: Deckungsgrad [%] von <i>Calluna vulgaris</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	146
Abb. 56: Deckungsgrad [%] von <i>Festuca ovina</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	148
Abb. 57: Deckungsgrad [%] von <i>Hieracium pilosella</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	150
Abb. 58: Deckungsgrad [%] von <i>Nardus stricta</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	152
Abb. 59: Deckungsgrad [%] von <i>Pleurozium schreberi</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	154
Abb. 60: Deckungsgrad [%] von <i>Agrostis capillaris</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	157
Abb. 61: Deckungsgrad [%] von <i>Anthriscus sylvestris</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	158
Abb. 62: Deckungsgrad [%] von <i>Urtica dioica</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	160
Abb. 63: Deckungsgrad [%] von <i>Veronica chamaedrys</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentrationen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.....	161
Abb. 64: Deckungsgrad [%] von <i>Carex nigra</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	163
Abb. 65: Deckungsgrad [%] von <i>Deschampsia cespitosa</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	165
Abb. 66: Deckungsgrad [%] von <i>Potentilla erecta</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Birnenmofette.	167
Abb. 67: Deckungsgrad [%] von <i>Succisa pratensis</i> pro Aufnahmequadrat (a) und CO ₂ -Konzentrationen [%] in 40 cm Bodentiefe (b), in der Birnenmofette.....	168

Abb. 68: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,504) und monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,186) mit den Bodenvariablen aus einer Bodentiefe von 7 bis 13 cm (Vektorpfeile).	170
Abb. 69: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,446) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,464) und dem pH-Wert in 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeil).	172
Abb. 70: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,569) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,174) und der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (Vektorpfeil).	174
Abb. 71: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,662) und aller monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,478) mit Umweltvariablen aus 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeile).	176
Abb. 72: CCA-Diagramme der Birnenmofettendaten mit Artwerten (Dreiecke) sortiert nach den minimalen Wurzellängen von 0,0-10,0 cm (a) (Eigenwert=0,480), 10,1-20,0 cm (b) (Eigenwert=0,615), 20,1-40,0 cm (c) (Eigenwert=0,434) und >40,1 (d) (Eigenwert=0,700) und mit Umweltvariablen in 7 bis 13 cm Bodentiefe (Vektorpfeile).	179
Abb. 73: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der positiven MofettENZEIGER pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette.	183
Abb. 74: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der negativen MofettENZEIGER pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette.	184
Abb. 75: Jährliche Veränderung des Deckungsgrades [%] der mofettovagen Pflanzenarten pro Aufnahmequadrat von 2008 bis 2014 a) bis f) in der Birnenmofette.	185
Abb. 76: CO ₂ -Konzentration [%] in einer Bodentiefe von 10 bis 60 cm a) bis d) in der Moosmofette.	189
Abb. 77: Vergleich der CO ₂ -Konzentration [%] (a) und der O ₂ -Konzentration [%] (b) in 40 cm Bodentiefe der Moosmofette.	191
Abb. 78: O ₂ -Konzentration [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Moosmofette. .	192
Abb. 79: CO ₂ - und O ₂ -Antagonismus in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) in der Moosmofette.	193
Abb. 80: Vergleich der CO ₂ - und O ₂ -Konzentration [%] auf der Erdoberfläche (a) und (b) mit der CO ₂ - und O ₂ -Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) und (d) in der Birnenmofette.	195
Abb. 81: CO ₂ -Fluss [mol CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (a), CO ₂ -Fluss [g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (b), und CO ₂ -Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe (c) in der Birnenmofette.	196
Abb. 82: Bodenwassergehalt [%] in einer Bodentiefe zwischen 7 und 13 cm (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) in der Moosmofette.	197
Abb. 83: Anteil des organischen Materials [%] an der Bodenzusammensetzung (a) und Bodenwassergehalt [%] (b) in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Moosmofette.	199
Abb. 84: Wechselbeziehung zwischen dem Bodenwassergehalt [%] und dem organischen Bodenanteil [%] in 7 bis 13 cm Bodentiefe der Moosmofette.	200

Abb. 85: pH-Werte in 7 bis 13 cm Bodentiefe (a) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (b) der Moosmofette.	201
Abb. 86: Durchdringungswiderstand [MPa] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d), sowie CO ₂ -Fluss [mol CO ₂ m ⁻² d ⁻¹] (e) in der Birnenmofette.	203
Abb. 87: Durchdringungswiderstand [MPa] des Bodens in Transekt 3 gemessen von der Erdoberfläche bis in 80 cm Tiefe (a) und Kohlendioxidkonzentration [%] im Transekt 3 im Gradienten von 60 cm Bodentiefe bis an die Erdoberfläche (b) in der Moosmofette.....	204
Abb. 88: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 10 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f).....	206
Abb. 89: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f).....	207
Abb. 90: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f).....	208
Abb. 91: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 60 cm Bodentiefe der Moosmofette von 2009 bis 2014 a) bis f).....	209
Abb. 92: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Moosmofette, in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	210
Abb. 93: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 4/7 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	212
Abb. 94: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 1/5 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	213
Abb. 95: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe am Messpunkt 6/6 der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.....	213
Abb. 96: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2008 bis 2014) in Abhängigkeit von den Erdbebenstärken [M _L] von 2008 bis 2014 (aus Internetquelle 1).	215
Abb. 97: Jährliche Veränderung der Kohlendioxidkonzentration [%] an den Messpunkten 1/5 (a), 4/7 (b) und 6/6 (c) in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2008 bis 2014), im Zusammenhang mit den Erdbebenstärken [M _L] von 2008 bis 2014 (aus Internetquelle 1)...	216
Abb. 98: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette.....	219
Abb. 99: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette.....	220
Abb. 100: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 10 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette.....	221
Abb. 101: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette.....	222

Abb. 102: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette.....	224
Abb. 103: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette.....	225
Abb. 104: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette.....	226
Abb. 105: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette.....	227
Abb. 106: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette.....	228
Abb. 107: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2012 bis März 2013 a) bis e) in der Moosmofette.....	229
Abb. 108: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2013 bis März 2014 a) bis e) in der Moosmofette.....	230
Abb. 109: Vierteljährliche Kohlendioxidkonzentration [%] in 60 cm Bodentiefe im Jahreszyklus von März 2014 bis September 2014 a) bis c) in der Moosmofette.....	231
Abb. 110: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in der stabil gasenden Teilfläche der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren.	233
Abb. 111: Kohlendioxidkonzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 1/5 (a), 4/7 (b) und 6/6 (c) der Moosmofette in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterfaktoren. ..	235
Abb. 112: Artenzahlen (a) und Gesamtdeckungsgrad [%] des Pflanzenbestandes (b) pro Aufnahmequadrat und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c) in der Moosmofette.	237
Abb. 113: Deckungsgrad [%] der positiven Mofettenzeiger (a), der negativen Mofettenzeiger (b), sowie der mofettovagen Pflanzenarten (c) und CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Moosmofette.	240
Abb. 114: Deckungsgrad [%] von <i>Calluna vulgaris</i> (a), <i>Festuca ovina</i> (b), <i>Hieracium lachenalii</i> (c) und <i>Pleurozium schreberi</i> (d), im Vergleich mit der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (e), in der Moosmofette.	243
Abb. 115: Deckungsgrad [%] von <i>Agrostis capillaris</i> (a), <i>Elymus repens</i> (b) und <i>Urtica dioica</i> (c), im Vergleich mit der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d) in der Moosmofette.....	245
Abb. 116: Deckungsgrad [%] von <i>Deschampsia cespitosa</i> (a), <i>Potentilla erecta</i> (b) und <i>Succisa pratensis</i> (c), im Vergleich mit der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (d), in der Moosmofette.	246
Abb. 117: CCA-Diagramm des Moosmofettendatensatzes mit Artwerten (Dreiecke) aller dikotylen Arten (a) (Eigenwert=0,558) und monokotylen Arten (b) (Eigenwert=0,588) und Umweltvariablen (Vektorpfeile).	248

Abb. 118: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der positiven Mofettenzeiger von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette.	250
Abb. 119: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der negativen Mofettenzeiger von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette.	251
Abb. 120: Jährliche Veränderungen des Deckungsgrades [%] der mofettovagen Arten von 2009 bis 2014 a) bis f) in der Moosmofette.	252
Abb. 121: Position der nummerierten Bäume innerhalb des Espen-Bestandes in Verbindung mit den gasenden und nicht-gasenden Bereichen der Fläche (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe).	256
Abb. 122: Kohlendioxidkonzentrationen [%] in 10 bis 60 cm Bodentiefe a) bis d) des <i>Populus tremula</i> -Bestandes.	257
Abb. 123: Strahlungsintensität (PAR) [$\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{ m}^{-2}$] auf dem Boden (a) und in 100 cm Höhe (b) im <i>Populus tremula</i> -Bestand.	260
Abb. 124: Artenzahlen (a) und Gesamtdeckungsgrad der Krautschicht (b) pro Aufnahmequadrat in dem <i>Populus tremula</i> -Bestand.	262
Abb. 125: Gesamtdeckungsgrad [%] der mofettovagen Pflanzenarten (a) pro Aufnahmequadrat und CO ₂ -Konzentration [%] in einer Tiefe von 40 cm (b) im Espen-Bestand.	263
Abb. 126: Gesamtdeckungsgrad [%] von <i>Pleurozium schreberi</i> (a), im Vergleich mit den CO ₂ -Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im <i>Populus tremula</i> -Bestand.	265
Abb. 127: Gesamtdeckungsgrad [%] von <i>Agrostis capillaris</i> (a), im Vergleich mit den CO ₂ -Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im <i>Populus tremula</i> -Bestand.	266
Abb. 128: Gesamtdeckungsgrad [%] von <i>Deschampsia cespitosa</i> (a), im Vergleich mit den CO ₂ -Ausgasungen [%] in 40 cm Bodentiefe (b) im <i>Populus tremula</i> -Bestand.	268
Abb. 129: Deckungsgrad [%] von <i>Populus tremula</i> (a) und <i>Quercus robur</i> (b) in der Baumschicht des Espen-Bestandes, im Vergleich mit der CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe (c).	270
Abb. 130: Baumhöhe [m] ausgewählter <i>Populus tremula</i> -Individuen des Espen-Bestandes im CO ₂ -Gradienten (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe).	273
Abb. 131: Längenzuwachs der zehn <i>Populus tremula</i> -Exemplare nach einem CO ₂ -Gradienten (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem Espen-Bestand.	274
Abb. 132: Stammdurchmesser [cm] in circa 140 cm Höhe von 118 Individuen des <i>Populus tremula</i> - Bestandes im CO ₂ -Gradienten (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe).	276
Abb. 133: Ringzuwachs in 140 cm Stammhöhe der zehn <i>Populus tremula</i> -Exemplare nach einem CO ₂ -Gradienten (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem Espen-Bestand.	278
Abb. 134: Anzahl der Lentizellen bei ausgesuchten <i>Populus tremula</i> -Exemplaren nach einem CO ₂ -Gradienten (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe) in dem <i>Populus tremula</i> -Bestand.	279

Abb. 135: Festigkeitskenngrößen der untersuchten <i>Populus tremula</i> -Individuen aus dem Espen-Bestand, eingeordnet in verschiedene CO ₂ -Gruppen (CO ₂ -Konzentration [%] in 40 cm Bodentiefe).....	282
--	-----

7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammensetzung der Luft [%] in der Atmosphäre und im Boden, nach Mückenhausen (1993).....	7
Tab. 2: Durchschnittswerte der Temperatur [°C] (Station Franzensbad) sowie des Niederschlages [mm] (Station Luby) entnommen aus den Aufzeichnungen des Arbeitskreises Standortkartierung (1985).....	18
Tab. 3: Gegenüberstellung der Londo- und der Braun-Blanquet-Skala, nach Dierschke (1994).....	38
Tab. 4: Auflistung der verwendeten Microsoft Office Professional Plus® 2007 Programme und der Bildbearbeitungsprogramme, sowie deren Einsatzbereiche.....	48
Tab. 5: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in einer konstant gasenden Teilfläche der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren.	102
Tab. 6: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe der an den Messstellen 5/10, 6/10 und 7/9 in der Birnenmofette, sowie über verschiedene Wetterfaktoren.	105
Tab. 7: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2007 bis Juni 2014, und jährliche CO ₂ -Konzentration [%] der konstant gasenden Teilfläche in 20 cm Bodentiefe in der Birnenmofette (2008 bis 2014).	107
Tab. 8: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2007 bis Juni 2014 und jährliche Kohlendioxidkonzentration [%] an den Einzelpunkten 5/10, 6/10 und 7/9 in 20 cm Bodentiefe der Birnenmofette (2008 bis 2014).	114
Tab. 9: CO ₂ -Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen.....	130
Tab. 10: CO ₂ -Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe an den Messstellen 5/10, 6/10 und 7/9 in der Birnenmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen.....	133
Tab. 11: Indikatorarten in der Birnenmofette im Aufnahmejahr 2008.....	139
Tab. 12: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] pro Aufnahmequadrat in der Birnenmofette.....	141
Tab. 13: Übersicht über die Zeigerwerte für die positiven Mofettenzeiger in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001).....	143

Tab. 14: Übersicht über die Zeigerwerte für die negativen Mofettenzeiger in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001).....	144
Tab. 15: Übersicht über die Zeigerwerte für verschiedene mofettovage Arten in der Birnenmofette (Ellenberg et al. 2001).....	144
Tab. 16: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Calluna vulgaris</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	147
Tab. 17: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Festuca ovina</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	149
Tab. 18: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Hieracium pilosella</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	150
Tab. 19: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Nardus stricta</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	153
Tab. 20: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Pleurozium schreberi</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	155
Tab. 21: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Agrostis capillaris</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	157
Tab. 22: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Anthriscus sylvestris</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	159
Tab. 23: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Urtica dioica</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	160
Tab. 24: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Veronica chamaedrys</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	162
Tab. 25: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Carex nigra</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	163
Tab. 26: Korrelationskoeffizienten des Deckungsgrades [%] von <i>Deschampsia cespitosa</i> und ausgewählten Bodenparametern in der Birnenmofette.	166
Tab. 27: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe pro Aufnahmequadrat in der Birnenmofette.....	186
Tab. 28: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in 40 cm Bodentiefe pro Aufnahmequadrat in der Birnenmofette.....	187
Tab. 29: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe in einer konstant gasenden Teilfläche der Moosmofette sowie verschiedene Wetterfaktoren.....	211
Tab. 30: Jährliche CO ₂ -Konzentration [%] in 20 cm Bodentiefe an den Messstellen 1/5 , 4/7 und 6/6 in der Moosmofette, sowie über verschiedene Wetterfaktoren.....	214

Tab. 31: Schwarmbebenereignisse im Zeitraum von 2008 bis Juni 2014 (aus Internetquelle 1), und der jährlichen Kohlendioxidkonzentration [%] an den Einzelpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 in 20 cm Bodentiefe der Moosmofette (2008 bis 2014).....	217
Tab. 32: CO ₂ -Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe der gasenden Teilfläche in der Moosmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen.....	233
Tab. 33: CO ₂ -Konzentration [%] der vierteljährlichen Gasmessungen in 20 cm Bodentiefe an den Messpunkten 1/5, 4/7 und 6/6 in der Moosmofette, sowie verschiedene Wetterfaktoren während der jahreszeitlichen Messungen.....	236
Tab. 34: Indikatorarten in der Moosmofette im Aufnahmejahr 2009.	239
Tab. 35: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der drei Pflanzengruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] pro Aufnahmequadrat in der Moosmofette.	241
Tab. 36: Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad [%] der zwei Zeigergruppen und der Kohlendioxidkonzentration [%] in allen Messtiefen in der Moosmofette.....	254
Tab. 37: Anatomische und bodenkundliche Parameter (aus 40 cm Bodentiefe) der gefälltten Bäume aus dem <i>Populus tremula</i> -Bestand für die dendrochronologischen Untersuchungen.	272
Tab. 38: Anatomische und bodenkundliche Parameter (aus 40 cm Bodentiefe) nummerierter Bäume aus dem Espen-Bestand für die Erfassung der Lentizellen.....	280
Tab. 39: Abkürzungen der Pflanzennamen in den CCA-Diagrammen.	316

7.3 Abkürzungsverzeichnisse

7.3.1 Abkürzungsverzeichnis I

A	terrestrischer Oberbodenhorizont
Aa	anmoorig terrestrischer Oberbodenhorizont
Ah	humos terrestrischer Oberbodenhorizont
axDr	axiale Druckfestigkeit
B	Birnenmofette
Bv	verwittert, verbraunt oder verlehmtter Unterbodenhorizont
C	Untergrundhorizont
CA	Korrespondenzanalyse
CCA	Kanonische Korrespondenzanalyse
E	Espenwäldchen
F	Feuchtezahl
Go	Oxidationshorizont
Gr	Reduktionshorizont
H	Hartoušov-Wiese
h₁	Höhe des Scheitels eines Baumes
h₂	Grund eines Baumes
k. A.	keine Angabe
L	Lichtzahl
M	Moosmofette
N	Stickstoffzahl
max.	maximal
M_L	Lokalbebenmagnitude
MLFZ	Mariánské Lázně fault zone
n	Proben,- Stück, oder Aufnahmezahl
NKFZ	Nový Kostel focal zone
O	organischer Horizont
PAR	photosynthetic active radiation
PPZ	Počatky Plesná fault zone
R	Reaktionszahl
RSinFr	radiale Scherfestigkeit in Faserrichtung
r	Bestimmtheitsmaß

r²	Korrelationskoeffizient
T	Temperaturzahl
TSinFr	tangentiale Scherfestigkeit in Faserrichtung
TSsenkFr	tangentiale Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung
x	indifferentes Verhalten der Pflanze gegenüber dem Zeigerwert
Y	durch Reduktgas geprägter Horizont
Yo	oxidierter Y-Horizont
Yr	reduzierter Y-Horizont
~	Pflanze erträgt starke Wechsel des Bodenwassers

7.3.2 Abkürzungsverzeichnis II

Tab. 39: Abkürzungen der Pflanzennamen in den CCA-Diagrammen.

CCA-Abkürzung	wissenschaftlicher Name	deutscher Name
AchiMill	<i>Achillea millefolium</i> L.	Wiesen-Schafgarbe
AgroCapi	<i>Agrostis capillaris</i> L.	Rotes Straußgras
AlchSpec	<i>Alchemilla spec.</i> L.	Frauenmantel
AlopPrat	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	Wiesen-Fuchsschwanzgras
AnthSylv	<i>Anthriscus sylvestris</i> L.	Wiesen-Kerbel
ArrhElat	<i>Arrhenaterum elatius</i> L.	Glatthafer
BetuPend	<i>Betula pendula</i> Roth	Hänge-Birke
BistOffi	<i>Bistorta officinalis</i> L.	Schlangen-Knöterich
CallVulg	<i>Calluna vulgaris</i> L.	Heidekraut
CareHirt	<i>Carex hirta</i> L.	Behaarte Segge
CareOval	<i>Carex ovalis</i> L.	Hasenfuß-Segge
CareNigr	<i>Carex nigra</i> L.	Wiesen-Segge
CirsArve	<i>Cirsium arvense</i> L.	Acker-Kratzdistel
CratMono	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	Eingriffeliger Weißdorn
DescCesp	<i>Deschampsia cespitosa</i> L.	Rasen-Schmiele
DescFlex	<i>Deschampsia flexuosa</i> L.	Geschlängelte Schmiele
ElymRepe	<i>Elymus repens</i> L.	Gewöhnliche Quecke
EpilAngu	<i>Epilobium angustifolium</i> L.	Schmalblättriges Weidenröschen
FestOvin	<i>Festuca ovina</i> L.	Schaf-Schwingel
FestRubr	<i>Festuca rubra</i> L.	Rot-Schwingel
FraxExce	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Gewöhnliche Esche
GaliApar	<i>Galium aparine</i> L.	Klebkraut
GaleTetr	<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	Gewöhnlicher Hohlzahn
GeumUrba	<i>Geum urbanum</i> L.	Echte Nelkenwurz
HeraSpho	<i>Heracleum sphondylium</i> L.	Wiesen-Bärenklau
HierLach	<i>Hieracium lachenalii</i> Sut.	Gewöhnliches Habichtskraut
HierPilo	<i>Hieracium pilosella</i> L.	Mausohr-Habichtskraut

HolcLana	<i>Holcus lanatus</i> L.	Wolliges Honiggras
LinaVulg	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	Gewöhnliches Leinkraut
LotuCorn	<i>Lotus corniculatus</i> L.	Gewöhnlicher Hornklee
LotuPend	<i>Lotus pedunculatus</i> L.	Sumpf-Hornklee
LuzuCamp	<i>Luzula campestris</i> L.	Gewöhnliche Hainsimse
NardStri	<i>Nardus stricta</i> L.	Borstgras
PhalArun	<i>Phalaris arundinacea</i> L.	Rohr-Glanzgras
PoaAngu	<i>Poa angustifolia</i> L.	Schmalblättriges Rispengras
PoaHumi	<i>Poa humilis</i> Ehrh.	Bläuliches Rispengras
PoaTrivi	<i>Poa trivialis</i> L.	Gewöhnliches Rispengras
PopuTrem	<i>Populus tremula</i> L.	Zitter-Pappel
PoteErec	<i>Potentilla erecta</i> L.	Blutwurz
PrunAviu	<i>Prunus avium</i> L.	Süß-Kirsche
PyruPyr	<i>Pyrus pyraeaster</i> L.	Wilder Birnbaum
QuerRobu	<i>Quercus robur</i> L.	Stiel-Eiche
RosaSpec	<i>Rosa spec.</i> L.	Rose
RubuFrut	<i>Rubus fruticosus</i> L.	Echte Brombeere
RubuIdae	<i>Rubus idaeus</i> L.	Himbeere
RubuSpec	<i>Rubus spec.</i> L.	Brombeere (Hybrid)
RumeAcel	<i>Rumex acetosella</i> L.	Kleiner Sauer-Ampfer
RumeAcet	<i>Rumex acetosa</i> L.	Großer Sauer-Ampfer
StelGram	<i>Stellaria graminea</i> L.	Gras-Sternmiere
SuccPrat	<i>Succisa pratensis</i> Moench	Teufelsabbiss
TaraOffi	<i>Taraxacum officinalis</i> Wiggers	Gewöhnlicher Löwenzahn
TrifRepe	<i>Trifolium repens</i> L.	Weiß-Klee
UrtiDioi	<i>Urtica dioica</i> L.	Große Brennnessel
VeroCham	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	Gamander-Ehrenpreis
VeroOffi	<i>Veronica officinalis</i> L.	Wald-Ehrenpreis
ViciCrac	<i>Vicia cracca</i> L.	Vogel-Wicke
ViolCani	<i>Viola canina</i> L.	Hunds-Veilchen

Danksagung

Zum Schluss meiner Doktorarbeit möchte ich mich bei all denjenigen Menschen bedanken die mich beim Anfertigen unterstützt und mir während dieser spannenden Phase meiner akademischen Laufbahn zur Seite gestanden haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herr Prof. Dr. Hardy Pfanz, der mir diesen Weg überhaupt erst aufzeigte und mich zu meiner Promotion ermutigte. Stets stand er mir mit wertvollen Ratschlägen, wissenschaftlichen Anregungen und Geduld zur Seite, und erweiterte dadurch meine Kompetenzen.

Weiterhin danke ich Prof. Dr. D. Vodnik, der sich für die Bewertung meiner Dissertation zur Verfügung stellt.

Auch die Arbeitsgruppe des Lehrstuhls hat mich in vielerlei Hinsicht unterstützt und meine Arbeit positiv beeinflusst.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Christa Kosch, die mir oft in Problemsituationen mit guten Ideen und Ermutigungen weiterhalf, und immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Christiane Wittmann und Sabine Kühr danke ich für gute Vorschläge, die Einweisung in Geräte sowie für die Hilfe bei Messungen.

Außerdem widme ich meinen Dank den damaligen Doktorranden Annika Pelz und Christian Baakes, für ihre Hilfe bei Messungen. Ebenso wertvoll ist mir ihre Freundschaft, durch die sich unsere Aufenthalte in Tschechien harmonisch gestalteten.

Dr. Frank Saßmannshausen gebührt mein Dank für seine Hilfe bei den Vegetationsaufnahmen und anderen Messungen.

Die studentischen Hilfskräfte Alexander Paus, Eva Jenta, Hannah Martin, Holger Zeymer, Jim Sander, Lisann Horn, Markus Becker und Maximilian Becker haben mich durch ihre fleißige Mitarbeit bei Freiland- und Labormessungen unterstützt. Auch ihnen gilt mein Dank.

Abschließend richte ich ein ganz persönliches Dankeschön an meine Eltern, meinen Bruder und meine Freunde. Sie alle unterstützten nicht nur zu jeder Zeit meine wissenschaftliche Arbeit, sondern sie hielten auch meine Launen aus, und hielten mir den Rücken frei. Sie sind mir eine starke seelische Stütze.

Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen ist der Lebenslauf nicht in der Online-Dissertation enthalten

Eidesstattliche Erklärungen

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, gem. § 6 Abs. (2) f) der Promotionsordnung der Fakultäten für Biologie, Chemie und Mathematik zur Erlangung der Dr. rer. nat., dass ich das Arbeitsgebiet, dem das Thema „Boden- und vegetationskundliche Untersuchungen zur Charakterisierung der Ausgasungs- und Vegetationsdynamik zweier trockener Mofetten im west-tschechischen Plesnátal“ zuzuordnen ist, in Forschung und Lehre vertrete und den Antrag von (Annika Thomalla) befürworte und die Betreuung auch im Falle eines Weggangs, wenn nicht wichtige Gründe dem entgegenstehen, weiterführen werde.

Essen, den _____

Unterschrift eines Mitglieds der Universität Duisburg-Essen

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, gem. § 7 Abs. (2) c) + e) der Promotionsordnung der Fakultäten für Biologie, Chemie und Mathematik zur Erlangung des Dr. rer. nat., dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel bedient habe.

Essen, den _____

Unterschrift des/r Doktoranden/in

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, gem. § 7 Abs. (2) d) + f) der Promotionsordnung der Fakultäten für Biologie, Chemie und Mathematik zur Erlangung des Dr. rer. nat., dass ich keine anderen Promotionen bzw. Promotionsversuche in der Vergangenheit durchgeführt habe und dass diese Arbeit von keiner anderen Fakultät/Fachbereich abgelehnt worden ist.

Essen, den _____

Unterschrift des/r Doktoranden/in

