



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Variabilität von Gasflüssen auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen in einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht

Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik

angefertigt am
Institut für Bodenkunde (IfB)
Fachbereich Geowissenschaften
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften (MIN)
Universität Hamburg

vorgelegt von
Jens Heinrich Heseding
Matrikelnummer: 1977684

Hamburg, 27. Februar 2014

Erstgutachterin: Prof. Dr. Carolin Floeter (HAW Hamburg)
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Eva-Maria Pfeiffer (IfB, Universität Hamburg)
Betreuerin: Dr. habil. Julia Gebert (IfB, Universität Hamburg)

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Jens Heinrich Heseding, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keinem anderen Prüfungsamt vorgelegen. Ich stimme der Weitergabe meiner Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken zu.

Hamburg, 27.02.2014

.....

Unterschrift

Danksagung

An erster Stelle gebührt meiner Professorin Dr. **Carolin Floeter** für die wegweisenden und richtungsbestimmenden Schritte meines Studiums und damit auch für die Betreuung dieser Abschlussarbeit als Erstgutachterin der Dank! Die vielen Gespräche mit dir nicht zuletzt über diese Arbeit haben das Interesse an der angewandten Forschung verstärkt. Besonders zum Schluss haben mir deine Kommentare im Hinblick auf die Präzisierung von Sachverhalten weitere Möglichkeiten für den Aufbau von Textpassagen aufgezeigt und sehr geholfen.

Prof. Dr. **Eva-Maria Pfeiffer** gehört der Dank für das Ermöglichen der Abschlussarbeit an ihrem Institut. Eine Betreuung von der ersten Seite des Konzeptes bis zur Abgabe der Abschlussarbeit durch sie und ihre Mitarbeiter und einer sehr guten Ausstattung des Instituts haben das Erstellen einer wissenschaftlichen Arbeit ungemein unterstützt. Auch für das Schreiben des Zweitgutachtens möchte ich ihr danken!

Für sehr gute fachliche Gespräche möchte ich Dr. habil. **Julia Gebert** danken. Du kannst auch noch so komplizierte und verworrene Sachverhalte so darstellen, dass am Ende ein toller roter Faden erkennbar ist. Auch dir möchte ich für die vielen Kommentare und Gespräche, sowohl persönlich als auch digital danken! Besonders möchte ich Dipl. Biol. **Inga Röwer** und Dipl. Geogr. **Christoph Geck** danken! Ihr habt mir viele Tipps für weitergehende Betrachtungsvarianten und handwerkliches Rüstzeug im Bezug zur Datenbearbeitung und –auswertung mit auf den Weg gegeben und mich besonders in den letzten Tagen sehr unterstützt. Statistische Untersuchungen können durch eure Einführung tatsächlich Spaß machen! Auch Dipl. Ing. **Volker Kleinschmidt** steht dem Projekt zu jeder freien Minute mit vollem Einsatz zur Verfügung. Gerade die Datenaufnahme würde ohne dich in vielen Fällen bestimmt nicht so reibungslos verlaufen. Vielen Dank an euch das ihr mich mit in das Projekt aufgenommen habt und mir damit diese Abschlussarbeit ermöglicht habt!

Für die vielen Stunden am Institut, die vielen gemeinsamen Mittagessen und die Gespräche möchte ich mich bei **Cindy Wienke** bedanken, die mir wieder einen klaren Kopf und somit neue Energie zum Bearbeiten der Fragestellungen ermöglicht hat.

Bei dir **Timo Beyer** möchte ich mich für die eigentlich wichtigste Unterstützung in Form von Zeit, Ratschlägen, Ausgleich und allem anderen danken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	VII
Summary	IX
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Grundlagen	5
2.1 Deponiegasproduktion und Methanabbau auf Deponien	5
2.2 Diffusion / Konvektion	6
2.3 Die Kapillarsperre als Gasverteilungsschicht und physikalische Einflussfaktoren auf den Gastransport	7
2.4 Eindringwiderstand des Bodens	8
3. Untersuchungsstandort: Testfelder Deponie Wieringermeer	9
3.1 Instrumentierung	11
4. Material und Methoden	13
4.1 Räumliche Skalenebenen	13
4.2 Datengrundlage	14
4.2.1 Eigene Daten	14
4.2.1.1 Probenahme und Analyse des Bodengases	15
4.2.1.2 Gravimetrische Analyse des Wassergehaltes	15
4.2.2 Fremddaten	16
4.2.2.1 Bodenfeuchte und –temperatur	16
4.2.2.2 Luftdruck- und –temperatur	16
4.2.2.3 Emissionsmessungen	16
4.2.2.4 Ermittlung des Eindringwiderstands	17
4.2.2.5 Zusammensetzung des Deponiegases	17
4.3 Berechnung der Oxidationsleistung	17
4.4 Messstrategie	18

5.	Ergebnisse	19
5.1	Wetterdaten und davon beeinflusste Bodenparameter	19
5.1.1	Wind	22
5.2	Bodeneigenschaften: Eindringwiderstand und Wassergehalte	23
5.3	Gasfracht auf das gesamte Testfeld	27
5.4	Zusammensetzung der Bodengasphase	27
5.5	Variabilität der Gasfracht und Methanoxidationseffizienz	41
6.	Diskussion	51
6.1	Wetterdaten und davon beeinflusste Bodenparameter	51
6.2	Zunahme der Variabilität der Bodengaskonzentrationen mit der Größe der Skalenebene	55
6.3	Inhomogenes Auftreten der Emissionen auf allen Skalenebenen und Zunahme der Variabilität der Methan- und Kohlendioxidemissionen mit der Größe der Skalenebene	57
6.4	Inhomogene räumliche Befruchtung der Methanoxidationsschicht und entsprechender Anstieg der Bodengaskonzentrationen Richtung Oberhang	58
7.	Fazit	61
8.	Ausblick	62
9.	Literaturverzeichnis	63
	Anhang	69
	Anhang I: Ergänzende Materialien zum Ergebnisteil	69
	Anhang II: Ergänzende Abbildungen zum Ergebnisteil	71
	Anhang III: Auswertung der flächenbezogenen Daten mit SAGA-GIS	77
	Anhang IV: Elektronische Daten	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Medemblik in Nordholland	9
Abbildung 3-2:	Deponie Wieringermeer Detaillageplan der Testfelder.....	10
Abbildung 3-3:	Deponie Wieringermeer Testfeld C, Schnitt C-C	11
Abbildung 4-1:	Rasterfeld mit Skalenebenen S1, S2 und S3	13
Abbildung 4-2:	Gaslanzen in Methanoxidationsschicht und Gasinlet in Gasverteilungsschicht, Schematische Darstellung	15
Abbildung 5-1:	Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck Deponie Wieringermeer..	19
Abbildung 5-2:	Temperaturverläufe über die Bodentiefe.....	20
Abbildung 5-3:	Niederschlag und Feuchtigkeitsverlauf über die Bodentiefe	21
Abbildung 5-4:	maximale Windgeschwindigkeiten während der Emissionsmessungen auf Skalenebene S1	22
Abbildung 5-5:	durchschnittliche Windgeschwindigkeiten während der Emissionsmessungen auf Skalenebene S1.	23
Abbildung 5-6:	Verteilung der gravimetrischen Bodenfeuchte auf Skalenebene S1	24
Abbildung 5-7:	Verteilung der Eindringwiderstände sowie der Wassergehalte der Skalenebenen S1, S2 und S3.....	25
Abbildung 5-8:	Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 100 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung)...	29
Abbildung 5-9:	Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 60 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung)...	30
Abbildung 5-10:	Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 25 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung)...	31
Abbildung 5-11:	CH ₄ -, CO ₂ -, O ₂ - und N ₂ -Konzentrationen der Rasterlanzen (Skalenebene S1) der Monate April bis Juli in 100 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung).....	33
Abbildung 5-12:	Variabilität der CH ₄ - und CO ₂ -Gaskonzentrationen der Skalenebenen S1, S2 und S3 im Juli aller drei Tiefen.	34
Abbildung 5-13:	Variabilität der O ₂ - und N ₂ -Gaskonzentrationen der Skalenebenen S1, S2 und S3 im Juli aller drei Tiefen.	35
Abbildung 5-14:	Variabilität der CH ₄ - und CO ₂ -Konzentrationen im Ober- (OH) und Unterhangbereich (UH) auf Skalenebene S1	39
Abbildung 5-15:	Variabilität der O ₂ - und N ₂ -Konzentrationen im Ober- (OH) und Unterhangbereich (UH) auf Skalenebene S1	40
Abbildung 5-16:	Methanfracht, -oxidationseffizienz, -emission und Kohlendioxidemission auf Skalenebene S1	43
Abbildung 5-17:	Methanfracht, -oxidationseffizienz, -emission und Kohlendioxidemission auf Skalenebene S2	48
Abbildung 0-1:	Graticule in SAGA GIS der Skalenebenen S1 und S2.....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Datengrundlage (eigene Daten).....	14
Tabelle 4-2:	Datengrundlage (Fremddaten).....	16
Tabelle 5-1:	Signifikanztest zwischen den Skalenebenen für die Eindringwiderstände und die Bodenfeuchte.....	26
Tabelle 5-2:	Korrelation der Bodenfeuchten und der Eindringwiderstände.....	26
Tabelle 5-3:	Zusammensetzung des Deponiegases	27
Tabelle 5-4:	Legende für Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-11	28
Tabelle 5-5:	Variabilitätskoeffizienten der Gaskonzentrationen im Juli 2013..	35
Tabelle 5-6:	Variabilitätskoeffizienten der Gaskonzentrationen im April 2013..	36
Tabelle 5-7:	Signifikanztests für unterschiedliche Gruppierungen von Testfeldbereichen je Monat für Methankonzentrationen in 100 cm Tiefe auf Skalenebene S1.....	37
Tabelle 5-8:	Signifikanztests für die Gruppierung der Gaskonzentrationen auf Ober- und Unterhang auf Skalenebene S1.	38
Tabelle 5-9:	Legenden für Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17.....	42
Tabelle 5-10:	Signifikanztests für Ober- und Unterhangbereiche für die Methanfracht, -emission, Kohlendioxidemission und Oxidationseffizienz auf Skalenebene S1	46
Tabelle 5-11:	Effektivität des Gesamtprozesses der Methanoxidation.....	47
Tabelle 5-12:	Variabilitätskoeffizienten der Methanfrachten, -emissionen, Kohlendioxidemissionen und Methanoxidationseffizienzen der Skalenebenen S1 und S2	49
Tabelle 0-1:	Rahmenbedingungen für die Interpolation mit SAGA GIS	77

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DIN EN ISO	International festgelegte Norm
EAA	European Environment Agency
FID	Flammenionisationsdetektor
GIS	Geoinformationssystem
GVS	Gasverteilungsschicht
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HSD	Honestly Significant Difference
IFB	Institut für Bodenkunde
IPCC	International Panel on Climate Change
MiMethox	Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten
MOS	Methanoxidationsschicht
PEHD	Polyethylen, High Density
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SD	Standardabweichung
UNEP	United Nations Environment Program
Vk	Variabilitätskoeffizient
WMO	World Meteorological Organization

Zusammenfassung

Methanemissionen aus Deponien stellen eine beeinflussbare Quelle für klimarelevante Gase dar. Die vorliegende Arbeit untersucht im Rahmen des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts MiMethox – „Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten“ Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Stickstoff-Flüsse und Einflussfaktoren auf diese Flüsse in einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht über einen Zeitraum von April bis Juli zur Mithilfe der Entwicklung von optimierten methanoxidierenden Abdeckschichten, der Entwicklung von Monitoring- und Quantifizierungsstrategien und der Bereitstellung der Ergebnisse für die Praxis. Dadurch soll einer Minimierung der anthropogenen Methanemissionen erreicht.

Im Rahmen des Projektes wurde ein nach unten abgedichtetes angelegtes Testfeld von unten durch die Methanoxidationsschicht nach oben mit einer bekannten und steuerbaren Deponiegasfracht aktiv beaufschlagt. Diese Fracht und die im Zusammenhang stehende erfolgte Methanoxidation wurden über Gas-Verhältnisse der Emissionen und der Bodengaskonzentrationen berechnet. Eine Analyse erfolgte nach räumlichen und zeitlichen Aspekten im Rahmen des Untersuchungszeitraumes von April bis Juli 2013.

Die Variabilität der Bodengaskonzentrationen und der Gasemissionen wird auf unterschiedlich großen räumlichen Skalenebenen der Methanoxidationsschicht mit Hilfe einer zunehmenden Anzahl von Bodengaslanzen und Emissionsmessungen untersucht. Eine zunehmende Variabilität mit zunehmender Skalenebenengröße wurde u. a. durch eine Zunahme der Variabilitätskoeffizienten und einem interpolierten Vergleich der Bodengaskonzentrationen entsprochen. Die Bodengaskonzentrationen unterscheiden sich signifikant zwischen Ober- und Unterhang. Die Emissionen treten über das gesamte Testfeld über beide Skalenebenen inhomogen aus. Die bisherigen Untersuchungen zeigen erhöhte Emissionen im Oberhangbereich, woraufhin eine räumlich inhomogene Befruchtung der Methanoxidationsschicht nach den räumlichen Mustern der Bodengaskonzentrationen zum Oberhang hin geprüft und bestätigt wurde. Die Variabilität der Methanfracht und -oxidation ändert sich je untersuchte(m/r) Feld und Skalenebene.

Die räumlichen Muster der Bodengaskonzentrationen und -emissionen variieren zwischen den Messterminen. Das Emissionsverhalten einer Deponie kann nicht anhand von einer einzelnen Messkampagne erfasst werden. Bodeneigenschaften wie der Eindringwiderstand, Bodenfeuchte und -temperatur werden zur Erläuterung der vorliegenden Variabilität mit herangezogen. Ein Zusammenhang konnte aber nicht bestätigt werden.

Um die Gasflüsse in einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht noch besser verstehen zu können, sind im Hinblick auf die Einflüsse Umgebungsparameter weitere Untersuchungen zu empfehlen. Besonders die Kartierung und Verteilung von Eindringwiderständen in die Methanoxidationsschicht und die Verteilung des Wassergehaltes scheinen einen großen Einfluss auf die Verteilung der Gasemissionen und -konzentrationen zu haben.

Summary

Methane emissions from landfills represent a manageable source of greenhouse gases. The present thesis, funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) funded project MiMethox – “Microbial methane oxidation in landfill cover layers ” investigates methane-, carbon dioxide-, oxygen- and nitrogen- flows as well as factors influencing these flows in an methane-oxidizing engineered landfill cover over a period from April to July to help optimizing methane-oxidizing cover layers, the development of monitoring and quantification strategies, and the provision of results for application. This aims at minimizing anthropogenic methane emissions and contributing to the climate protection.

Within the project a downward sealed scale test field was actively applied from below through the methane oxidation layer upwards with a known and controllable landfill gas cargo. This cargo and related methane oxidation were calculated from ratios of the gas and the base gas emissions concentrations. An analysis was carried out with respect to spatial and temporal aspects in the context of the study period from April to July 2013.

The variability of gas concentrations and gas emissions were analyzed at differently large spatial scale levels of the methane oxidation layer by an increasing number of gas lances and emission measurements. An increasing variability with increasing layer size scales has been confirmed through the comparison of the variation coefficients and interpolated pictures of the soil gas concentrations. The soil gas concentrations are significantly different between the upper and lower slope. The emissions occur inhomogeneous over the entire test field over both scale levels. Previous investigations showed increased emissions in the upper slope area. A spatially inhomogeneous cargo of methane to the oxidation layer has been tested and confirmed towards the upper slope. The variability of methane freight and oxidation varies depending the examined field and scale level.

The spatial patterns of soil gas concentrations and emissions vary between the measurement dates. The emission behavior of a landfill cannot be assessed on the basis of a single measurement campaign. Soil properties such as penetration resistance, soil moisture and temperature are used to explain the present variability. However, a relationship could not be confirmed.

In order to better understand gas flows in an engineered methane oxidation landfill cover further investigation to the influences of environmental parameters is recommended. In particular, the analysis and the distribution of penetration resistances in the methane oxidation layer and the distribution of the water content appear to have an effect on the distribution of the gas emissions and the gas concentrations.

1. Einleitung und Zielsetzung

Der Klimawandel sowie die notwendigen Maßnahmen werden derzeit in den Medien und in der Wissenschaft kontrovers, nicht nur lokal, sondern auch global auf höchster Ebene diskutiert. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) oder auch Weltklimarat wurde 1988 von der World Meteorological Organization (WMO) und dem United Nations Environment Program (UNEP) gegründet um u. a. realistische Vermeidungs- oder Anpassungsstrategien gegen den Klimawandel zu formulieren (IPCC 2013). Der Klimawandel ist ein komplexer Vorgang. Neben den Geosystemen der Lithosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und der Biosphäre spielt die Atmosphäre eine große Rolle. Veränderungen der chemischen Zusammensetzung führen dort zu veränderten Stoff- und Energieflüssen wie beispielsweise durch anthropogen emittierte strahlungsaktive Spurengase, die durch ihre Absorption und Emission im langwelligen Spektralbereich maßgeblich den anthropogenen Treibhauseffekt verstärken (Kappas 2009) und somit zum Klimawandel beitragen.

Methan (CH_4) ist neben Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2) und Distickstoffoxid (Lachgas, N_2O) das wichtigste Treibhausgas¹. Charakterisiert werden Treibhausgase mit Hilfe des relativen Treibhauspotentials oder auch Global Warming Potential (GWP) genannt. Bezugsgas für jeden gewählten Zeitraum ist das Kohlendioxid mit einem GWP von eins. Diese Kennzahl berücksichtigt u. a. die Abbaubarkeit und Verweilzeit von Gasen in der Atmosphäre. Besonders die mittlere Verweilzeit von zwölf Jahren sorgt beim Methan für die Klimarelevanz auch von nur geringen emittierten Mengen. Für einen 20-Jahres Zeitraum liegt das GWP für Methan nach dem IPCC-Report bei 72. Eine Auflistung der anthropogenen Quellen aller klimarelevanten Gase werden im IPCC-Report 2013 dargestellt und für Methan neben anderen der Deponie- und Abfallsektor aufgeführt, der global eine Quelle von $67 \text{ Tg CH}_4 \text{ Jahr}^{-1}$ (Detener et al. 2005) bis $90 \text{ Tg CH}_4/\text{Jahr}$ (EPA 2012) darstellt.

Im Grundgesetz sind der Umweltschutz und der Nachhaltigkeitsgedanke als Staatsziel verankert. So steht im Artikel 20 a folgendermaßen geschrieben:

„Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen ...“, Grundgesetz Artikel 20 a (Jarass et al. 2011)

Das Deponieren von Abfällen in früheren Jahren erfolgte ohne vorherige Behandlung, so dass eine Verrottung unter anaeroben Bedingungen u. a. zur Methanbildung führen muss. Um einer unkontrollierten Methanfreisetzung entgegenzuwirken und somit dem Nachhaltigkeitsgedanken zu folgen, ist mittlerweile das Absaugen und Verwenden des

¹ Die mittlere Temperatur eines Körpers ergibt sich aus seinem Strahlungsgleichgewicht. Auf der Erde greifen einige Gase in der Atmosphäre in dieses Strahlungsgleichgewicht ein, indem sie beispielsweise die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung. Solche Gase werden häufig Treibhausgase genannt. Zusätzlich verstärkt wird dieser „Treibhauseffekt“ durch weitere Vorkommnisse die in Gebert (2012) kurz erläutert werden.

Deponiegases gängige Praxis. Allerdings handelt es sich hier derzeit auch um eine Praxis mit wirtschaftlichem Hintergrund. So kommt es nur so lange zu einer Absaugung des Deponiegases, wie ausreichende Mengen zum Betrieb von Gasmotoren bzw. -turbinen produziert werden. Werden diese Mengen nicht mehr erreicht, wird die kontrollierte Gasfassung beendet und es kommt zu einer Methanfreisetzung über die gesamte Fläche über präferenzielle Fließwege der abgedeckten Deponie. Präferenzielle Fließwege können zur Entstehung von Hotspots, d. h. Bereiche, in der Deponieabdeckschicht über die Deponiegas in konzentrierter Form austritt, führen. Möglichkeiten zur Verminderung von Restemissionen werden durch die mikrobielle Methanoxidation in Deponieabdeckschichten, Methanoxidationsfenstern oder -filtern gegeben. (Scheutz et al. 2009) geben hier eine detaillierte Übersicht.

Um eine Minimierung der anthropogenen Methanemissionen zu erreichen verfolgt das vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt MiMethox – „Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten“ seit Januar 2007 nach Gebert et al. (2012b) drei übergeordnete Ziele: die Entwicklung von optimierten methanoxidierenden Abdeckschichten, die Entwicklung von Monitoring- und Quantifizierungsstrategien und die Bereitstellung der Ergebnisse für die Praxis. Das Projekt leistet damit einen Beitrag zum nationalen und auch evtl. zum internationalen Klimaschutzprogramm. Das Institut für Bodenkunde (IfB) der Universität Hamburg befasst sich unter anderem mit dem Teilprojekt 1: der Prozessanalyse der Methanoxidation und der Analyse der Rekultivierungsschicht, in dessen Rahmen auch diese Bachelorarbeit erstellt wurde. Dazu wurden vom IfB auf mehreren Deponien langfristige Untersuchungen zur Erfassung der Methanfreisetzung und des Methanoxidationsvermögens der Deponieabdeckschichten durchgeführt. Auf einer Deponie in den Niederlanden wurde für die Untersuchungen der Methanoxidationsleistung von Deponieabdeckschichten und ihrer Einflussfaktoren ein Testfeld angelegt, das von unten nach oben durch die Methanoxidationsschicht (MOS) mit einer bekannten und steuerbaren Deponiegasfracht beaufschlagt wird. Die bisherigen Untersuchungen zeigten, dass es trotz des gezielt homogenen Aufbaus des Testfeldes zur Entstehung präferenzierter Fließwege und damit zu einer räumlichen Heterogenität der Gasflüsse kam (Geck 2011). Vor diesem Hintergrund war Ziel der vorliegenden Arbeit die räumliche Heterogenität der Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Stickstoff-Flüsse in einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht über einen Zeitraum von April bis Juli auf dem Testfeld zu spezifizieren und auf mögliche Einflussfaktoren hin zu untersuchen. Hierzu wurde das Testfeld zur Aufnahme der Gaskonzentrationen mit Gaslanzen in verschiedenen Tiefen ausgestattet und mittels Haubenmessungen die Methan- und Kohlendioxidemissionen aufgenommen. Neben der rastermäßigen Einteilung des gesamten Testfeldes (Skalenebene S1: Fläche: 510 m², Breite: 17 m) wurde ein Rasterfeld der Skalenebene S1 durch ein weiteres Raster (Skalenebene S2: 4,2 m x 4,2 m) verfeinert. Die Skalenebene S3 (1,05 m x 1,05 m) verfeinert wiederum ein Rasterfeld der Skalenebene S2. Physikalische Einflussfaktoren des Wetters und davon abhängige Parameter wie beispielsweise der Lufttemperatur und der davon abhängigen Bodentemperatur sollen auf eine mögliche

Beeinflussung auf die Methanoxidation, -konzentration bzw. -emission untersucht werden. Neben der Lufttemperatur und der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen werden die Bodenfeuchte, die relative Luftfeuchtigkeit und der –druck und während der Emissionsmessungen vorherrschende Windverhältnisse parallel zu den Emissionsmessungen und der Analyse der Bodengaszusammensetzung bestimmt bzw. aufgenommen. Einmalig wurde der Eindringwiderstand in der als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponieabdeckschicht bestimmt.

Hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Bodengaskonzentrationen und Gasflüsse durch die Abdeckschicht wurden die folgenden Hypothesen geprüft:

Hypothese 1 zur Variabilität der Bodengaskonzentrationen auf unterschiedlichen räumlichen Skalenebenen der Methanoxidationsschicht:

Die Variabilität der Bodengaskonzentrationen nimmt mit der Größe der Skalenebene zu.

Hintergrund: In einem Raster mit Gitterweiten von 4,2 m (Skalenebene S1) zeigen die bisherigen Untersuchungen eine hohe räumliche Variabilität der Konzentrationen der Deponiegaskomponenten Methan und Kohlendioxid in der Bodenluft. Um die räumliche Verteilung der Gaskonzentrationen auf kleinerer Skalenebene zu untersuchen, wurde ein Quadrat des Gitters in zwei kleinere Subraster aufgeteilt (Skalenebenen S2 und S3). Damit wurde eine höhere Auflösung aller untersuchten Parameter erzielt.

Hypothese 2 zur Variabilität der Gasemissionen auf unterschiedlichen räumlichen Skalenebenen der Methanoxidationsschicht:

Emissionen treten auf allen Skalenebenen inhomogen aus dem Oberboden aus. Die Variabilität der mittels Haubenmessung auf der Skalenebene S1 gemessenen Methan- und Kohlendioxidemissionen ist größer als diejenige auf der Skalenebene S2.

Hintergrund: In einem Raster mit einer Gitterweite von 4,2 m (Skalenebene S1) zeigen die bisherigen Untersuchungen eine hohe räumliche Variabilität der Emissionen von Methan und Kohlendioxid. Um die räumliche Verteilung der Emissionen auf kleinerer Skalenebene zu untersuchen, wurde ein Quadrat des Gitters in zwei kleinere Subraster aufgeteilt (Skalenebene S2). Damit wurde eine höhere Auflösung aller untersuchten Parameter erzielt.

Hypothese 3 zur räumlichen Befruchtung der Methanoxidationsschicht:

Die Befruchtung der Methanoxidationsschicht ist räumlich inhomogen und steigt entsprechend der räumlichen Muster der Bodengaskonzentrationen zum Oberhang hin an.

Hintergrund: Eine hohe räumliche Variabilität der Konzentrationen der Deponiegaskomponenten Methan und Kohlendioxid in der Bodenluft in den Gaslanzen am Oberhang lassen auf eine unterschiedliche Verteilung der Deponiegasfracht auf das Testfeld schließen. Aufgrund einer höheren Befruchtung im Oberhangbereich sind hier ebenfalls die Emissionen erhöht. Die Fracht im Oberhangbereich übersteigt die

Methanoxidationskapazität, da der gegenüber anderer Bereiche erhöhte Gasfluss die Tiefe der Belüftung der Methanoxidationsschicht herabsetzt. Über die Bilanzierung des Kohlenstoffs aus Methan und Kohlendioxid in Emissionen und Bodengaskonzentrationen kann die Befruchtung und die Oxidationsrate berechnet werden. Die Belüftungstiefe kann mit Hilfe der Stickstoffkonzentrationen bestimmt werden. Da Stickstoff in der Abdeckschicht nicht umgesetzt wird, zeigen höhere Stickstoffkonzentrationen eine bessere Durchlüftung als niedrigere Stickstoffkonzentrationen an.

2. Grundlagen

2.1 Deponiegasproduktion und Methanabbau auf Deponien

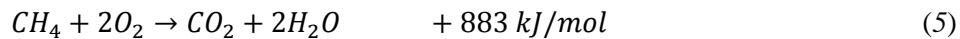
Deponiegas, nach Butz (2006) bestehend aus 40 bis 60 % Methan, ist ein Gemisch aus vielen verschiedenen flüchtigen organischen Komponenten. Neben Methan kommen Stickstoff und Kohlendioxid in einem Verhältnis ($\text{CH}_4:\text{CO}_2$) nach Gebert (2012) von 1,2 bis 1,5 vor. Eine genauere Auflistung aller Deponiegasinhaltstoffe gab bereits Janson (1988). Zur Bildung von Methan im Deponiekörper kommt es, sobald die chemisch-biologischen Abbauprozesse von Organik haltigem Material anaerob verlaufen. Voraussetzung hierfür ist die vorherige Verstoffwechslung der bei Deponieerstellung mit eingeschlossener Menge an Sauerstoff mit dem organischen Material zu Kohlendioxid und Wasser und ein Verhindern von nachströmendem Sauerstoff. Organische Anteile werden schließlich über vier Stufen u. a. zu Methan und Kohlendioxid vergärt, Formel (1) bis (4). Komplexe organische Verbindungen wie Kohlenhydrate, Eiweiße und Fette werden zu einfachen Molekülen wie Zuckern (z. B. Glucose als Edukt in Formel (1)) hydrolysiert. In der acidogenen Phase werden diese zu organischen Säuren und Alkoholen verstoffwechselt um anschließend in der acetogenen Phase über Essigsäure (Formel (2)) bzw. Acetat und in der Methanogenese zu Methan und Kohlendioxid verstoffwechselt zu werden, Formel (3) und (4).



Formel (1) beschreibt den aeroben Abbau, Formeln (2) bis (4) den anaeroben Abbau von Glucose. Der Schritt der katalytischen Hydrolyse wird nicht mit aufgezeigt.

Die Menge des produzierten Deponiegases hängt von vielen Faktoren, wie beispielsweise der Abbaubarkeit der organischen Substanz des deponierten Gutes, dem Wassergehalt oder dem Vorhandensein von wachstumshemmenden Schadstoffen für die Methanbakterien, ab. So wirken sich nach Rettenberger et al. (1992) beispielsweise die Schwermetalle Quecksilber (Hg) und Cadmium (Cd) in gelöster Form hemmend auf die Methangärung aus. Aber auch die Zeit seit Ablagerungsbeginn spielt eine wichtige Rolle. Das Maximum der Deponiegasproduktion erfolgt nach VDI 3790 etwa ein halbes bis drei Jahre nach Ablagerungsbeginn. Während dieses Zeitraumes sind Sauerstoff und Stickstoff nur in Spuren enthalten. Sobald die Methanbildung einen für den Betreiber unwirtschaftlichen Wert unterschreitet, kommt es zu einer Beendigung der aktiven Entgasung und somit häufig zur unkontrollierten Methanfreisetzung über die gesamte Fläche der Deponie oder über präferenzielle Fließwege. Die unkontrollierte Methanfreisetzung aus bereits still gelegten oder noch still zu legenden Deponien birgt ein großes und vermeidbares klimaschädliches Potential.

Methan wird auf einer Deponie nicht nur gebildet, sondern kann auch von ubiquitär vorkommenden methanotrophen Bakterien in Gegenwart von Sauerstoff sowohl im Deponiekörper selbst als auch innerhalb der Deponie-Abdeckschicht abgebaut werden. Die Reaktion (Formel (5)) kann wie folgt zusammengefasst werden:



Für die Oxidation eines Moleküls Methan sind zwei Moleküle Sauerstoff notwendig, woraus ein Molekül Kohlendioxid und zwei Moleküle Wasser resultieren. Die ganze Reaktion ist exotherm. Gase nehmen nach dem Satz von Avogadro bei gleichen Bedingungen gleiche Volumina ein, woraus ein Nachströmen von Luftsauerstoff auch in größere Tiefen der Abdeckschicht resultieren kann. Der Methanoxidationsphase folgen noch die Kohlendioxidphase und die Luftphase in der die Konzentrationen von Sauerstoff und Stickstoff die der Umgebungsluft entsprechen.

Die mikrobielle Methanoxidation führt zur verminderten Methanfreisetzung und kann gezielt in Methanoxidationsschichten, Methanoxidationsfiltern oder –fenstern optimiert werden. Sie ist wie alle biochemischen Reaktionen von vielen Faktoren beeinflussbar. Die Temperatur und der Wassergehalt können wie auch der pH-Wert und andere chemische Parameter direkt auf die Stoffwechselprozesse von Mikroorganismen einwirken. Detailliertere und weiterführende Informationen finden sich unter „Mikrobielle Methanoxidation“ in Gebert (2012).

Die Zusammensetzung des Deponiegases in der Deponieabdeckschicht kann neben der Methanoxidation noch durch Verdünnung durch aktiven Lufteintritt und Bodenatmung verändert werden. Das $CH_4:CO_2$ -Verhältnis wird allerdings nicht durch eine Verdünnung beeinflusst, wohingegen sich die Konzentration mit abnehmender Bodentiefe in Richtung Umgebungskonzentrationen ändert. Die Bodenatmung greift in das $O_2:CO_2$ -Verhältnis ein. Die Kohlendioxidkonzentration nimmt zu, die Sauerstoffkonzentration hingegen ab. Methan und Stickstoff bleiben unverändert. Die Mechanismen des Gastransports (Diffusion und Konvektion) werden näher unter Punkt 2.2 erläutert.

2.2 Diffusion / Konvektion

Die Bewegung des aktiv in die Methanoxidationsschicht eingebrachten Deponiegases erfolgt nach Gröngröft et al. (2012) und Scheffer et al. (2010) insbesondere durch zwei Prozesse: einer Konvektion und einer Diffusion. Zu einem konvektiven Gastransport kommt es infolge von Luftdruckschwankungen oder einer Volumenänderung der Gase infolge von Temperaturänderungen. Sowohl auf bewachsenen als auch auf unbewachsenen Bodenoberflächen kann es durch Windturbulenzen zusätzlich zu einer konvektiven Gasbewegung kommen, die aber auf unbewachsenen Bodenoberflächen stärker ausfallen würde. Die Wirkung hängt von der Permeabilität der oberflächennahen Bodenschichten ab. Weiter kann es zu konvektiven Bewegungen aufgrund von eindringendem Niederschlagswasser kommen. Kapillarkräfte sorgen für ein Verdrängen von Luft aus den jeweils engsten Poren. Die Luft sammelt sich in den weiteren Poren an.

Von größerer Bedeutung ist nach Scheffer et al. (2010) in der Regel jedoch die Diffusion als ausgleichende Bewegung, da sie keiner Druckgradienten innerhalb der gesamten Gasphase bedarf. Allerdings führt die Konvektion ebenfalls nach Scheffer et al. (2010) zu größeren Verlagerungen als die Diffusion alleine. Als ausschließliche Ursachen können der Partialdruck- und damit die Konzentrationsgradienten genannt werden. Sowohl bei dem diffusiven als auch bei dem konvektiven Gastransport kommt es zu einer starken Beeinflussung durch die Verteilung des Wassers im Porenraum.

Mathematisch beschrieben werden kann die Konvektion oder auch Druckdurchströmung einer Methanoxidationsschicht mit Hilfe der *Carman-Kozeny*-Gleichung (6) für laminaren Schüttungsdurchströmungen:

$$\dot{V}_L = \frac{\Delta p_{lam} \cdot A}{\mu} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{d_p^2}{H \cdot K} \quad (6)$$

Eine Übertragung auf die Druckdurchströmung von Deponiekörpern bzw. der Methanoxidationsschicht zeigt Einflussfaktoren, die für die Durchströmung maßgeblich verantwortlich sind. Der Volumenstrom \dot{V}_L wird demnach durch die anliegende Druckdifferenz Δp_{lam} , die Anströmfläche A , die Porosität (entspricht dem Leerraum) ε , die Fluidviskosität μ , den Partikeldurchmesser d_p und die Höhe H bestimmt. K entspricht einem Beiwert, der nach Müller (2008) messtechnisch für eine gegebene Schüttung bestimmt werden muss.

Durch eine Bodenverdichtung oder einen veränderlichen Wassergehalt ändert sich maßgeblich der Parameter der Porosität und damit der Gaspermeabilität.

2.3 Die Kapillarsperre als Gasverteilungsschicht und physikalische Einflussfaktoren auf den Gastransport

Ein maximaler Wirkungsgrad von Methanoxidationssystemen kann oft nur erreicht werden, wenn Methan und Sauerstoff in der Fläche gleichmäßig zur Verfügung stehen. Um eine gleichmäßige Gasverteilung in der Methanoxidationsschicht zu erreichen, muss das sich bildende (in diesem Fall durch aktive Begasung an sechs Einlasspunkten eingebrachte) Deponiegas über die gesamte horizontale Fläche des Testfeldes homogen verteilt werden. Hierfür dient eine die Methanoxidationsschicht unterlagernde Gasverteilungsschicht (GVS). Zur Verwendung kommt im Fall des untersuchten Testfeldes eine Kapillarsperre, ein Zweischichtsystem bestehend aus einer Kapillarschicht (feinkörnige Schicht) über einem Kapillarblock (grobkörnige Schicht), die üblicherweise gebaut werden, um ein Eindringen von Sickerwasser in den Deponiekörper zu verhindern. Für das Testfeld wurden die Materialien Sand und Kies gewählt. Die hydraulische Wirkung der Kapillarsperre beruht nach LAGA (2010) auf einem Sprung in der Porengrößenverteilung an der Schichtgrenze von feinem und grobem Material und der unterschiedlichen Wassersättigung der Materialien. Eine Sperrwirkung wird dadurch erzielt, dass bei ungesättigten Verhältnissen in dem feinkörnigeren Material eine deutlich höhere hydraulische Leitfähigkeit als im grobkörnigeren Material vorliegt.

Die Gaspermeabilität der Gasverteilungsschicht sollte so viel höher als die der Methanoxidationsschicht sein, dass sich das Gas bevorzugt in der Horizontalen ausbreitet

bevor es die Methanoxidationsschicht von unten nach oben durchströmt. Faktoren, die die Eigenschaften der Gaspermeabilität der Gasverteilungsschicht und / oder der Methanoxidationsschicht beeinflussen, sind beispielsweise die saisonal bedingte Bodenfeuchte oder die Ansammlung von Sickerwasser, die zur verminderten Gaspermeabilität der Gasverteilungsschicht führen kann und somit für eine ungleichmäßige Durchströmung der Methanoxidationsschicht verantwortlich sein können.

Materialien die zur biologischen Gasbehandlung eingesetzt werden können und für eine optimale Leistungsfähigkeit sorgen, werden in Gebert et al. (2012a) ausführlich beschrieben.

2.4 Eindringwiderstand des Bodens

Maßgeblich beeinflusst werden Gasaustausch- und Verteilungsprozesse von der Beschaffenheit des zu durchströmenden Körpers. Der Eindringwiderstand des Bodens ist der Widerstand des Bodens gegen Penetrationskräfte; ein Maß für die Verdichtung aber auch die Tragfähigkeit des Bodens. Eine hohe Verdichtung kann die für die Methanoxidation wichtige Sauerstoffdiffusion in tiefere Schichten der Methanoxidationsschicht beeinträchtigen. Sie beeinträchtigt aber auch die Durchwurzelbarkeit des Bodens und die Sauerstoffversorgung der Wurzeln. Der Eindringwiderstand wird gemessen in Kraft pro Oberflächeneinheit (Einheiten $[N/m^2]$ oder $[MPa]$). Einflussfaktoren auf den Eindringwiderstand sind Bodeneigenschaften wie der Bodendichte, dem Feuchtigkeitsgehalt, der Bodenstruktur, der Bodentextur und dem Gehalt an organischen Inhaltsstoffen. Je höher der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens zum Beispiel ist, desto geringer ist bei gleicher Textur und gleicher Trockenrohddichte der Eindringwiderstand (Dexter et al. 2007).

3. Untersuchungsstandort: Testfelder Deponie Wieringermeer

Standort für das Testfeld ist die Deponie des Betreibers Afvalzorg in Medemblik, Nordholland. Medemblik liegt direkt am IJsselmeer, ca. auf der Höhe von Cloppenburg oder Vechta in Niedersachsen, südlich von Bremen, ca. 30 km von der Küste Hollands zur Nordsee entfernt.



Abbildung 3-1: Medemblik (Punkt A) in Nordholland. Quelle: google maps, Abruf am 04.02.2014 um 19:35 Uhr.

Um die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Bauweisen der Methanoxidationsschichten und die Wirksamkeit unterschiedlicher Gasverteilungsschichten zu überprüfen wurden insgesamt zwei Testfelder die in Abbildung 3-2 mit „C“ und „G“ dargestellt werden, erstellt. Testfeld G wurde nach herkömmlicher Bauvariante mit einer Dränmatte („gasverdeellaag“) ausgestattet und im Vergleich zum Testfeld C („capillaire barrière“) stärker verdichtet eingebaut. Das Testfeld G wurde für diese Arbeit nicht berücksichtigt.

Für den Bau des Testfeldes C wurde ein neues System, eine Kapillarsperre zur Wasserfassung bzw. Gasverteilung im Kapillarblock eingebaut. Die Kapillarsperre setzt sich aus dem Kapillarblock (20 cm Kies, 2 – 8 mm) und der Kapillarschicht (30 cm Sand, 1 – 2 mm) zusammen. Weitere Einzelheiten zur Gasverteilung wurden bereits im Kapitel „Grundlagen“ erläutert.

Die Methanoxidationsschicht besteht aus einem bei Einbau 90 cm mächtigen Unterbodens (KA5: St2 schwach toniger Sand) und einem bei Einbau 20 cm mächtigen Oberboden (KA5: Sl4 – Slu stark lehmiger Sand – schluffig lehmiger Sand), bewachsen mit einer Gras-Kraut-Vegetation. Langfristig soll die Methanoxidationsschicht eine Mächtigkeit von mindestens 1 m betragen. Die Gras-Kraut-Vegetation variiert je nach Position auf dem Testfeld und Jahreszeit von Brennesseln, Süßgräser, scharfen Hahnenfuß; jeweils mit lückenfüllenden Gräsern und anderen Pflanzen in geringerer Anzahl. Bei der Lagerungsdichte wurde ein Wert von 1,34 g/cm³ erreicht, die Luftkapazität liegt bei 20 Vol.-% (Geck et al. 2012). Als Anforderung für das Unterbodenmaterial galt die regionale Verfügbarkeit eines gewachsenen Bodens, die nach Steinert et al. (2012) mit der Verwendung der geprüften Materialien der Deponie Nauerna mit der Bezeichnung „NAU 6261“ und „NAU 6146“ in einem

3. Untersuchungsstandort: Testfelder Deponie Wieringermeer

Mischungsverhältnis von 1:3 umgesetzt wurde. Als Oberboden wurde der abgeschobene Boden wieder verwendet. Die Testfeldgröße beträgt jeweils 510 m². Die Fläche des gesamten Bereiches ist durch Randzonen etwas größer.

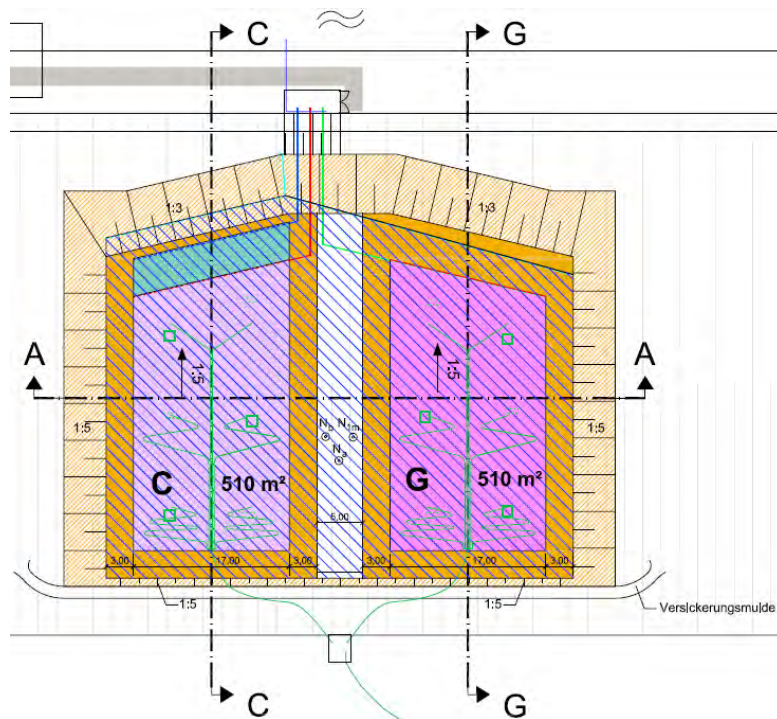


Abbildung 3-2: Deponie Wieringermeer Detaillageplan der Testfelder nach M + W Ingenieurgesellschaft (2009a) mit Darstellung der Randbereiche (orange) des jeweiligen Testfeldes (violett für Testfeld C; rosa für Testfeld G), der Gasverteilungsstation (schwarzes Quadrat) mit den sechs Gaseinlasspunkten (grüne Linien) je Testfeld, die durch Gaslanzen verstärkten Gastiefenprofile (grüne Quadrate), und des Wasserfassungssystems (rote, blaue, grüne Linie).

Der Methanfluss wurde mit Hilfe einer Gasentnahme aus zwei Gasbrunnen der Deponie und der anschließenden Verteilung durch sechs Einlasspunkte in das Testfeld, die während der Bauphase mit eingearbeitet wurden, gewährleistet. Um einen gleichmäßigen Strömungswiderstand zu realisieren, wurde die Länge aller Schläuche gleich lang gewählt. Am Böschungskopf (unten auf der Abbildung 3-2) zwischen den beiden Testfeldern ist die Gasverteilungsstation, die das Gas von dem Gasbrunnen zu den beiden Testfeldern leitet (durch ein Quadrat gekennzeichnet). Die sechs Einlasspunkte verteilen das Gas homogen auf das Testfeld. Durch vorgeschaltete Messapparaturen kann eine genaue Aussage zur Qualität und Quantität des Gases getroffen werden.

Zur Sickerwasserquantifizierung und zur kontrollierten Gasbeaufschlagung ist das Testfeld mit einer Auffangwanne aus Kunststoff ausgestattet. So werden störende Einflüsse wie Gasimmigrationen oder Feuchtigkeitsverschiebungen aus weiter unteren Bereichen unterhalb des Testfeldes verhindert; dazu gehört der eigentliche Müllkörper der Deponie. Seitlich wurden T-Profile aus Polyethylen (PEHD)-Platten auf die Auffangwanne geschweißt, was auch eine horizontale Randbegrenzung gewährleistet.

Das gesamte Testfeld fällt nach Norden mit einer Neigung von 1:5 ab. Der in Abbildung 3-2 angedeutete Profilschnitt von Punkt C zu C wird in Abbildung 3-3 dargestellt.

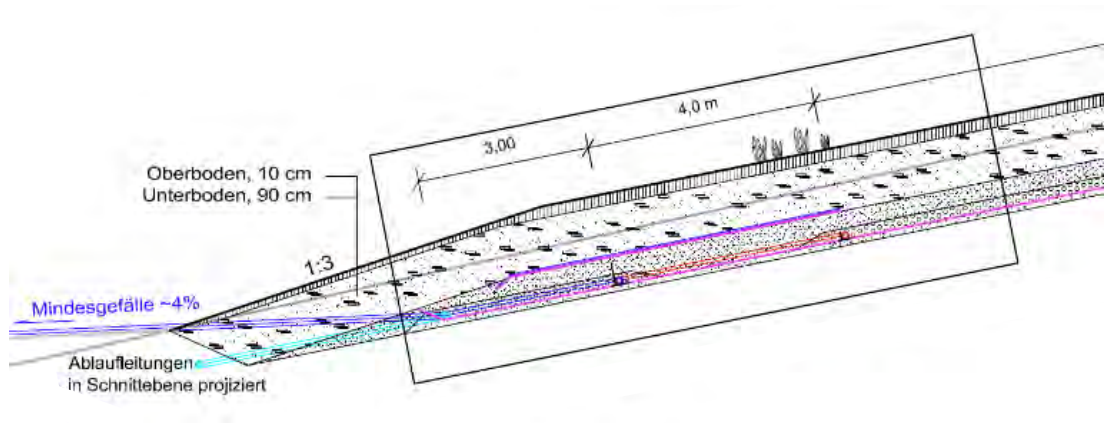


Abbildung 3-3: Deponie Wieringermeer Testfeld C, Schnitt C-C nach M + W Ingenieurgesellschaft (2009b)

Neben der Neigung können hier auch sehr gut die unterschiedlichen Mächtigkeiten der einzelnen Schichten erkannt werden. Die Geländeoberfläche weist zum größten Teil nur eine leichte Rauigkeit auf. Vereinzelt treten Maulwurfshügel auf. Im Norden schließt der Testaufbau mit einem Abstand von 2 - 3 m mit einer dichten Baumreihe, die die Testfeldhöhe übersteigt, ab. Das gesamte Deponiegelände ist zum größten Teil umgeben von landwirtschaftlicher Nutzfläche.

Detailliertere Informationen zum Aufbau der Testfelder auf der Deponie Wieringermeer beschreiben Steinert et al. (2012).

3.1 Instrumentierung

Zur festen Instrumentierung des Testfeldes gehören folgende unter Kapitel 4 genannten Materialien: Gaslanzen an den Rasterpunkten der Skalenebene S1, vier Gaslanzen Tiefenprofile, Sensoren und Logger zur permanenten Aufzeichnung der Bodenfeuchte und –temperatur an drei Standorten, permanente Aufzeichnung des Luftdruckes, -temperatur und –feuchtigkeit, drei Niederschlagssensoren in der Mitte des Testfeldes und eine in der Gasverteilerstation untergebrachte Einheit zur Aufzeichnung der Gaszusammensetzung, des Durchflusses und des Gasdruckes des eingebrachten Deponiegases.

4. Material und Methoden

Zur reproduzierbaren Kartierung von Messergebnissen durch Begehungen mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) wurde das Testfeld in ein Rasterfeld aufgeteilt. Alle weitergehenden Untersuchungen wie das Setzen der Gaslanzen oder die Haubenmessungen orientieren sich ebenfalls an diesem Raster.

4.1 Räumliche Skalenebenen

Folgende Skalenebenen (S) werden zur Analyse der Variabilität der Gasflüsse herangezogen:

Skalenebene S1: gesamtes Testfeld (ca. 54 x 17 m)

Skalenebene S2: 1 Rasterfeld (4,2 x 4,2 m)

Skalenebene S3: 1 Sub-Rasterfeld (1 x 1 m)

Die Skalenebene S1 unterteilt das gesamte Testfeld in 60 Rasterfelder. Die Skalenebene S2 unterteilt ein S1 Rasterfeld, Skalenebene S3 unterteilt ein S2 Rasterfeld.

Auf den drei Skalenebenen wurden an den Rasterpunkten in drei verschiedenen Tiefen Gaslanzen eingebracht. Skalenebenen S1 und S2 wurden mit Gaslanzen für die Tiefen 25 cm, 60 cm und 100 cm ausgestattet; Skalenebene S3 für die Tiefen 25 cm, 60 cm und 80 cm. Eine detaillierte Auflistung aller Instrumente und deren Installationsdatum und Messzeiträume kann Tabelle 4-1: Datengrundlage (eigene Daten)“ und Tabelle 4-2: Datengrundlage (Fremddaten)“ entnommen werden.

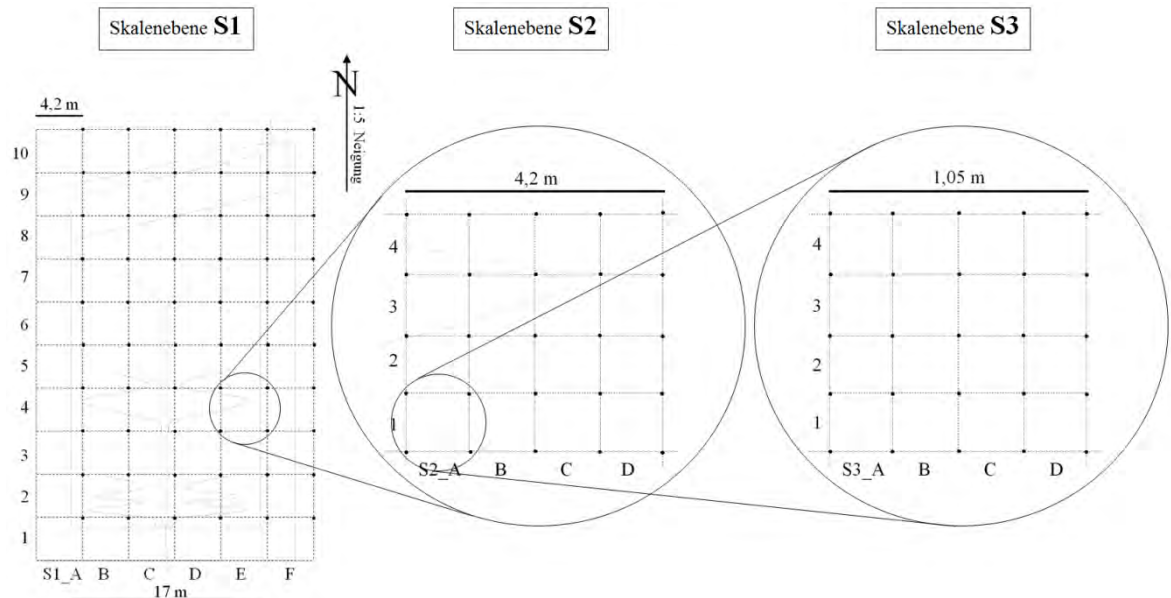


Abbildung 4-1: Rasterfeld mit Skalenebenen S1, S2 und S3

Skalenebene S2 verfeinert nach dem Schema (Abbildung 4-1) das in der Skalenebene S1 zwischen S1_D3, S1_E3, S1_D4 und S1_E4 aufgespannte Rasterfeld. Die Punkte stellen Rasterpunkte dar. Es kommt zu folgenden Punktübereinstimmungen zwischen den Skalenebenen S1 und S2: S1_D3 entspricht S2_5, S1_E3 entspricht S2_1, S1_D4 entspricht S2_25, S1_E4 entspricht S2_21.

Die Skalenebene S3 verfeinert das in Skalenebene S2 zwischen S2_4, S2_5, S2_9 und S2_10 aufgespannte Rasterfeld. Es kommt zu folgenden Punktübereinstimmungen zwischen den Skalenebenen S1, S2 und S3: S2_4 entspricht S3_1, S1_D3 entspricht S2_5 entspricht S3_5, S2_9 entspricht S3_21, S2_10 entspricht S3_25.

Das Setzen der Lanzen in den Skalenebenen S1 und S2 erfolgte durch Volker Kleinschmidt, Inga Röwer, Christoph Geck (alle S1) und Dr. Julia Gebert (S1 und S2). Die Gaslanzen auf Skalenebene S3 wurden selbst gesetzt. Die Anordnung der Gaslanzen in der Methanoxidationsschicht wird in Abbildung 4-1 dargestellt. Grundlagen für die Anordnung der Gaslanzen nach dem Prinzip des „Nested Design“ werden in Ruxton et al. (2006) beschrieben.

4.2 Datengrundlage

Zur Überprüfung der in der Einleitung genannten Hypothesen werden sowohl selbst erhobene als auch zur Verfügung gestellte Datensätze verwendet.

4.2.1 Eigene Daten

Selbst erhoben wurden die Datensätze der Bodengaskonzentrationen sowie die Entnahme gestörter Bodenproben für die Wassergehaltsbestimmung mittels eines Pürckhauer-Probennehmers. Die Aufnahme der Daten erfolgte teilweise unter Mithilfe weiterer Personen.

Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht der Eigenen Daten mit Aufnahmeintervallen, Installationszeitpunkten und Messzeiträumen.

Tabelle 4-1: Datengrundlage (eigene Daten)

Lfd. Nr.	Messinstrument				Datenaufnahme		Datum Installation	Mess-zeitraum
	Bezeichnung	Feld	Anzahl	Tiefen [cm]	Art	Intervall		
1	Gaslanzen Rasterpunkte	S1: 3 Tiefen	54	25, 60,	manuell	monatlich	< 04.2013	04.-07.13
		S2: 3 Tiefen ²	13	100		monatlich	04.2013	05.-07.13
		S3: 3 Tiefen	25	25, 60, 80		einmalig	07.2013	07.13
2	Gaslanzen Tiefenprofile	S1: 8 Tiefen	4	5, 10, 15, 30, 50, 90, 120, 145	manuell	monatlich	< 04.2013	04.-07.13
3	gestörte Proben (Pürckhauer) für die Wassergehaltsbestimmung	S1: 4 Tiefen	60	0-20,	manuell	einmalig	-	08.13
		S2: 4 Tiefen	25	20-40,				07.13
		S3: 4 Tiefen	25	40-60, 60-80				

² Rasterpunkt S2_13 enthält die Rasterlanzen in nur zwei Tiefen

4.2.1.1 Probenahme und Analyse des Bodengases

Die Gaslanzen (Aluminiumrohre, Innendurchmesser: 7 mm) wurden mit Butyl-Gummisepten verschlossen. Vor Entnahme der zu analysierenden Gasprobe wurde das Lanzeninnenvolumen über eine das Septum durchdringende Kanüle mit einer Spritze (Volumen: 60 ml) entnommen und verworfen. Je nach Gaslanzenlänge variiert das zu verwerfende Spülvolumen. Abbildung 4-2 gibt eine schematische Übersicht drei verschieden langer Lanzen in der Methanoxidationsschicht.

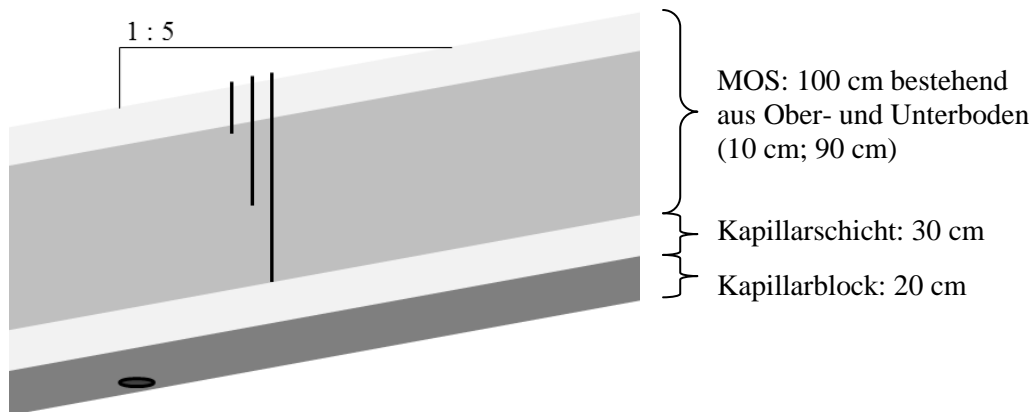


Abbildung 4-2: Gaslanzen (25, 60, 100 cm) in Methanoxidationsschicht und Gasinlet in Gasverteilungsschicht, Schematische Darstellung

Anschließend wurden 60 ml Gasprobe entnommen und mit einem Biogasanalysator (BM 2000 „Biogas“, Geotechnical Instruments (UK) Ltd.) analysiert. Der Biogasanalysator verfügt über drei verschiedene Messzellen die eine Analyse von Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff ermöglichen. Die Stickstoffkonzentration wurde manuell am Computer durch Errechnen der Differenz zu 100 % ermittelt. Die Gerätegenauigkeit liegt dabei bei 0,1 Vol.-%.

4.2.1.2 Gravimetrische Analyse des Wassergehaltes

Mit Hilfe eines Pürckhauer-Probennehmers wurden Mischproben aus 0 - 20, 20 - 40, 40 - 60 und 60 - 80 cm Tiefe unter Geländeoberfläche entnommen. Probenahmepunkte sind jeweils ca. 30 – 40 cm südlich der Gaslanzen der Skalenebene S1. Im Feld der Skalenebene S2 wird dieser Bereich auf ca. 20 – 30 cm begrenzt. Aufgrund der geringen Größe der Skalenebene S3 wurde hier nur eine Pürckhauer-Probe repräsentativ für das ganze Rasterfeld genommen und analysiert. Der Wassergehalt der Proben wird gravimetrisch nach DIN EN ISO 18121 mittels Ofentrocknung bei einer Temperatur von 105 °C bestimmt.

4.2.2 Fremddaten

Zur umfänglicheren Analyse und Diskussion der selbst gewonnen Daten wurde auf die in Tabelle 4-2 dargestellten Fremddaten zurückgegriffen. Die Daten werden ebenfalls im Rahmen des Projektes und von Mitarbeitern des IfB erhoben bzw. ausgelesen.

Tabelle 4-2: Datengrundlage (Fremddaten)

Lfd. Nr.	Messinstrument				Datenaufnahme		Datum Installation	Messzeitraum
	Bezeichnung	Feld	Anzahl	Tiefen [cm]	Art	Intervall		
1	Bodenfeuchte und Bodentemperatur	S1: 4 Tiefen	3	5, 15, 40, 80	automatisch	stündlich	06.05.2010	01.-07.13
2	Luftdruck, -temperatur, -feuchtigkeit	außerhalb des Testfeldes	1	-	automatisch	stündlich, Augenblickswert	< 04.2013	04.-07.13
3	Niederschlag	Randbereich S1: 3 Varianten	1	-	manuell	täglich	< 04.2013	04.-07.13
4	Haubenmessung	S1	variiert	-	manuell	Monatlich	-	04.-07.13
		S2	16	-				04.-07.13
5	Penetrodaten	S1 ³	60	0-20, 20-	manuell	einmalig	-	08.2013
		S2	25	40, 40-60,				07.2013
		S3	25	60-80				07.2013
7	Deponiegas	-	1	-	automatisch	stündlich	< 04.2013	04.-07.13

4.2.2.1 Bodenfeuchte und –temperatur

Die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur wurden mit Hilfe von drei festinstallierten Loggern (C1, C2 und C3) an drei verschiedenen Standorten an Unter-, Mittel- und Oberhang aufgenommen. Je Standpunkt wird der Verlauf beider Parameter in vier verschiedenen Tiefen der Methanoxidationsschicht stündlich automatisch aufgezeichnet. Verwendung findet ein flexibler Mehrkanallogger DK8010 der Firma Driesen + Kern GmbH. Das Auslesen erfolgt manuell seitens des IfB jeweils zu den monatlichen Messkampagnen.

4.2.2.2 Luftdruck- und –temperatur

Zur Analyse der Luftdruck- und Temperaturverläufe ist hangoberseitig ein kombiniertes Messgerät P-Log 520d der Firma Driesen + Kern GmbH installiert. Messwerte werden stündlich herausgegeben.

4.2.2.3 Emissionsmessungen

Emissionsmessungen mittels statischer Haube wurden für Skalenebenen S1 und S2 zur Aufnahme der Methan- und Kohlendioxidemissionen durchgeführt. Die Felder der Skalenebene S1 wurden mit Hilfe einer aus einem Aluminiumgestell und aluminiumbeschichteter PET-Folie erstellten Haube mit den Maßen von 4,2 m x 4,2 m (Volumen: 8,82 m³) an den jeweiligen Messkampagnen erfasst. Die Emissionen der Skalenebene S2 werden mit Hilfe einer statischen Haube kleiner Abmessungen (Fläche 1 m²) aufgenommen. Die Methode wird näher in Röwer et al. (2012) beschrieben.

³ S1 Doppelbestimmung; 2 x 60 Messungen; S2 und S3 Einfachbestimmung

4.2.2.4 Ermittlung des Eindringwiderstands

Die Ermittlung des Eindringwiderstandes erfolgte mit Hilfe eines Penetrologgers, Hersteller Eijkelkamp. Die gewählte Konusoberfläche beträgt 1 cm². Die maximale Messtiefe beträgt 80 cm. Die Durchführung der Messung erfolgt indem ein an einer Sondierstange angebrachter Konus (Spitzenwinkel von 60° nach NEN 5140⁴ und unterschiedlichen Bodenflächen) mit Hilfe eines Kraftaufnehmers in den Boden eingestochen wird. Die aufzuwendende Kraft wird dabei durch das Messgerät mit dem zurückgelegten Weg automatisch aufgezeichnet. Zu beachten ist bei der Anwendung das ein zu schneller und stoßweiser Vortrieb nicht repräsentative Werte ergibt. Wichtig ist die Auswahl des richtigen Konus. Ein zu kleiner Konus kann durch Aufnahme einer zu geringen Kraft zu ungenauen Messungen führen. Bei der Verwendung eines zu großen Konus ist im Extremfall ein Einstechen nicht möglich. Zu berücksichtigen ist, dass im Bodenprofil vorhandene Steine die Ergebnisse verzerren können. In diesem Fall wird so lange Kraft ausgeübt, bis sich diese von dem Konus aus dem Weg drängen lassen und so ein Einstechen ohne Hindernis wieder möglich ist. Eine Korrektur der Messdaten um Messwertspitzen ist evtl. erforderlich. Im Anhang II werden die Messdaten ohne Korrektur dargestellt. Makroporen oder Risse im Boden werden nur unter der Voraussetzung, dass diese dem Weg des Penetrologgers entsprechen, angezeigt. Die Verlässlichkeit der Ergebnisse richtet sich wie bei allen Analysen nach der Anzahl der erfolgten Messungen je Probenahmeort.

4.2.2.5 Zusammensetzung des Deponiegases

Das aktiv beaufschlagte Deponiegas wird in der Gasverteilerstation kontinuierlich bzgl. der Gaszusammensetzung, des Gasdurchflusses und des Gasdruckes analysiert und die automatisch aufgezeichnet. Die Gasleitung abgehend von der Gasverteilerstation hin zum Testfeld ist in Abbildung 4-1 im linken Teil, unterer Bereich zu erkennen.

4.3 Berechnung der Oxidationsleistung

Zur Berechnung der Oxidationsleistung kann zwischen zwei verschiedenen Ansätzen gewählt werden. Nach Gebert et al. (2011b) kann die Methanoxidationsleistung als prozentualer Anteil der eingeleiteten Fracht berechnet werden.

Nach Christophersen et al. (2001) besteht ein Zusammenhang zwischen den Methan- und Kohlendioxidflüssen am Testfeldboden und an der Testfeldoberfläche, die sich aufsummiert jeweils entsprechen müssen; Gleichung (7). Die Methanoxidationsleistung (9) wird hier als prozentualer Anteil der Methanemissionen an dem eingehenden Methanfluss berechnet. Formel (8) zeigt den Zusammenhang zwischen Methan- und Kohlendioxidflüssen auf.

$$J_{D\text{ Gas}} = J_{D\text{ CH}_4\text{ oben}} + J_{D\text{ CO}_2\text{ oben}} = J_{D\text{ CH}_4\text{ unten}} + J_{D\text{ CO}_2\text{ unten}} \quad (7)$$

$$J_{D\text{ CH}_4\text{ unten}} = (J_{D\text{ CH}_4\text{ oben}} + J_{D\text{ CO}_2\text{ oben}}) \cdot \left(\frac{C_{\text{CH}_4\text{ unten}}}{C_{\text{CH}_4\text{ unten}} + C_{\text{CO}_2\text{ unten}}} \right) \quad (8)$$

⁴ NEN 5140 ist die Bezeichnung einer niederländische Norm (Nederlandse Norm) mit dem Titel „Geotechniek. Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvingsweerstand van grond. Elektrische sondeermethode“.

$$Eff_{Ox} = \frac{J_{D CH_4 \text{ unten}}}{100} \times J_{D CH_4 \text{ oben}} \quad (9)$$

$J_{D \text{ Gas}}$	gesamter Deponiegasfluss [$\text{mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
$J_{D CH_4 \text{ oben / unten}}$	Methanfluss oberhalb / unterhalb Geländeoberfläche mit Methanoxidationsschicht [$\text{mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
$J_{D CO_2 \text{ oben / unten}}$	Kohlendioxidfluss oberhalb / unterhalb Geländeoberfläche mit Methanoxidationsschicht [$\text{mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$]
$C_{CH_4 / CO_2 \text{ unten}}$	Methan- / Kohlendioxidkonzentration in Gaslanze [Vol.-%]
Eff_{Ox}	Anteil des oxidierten Methans relativ zum Deponiegas [%]

Beide Ansätze beziehen sich in einem verschobenen Verhältnis auf die Kohlenstoffbilanz. Für diese Arbeit werden, sofern nicht anders angegeben, die Berechnungsansätze nach Christophersen angewendet.

4.4 Messstrategie

Art und Häufigkeit der folgenden Messungen wurden der Prüfung der Hypothesen angepasst.

- 1) Auf den drei Skalenebenen:
 - a. Variabilität der Gasfracht auf die Methanoxidationsschicht
 - b. Variabilität der Zusammensetzung der Bodengasphase (3 Tiefen)
 - c. Variabilität der Emission (Skalenebenen S1 und S2)
- 2) Zeitliche Variabilität (monatliche Ebenen für 1 a-c); ggf. für Einzelaspekte Tagesebene
 - a. Prüfung potenziell einflussnehmender Parameter auf die beobachteten Gasflussmuster: Wind, Luftdruck, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Topographie

5. Ergebnisse

Die Messungen fanden an jeweils zwei Kampagnentagen im April, Juni, Juli und an drei Kampagnentagen im Mai 2013 statt.

Bei den Testfeldern Wieringermeer handelt es sich um ein der Witterung gegenüber exponiertes offenes System. Die Prozesse des Gastransportes und der Methanoxidation sind von vielen Faktoren wie Temperatur-, Feuchte- oder auch Druckänderungen wie unter Kapitel 2 beeinflussbar. Im Folgenden werden physikalische Einflussfaktoren des Wetters und davon abhängige Parameter wie beispielsweise der Lufttemperatur und der davon abhängigen Bodentemperatur dargestellt.

5.1 Wetterdaten und davon beeinflusste Bodenparameter

Die Schwankungen der Lufttemperatur, des Luftdruckes und der Luftfeuchtigkeit im Untersuchungszeitraum zeigt Abbildung 5-1.

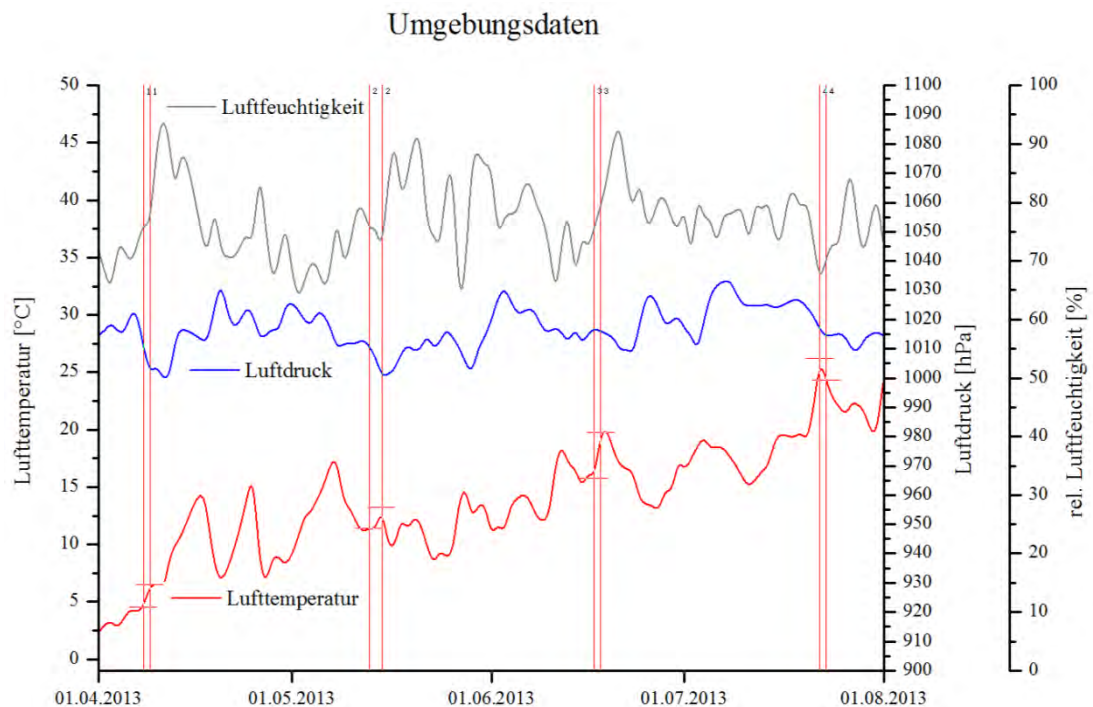


Abbildung 5-1: Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck Deponie Wieringermeer. Vertikal durchgehend rote Linien kennzeichnen die Zeiträume der jeweiligen Messkampagnen: 08.-09.04., 13.-15.05., 17.-18.06., 22.-23.07.2013

Der jahreszeitliche Einfluss mit ansteigender Lufttemperatur (rote Kurve) zeigt sich von April bis Anfang August 2013. Die höchsten Lufttemperaturen werden während der Aufzeichnung Ende Juli mit ca. 25 °C erreicht. Der Luftdruck (blaue Kurve) bewegt sich zwischen ca. 1000 und 1030 hPa. Extremwerte sind in dem betrachteten Zeitraum nicht zu verzeichnen. Die relative Luftfeuchtigkeit (graue Kurve) zeigt eine abnehmende Schwankungsbreite zu Ende Mai / Anfang Juni. Ein Tagesgang kann in der gewählten Auflösung nicht erkannt werden.

Die Lufttemperatur hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Bodentemperatur. Dieser Einfluss ist auf der Testfeldfläche bis hin zu den am tiefsten eingebauten Temperatursensoren in 80 cm unter Geländeoberfläche zu erkennen. Die untenstehende Abbildung 5-2 zeigt die Temperaturänderung in verschiedenen Bodentiefen des Testfeldes für den Bereich von Ober-, Mittel- und Unterhang.

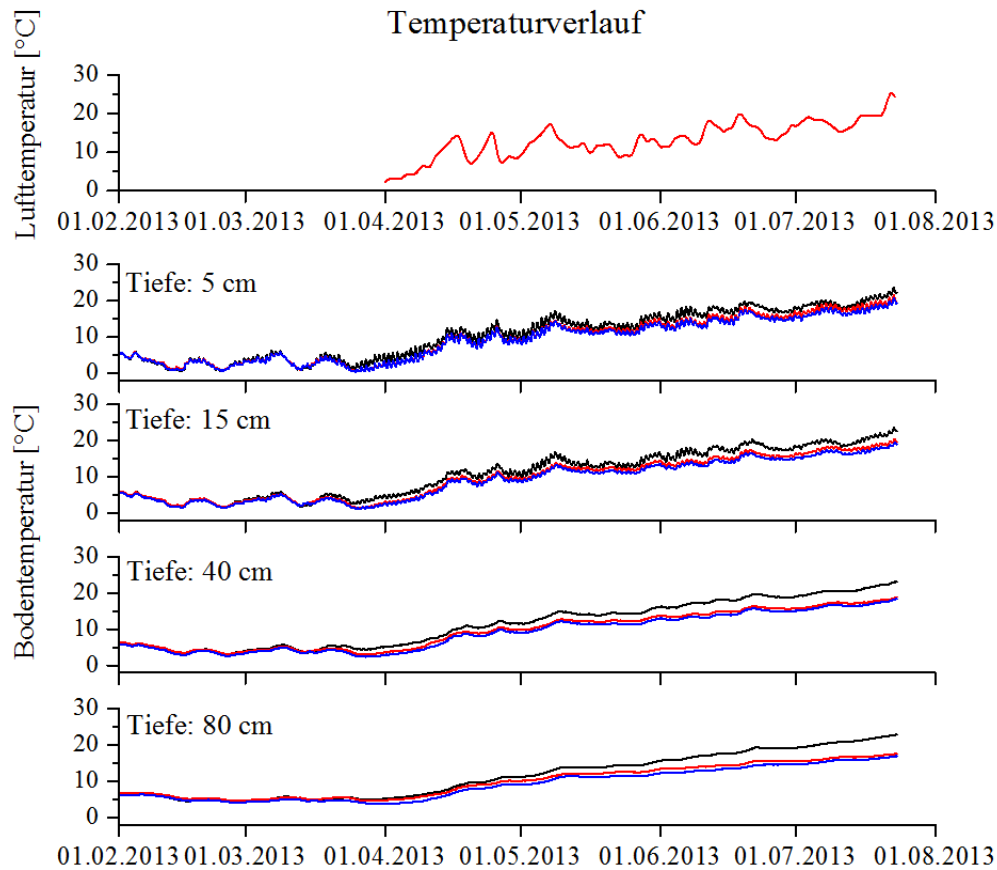


Abbildung 5-2: Temperaturverläufe über die Bodentiefe von Anfang Februar bis Ende Juli. Die schwarze Linie gibt die aufgezeichnete Temperatur des am Oberhang gelegenen Loggers wieder, die roten des Mittelhangbereiches, die blauen des Unterhangbereiches.

Ab Ende März / Anfang April ist in jeder Tiefe ein Auseinanderlaufen der Temperaturen im Ober-, Mittel- und Unterhangbereich zu beobachten und sich somit Unterschiede zwischen diesen Hangbereichen bemerkbar machen. Im Oberhangbereich wurden bis zu ca 6,8 °C höhere Temperaturen registriert als im Unterhangbereich. Im Winter 12 / 13 kam aufgrund eines technischen Defekts des Gasverdichters zu einer mehrmonatigen Abschaltung des Gaszufuhrsystems, welches ab dem 11.03.2012 wieder in Betrieb genommen wurde. Die Spreizung der Werte zwischen Oberhang und Unterhang macht sich also nur bei Gaszufuhr bemerkbar. Außerdem ist zu erkennen, dass die Temperaturamplitude mit zunehmender Tiefe zurück geht, die Kurve sich also glättet. In den Monaten Februar bis ca. Mitte / Ende März liegen die von den Sensoren gelieferten Bodentemperaturen eng beieinander. Nicht betrachtet werden in diesem Zusammenhang die Sonneneinstrahlung bzw. die Wärmeeinstrahlung pro Flächeneinheit, die ebenfalls wie die betrachteten Parametern der Bodenfeuchte und der Durchströmung mit Gas für die Bodentemperatur eine maßgebliche Rolle spielen.

Neben der sich ändernden Luft- und Umgebungstemperatur werden ebenfalls Niederschläge mit entsprechend zeitlich unterschiedlichem Versatz in verschiedenen Bodentiefen registriert. Abbildung 5-3 zeigt den über den Messzeitraum gefallenen Niederschlag und die Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen auf dem Testfeld. Der Darstellungszeitraum ist wieder von Anfang Februar bis Anfang August gewählt. Erwähnenswerte Niederschlagsereignisse sind bis auf Ende Juni nicht zu verzeichnen. Am 21.06.2013 regnete es mit 20 mm d^{-1} am stärksten während des gesamten Messzeitraumes. Die Durchschnittsregelmengen betragen für die Monate April $0,68 \text{ mm d}^{-1}$, Mai $1,45 \text{ mm d}^{-1}$, Juni $1,83 \text{ mm d}^{-1}$ und Juli $1,00 \text{ mm d}^{-1}$. Der Feuchtigkeitsverlauf wird besonders stark in den oberen Bodenschichten vom Niederschlag beeinflusst.

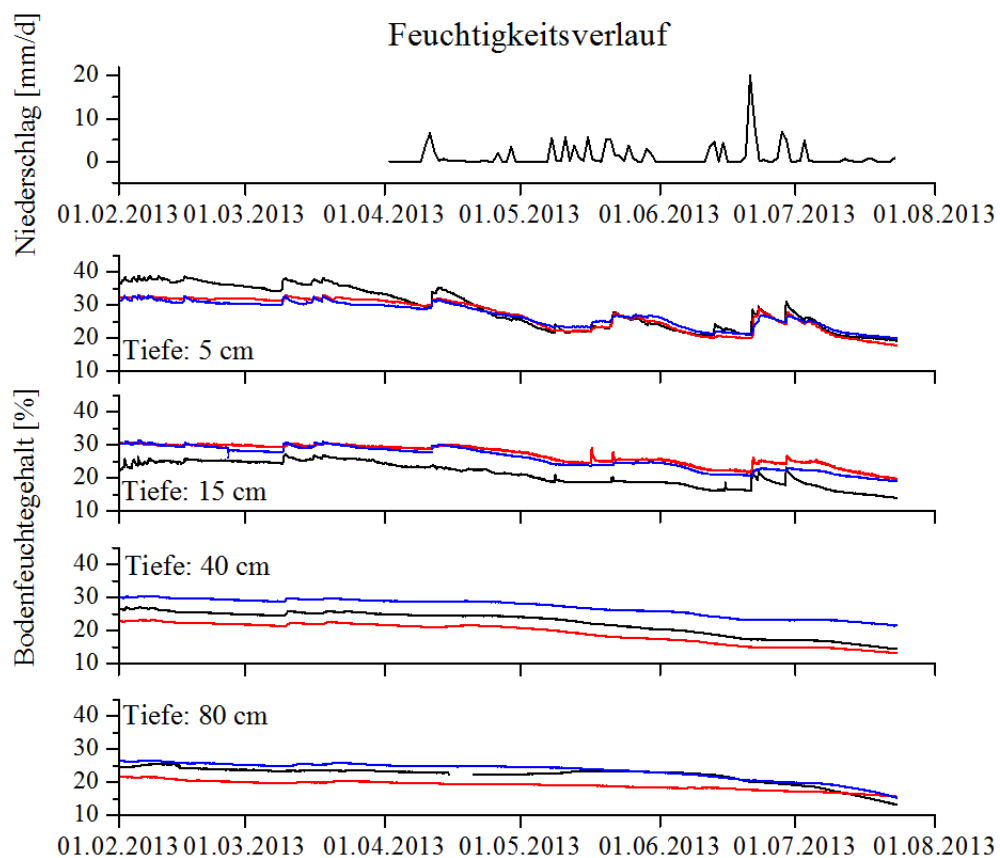


Abbildung 5-3: Niederschlag und Feuchtigkeitsverlauf über die Bodentiefe von Anfang Februar bis Ende Juli. Die schwarze Linie gibt die aufgezeichnete Temperatur des am Oberhang gelegenen Loggers wieder, die roten des Mittelhangbereiches, die blauen des Unterhangbereiches.

So kann in der Bodentiefe von 5 cm und 15 cm nach dem Starkregenereignis vom 21.06.2013 ein Anstieg der Bodenfeuchte erkannt werden. In 5 cm Bodentiefe steigt die Bodenfeuchte in diesem Zeitraum um ca. 7 %-Punkte, wohingegen in 15 cm Tiefe eine Veränderung von ca. 4 %-Punkten zu erkennen ist. Die in 40 und 80 cm liegende Sensoren zeigen um diesen Zeitpunkt mit Berücksichtigung eines zeitlichen Puffers von einem Monat keine stärkeren Veränderungen. Wieder kommt es zu einer Spreizung zwischen den Ober-, Mittel- und Unterhangbereichen. Der Unterhangbereich weist bereits ab einer Tiefe von 40 cm zu allen Zeitpunkten einen höheren Wassergehalt als die oberhalb gelegenen Bereiche auf. Widersprüchlich zu einer lateral hangabwärts anreichernden Feuchtigkeit ist allerdings

ein von den Loggern aufgenommener höherer Wassergehalt des Mittelhangbereichs im Vergleich zum Oberhangbereich. Die kontinuierlichen Bodenfeuchtedaten werden durch gravimetrische Wassergehalte von Proben über das gesamte Testfeld zur genaueren Beschreibung des Wasserhaushaltes unterstützt; siehe 5.2.

5.1.1 Wind

Zur Erfassung der gegebenen Windverhältnisse werden während der Emissionsmessungen auf den Skalenebenen S1 und S2 die vorherrschenden Windverhältnisse über die Dauer der Messung aufgenommen. Aufgenommen werden die maximal auftretenden und die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten. Abbildung 5-4 zeigt die für jeden Kampagnentag aufgetretenen maximalen, Abbildung 5-5 die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten.

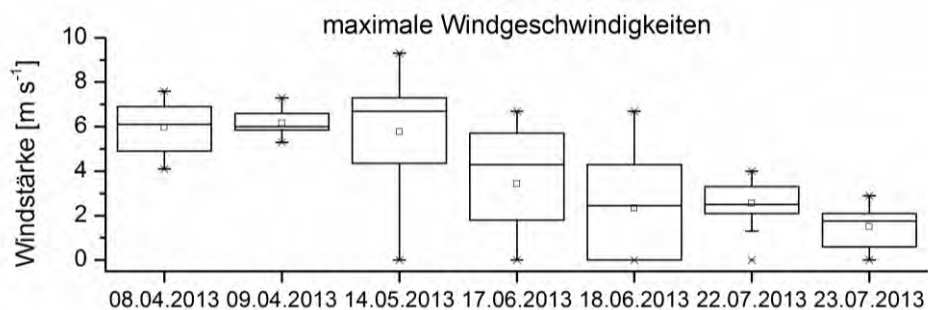


Abbildung 5-4: maximale Windgeschwindigkeiten während der Emissionsmessungen auf Skalenebene S1 April bis Juli 2013. Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. n_{April} : 25 (08.), 13 (09.); n_{Mai} : 61; n_{Juni} : 20 (17.), 17 (18.); n_{Juli} : 27 (22.), 11 (23.).

Im April und Mai liegen die statistisch am häufigsten (der Median) auftretenden maximalen Windgeschwindigkeiten bei ca. 6 bzw. 7 m s⁻¹. Im Juni liegt der Median unterhalb der Werte des April und Mai. Am ersten Kampagnentag liegt dieser noch bei ca. 4 m s⁻¹, am zweiten Kampagnentag bei ca. 2,5 m s⁻¹. Die geringsten Medianwerte der max. Windgeschwindigkeiten werden im Juli gemessen. Hier liegen diese am ersten Kampagnentag bei ebenfalls ca. 2,5 m s⁻¹ und am zweiten Kampagnentag bei ca. 2 m s⁻¹. Die größten Unterschiede innerhalb der max. Windgeschwindigkeiten treten im Mai und Juni auf. Hier treten Winde von 0 (windstill) bis fast 10 m s⁻¹ während der Emissionsmessungen auf. Im April wurden während der Emissionsmessungen die höchsten max. Windgeschwindigkeiten mit der kleinsten Streuung gemessen. Die geringsten max. Windgeschwindigkeiten mit der kleinsten Streuung wurden im Juli gemessen.

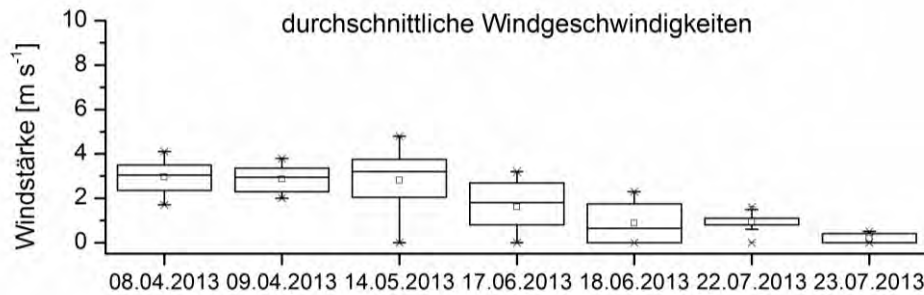


Abbildung 5-5: durchschnittliche Windgeschwindigkeiten während der Emissionsmessungen auf Skalenebene S1 April bis Juli 2013. Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. n_{April} : 25 (08.), 13 (09.); n_{Mai} : 61; n_{Juni} : 20 (17.), 17 (18.); n_{Juli} : 27 (22.), 11 (23.).

Die Durchschnittswindgeschwindigkeiten weisen das gleiche Muster auf. Im April und Mai liegen diese statistisch am häufigsten bei ca. 3 m s^{-1} . Im Juni liegt der Median unterhalb der Werte des April und Mai. Am ersten Kampagnentag liegt dieser noch bei ca. 2 m s^{-1} , am zweiten Kampagnentag bei $< 1 \text{ m s}^{-1}$. Die geringsten Medianwerte der Durchschnittswindgeschwindigkeiten werden am 18.06. und am 23.07. mit $< 1 \text{ m s}^{-1}$ gemessen. Die größten Unterschiede innerhalb der Durchschnittswindgeschwindigkeiten treten wieder im Mai und Juni auf. Hier werden Winde von 0 (windstill) bis ca. 5 m s^{-1} im Mai und bis ca. 3 bzw. 4 m s^{-1} im Juni während der Emissionsmessungen gemessen. Im April wurden während der Emissionsmessungen die höchsten Durchschnittswindgeschwindigkeiten mit der kleinsten Streuung gemessen. Die geringsten Durchschnittswindgeschwindigkeiten mit der kleinsten Streuung wurden im Juli gemessen.

5.2 Bodeneigenschaften: Eindringwiderstand und Wassergehalte

Zur besseren Charakterisierung der gesamten Methanoxidationsschicht bis in eine Tiefe von 80 cm wurde die Eindringkraft und der gravimetrische Wassergehalt in %-Trockengewicht (TG) der Bereiche 0 – 20 cm, 20 – 40 cm, 40 – 60 cm und 60 – 80 cm Tiefe ermittelt. Die räumliche Verteilung von verschiedenen Wassergehalten über das Testfeld kann maßgeblich zur unterschiedlichen Verteilung von Gasflüssen durch das Verdrängen von luftgefüllten Poren beitragen. Der Eindringwiderstand auf der Skalenebene S1 wurde mit zwei Einstichen je Standort im August 2013, die Skalenebenen S2 und S3 mit jeweils einem Einstich je Standort im Juli 2013 kartiert. Abbildung 5-6 zeigt die interpolierte Verteilung der gravimetrischen Bodenfeuchte über Skalenebene S1 im August und Skalenebene S2 im Juli auf. Interpolierten Grafiken erzeugen eine qualitative Darstellung, die den Vergleich untereinander erlaubt, aber nicht quantitativ auswertbar sind.

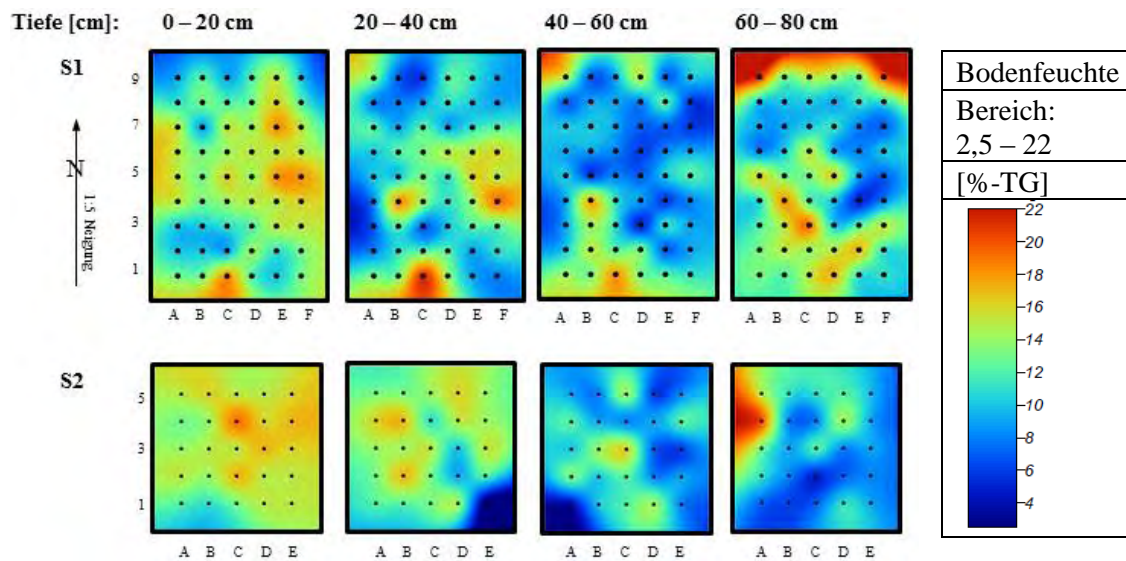


Abbildung 5-6: Verteilung der gravimetrischen Bodenfeuchte auf Skalenebene S1, Monat August 2013 (interpolierte Darstellung). Skalenebene S2 (Probenahme im Juli 2013) stellt den Bereich zwischen den Rasterpunkten D3, D4, E3 und E4 der Skalenebene S1 dar (schwarzes Quadrat).

Über die Fläche und Tiefe des Testfeldes sind keine klar abgrenzenden Bereiche zueinander erkennbar. Für Skalenebene S1 liegt der Mittelwert im August für 0 – 20 cm bei 13,56 %-TG (Standardabweichung (SD) 2,535), von 20 – 40 cm bei 11,72 %-TG (SD 3,337), von 40 – 60 cm bei 10,32 %-TG (SD 2,905) und von 60 – 80 cm bei 12,43 %-TG (SD 3,697). Sowohl Bereiche des Ober-, Mittel- und Unterhanges weisen Bereiche höherer und niedriger gravimetrischer Wassergehalte auf. In der Tiefe 0 bis 20 cm liegt der höchste Wassergehalt bei Punkt C1 mit ≈ 19 %-TG. Auch in den folgenden Tiefen weist dieser Punkt im Vergleich zum restlichen Testfeld einen sehr hohen Wassergehalt auf. Im Bereich des Mittelhanges kommt es um Punkt B4 ab einer Tiefe von 20 cm zu höheren Wassergehalten mit ≈ 18 %-TG, die sich mit zunehmender Tiefe scheinbar auch auf andere benachbarte Bereiche ausweitet. Auffällig ist eine Ansammlung von höheren Wasserkonzentrationen in einer Tiefe von 60 bis 80 cm zum Testfeldfuß in den Punkten A9 (≈ 22 %-TG) und F9 (≈ 21 %-TG).

Für Skalenebene S2 liegt der Mittelwert im Juli für 0 – 20 cm bei 15,50 %-TG (SD 1,598), von 20 – 40 cm bei 13,56 %-TG (SD 2,984), von 40 – 60 cm bei 10,34 %-TG (SD 2,806) und von 60 – 80 cm bei 10,32 %-TG (SD 3,232). Besonders die oberen 20 cm weisen eine homogene Feuchtigkeitsverteilung auf. Einziger Auffälligkeit ist bei Punkt C4 eine zur Umgebung leicht erhöhte Feuchtigkeit von ca. 19 %-TG. In einer Tiefe von 20 bis 40 cm wird eine sehr geringe Bodenfeuchte an Punkt E1 mit nur 2,59 %-TG gemessen. Andere Bereiche dieser Tiefe weisen keine stärkeren Feuchtigkeitsveränderungen zu umgebenden Bereichen auf. Eine auffällig hohe Bodenfeuchte wird in der Tiefe von 60 bis 80 cm an Punkt A4 mit ca. 20 %-TG gemessen. Andere Auffälligkeiten können in dieser Skalenebene nicht gefunden werden.

Insgesamt können die Farbverläufe der Skalenebene S1 in der Skalenebene S2 wiedergefunden werden. Die Probenahme zum gravimetrischen Wassergehalt der

Skalenebene S3 erfolgte ebenfalls im Juli; wird aber aufgrund einer Einfachbestimmung nicht interpoliert dargestellt.

Abbildung 5-7 zeigt die absoluten Verteilungen der Eindringwiderstände über die drei Tiefenzonen der Skalenebenen S1, S2 und S3 und die absoluten Verteilungen der gravimetrischen Wassergehalte über die vier Tiefenzonen der Skalenebenen S1 und S2 auf. Der Wassergehalt der Skalenebene S3 zeigt keine Streuung aufgrund einer Einfachbestimmung an einer Probenahmestelle. Die Bereiche der Auswertung der Eindringwiderstände wurden analog der der Bodenfeuchte gewählt. Aufgrund der starken Verfestigung wurde der Bereich von 0-20 cm vorgestochen und kann somit nicht ausgewertet werden. Eine Feuchtekorrektur der Eindringwiderstände wurde nicht vorgenommen. Die Probenahme erfolgte von Juli für die Eindringwiderstände und Wassergehalte auf den Skalenebenen S2, S3 bis August für die Eindringwiderstände und Wassergehalte auf Skalenebene S1.

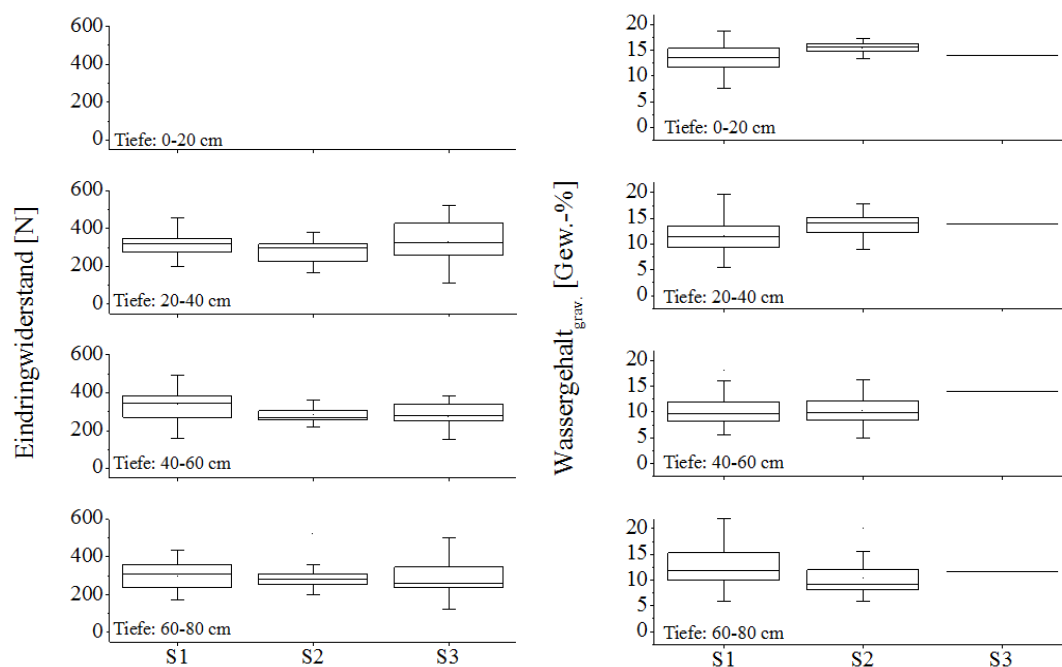


Abbildung 5-7: Verteilung der Eindringwiderstände (links) unterteilt in vier Tiefenzonen auf Skalenebene S1 (August 2013, $n=60$), Skalenebene S2 (Juli 2013, $n=25$) und Skalenebene S3 (Juli 2013, $n=23$) sowie der Wassergehalte (rechts) der Skalenebene S1 (August 2013, $n=60$), Skalenebene S2 (Juli 2013, $n=25$) und Skalenebene S3 (Juli 2013, $n=1$). Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Entfernung der Eindringwiderstände von 0 – 20 cm aufgrund von vorgestochenen Bereichen und somit unbrauchbaren Werten. Wassergehalte auf Skalenebene S3 aus einer Probe.

Ein Vergleich der Eindringwiderstände aller drei Skalenebenen (S1, S2 und S3) zeigt eine geringere Streuung der Skalenebene S2 in den Tiefen 40 – 60 cm und 60 bis 80 cm auf. In der Tiefe von 20 bis 40 cm variieren die Eindringwiderstände gegenläufig der Skalenebenen-Größe. Skalenebene S3 weist hier die größte Variabilität, Skalenebene S1 die geringste Variabilität auf. Insgesamt kann auf allen Skalenebenen eine große Bandbreite der Messergebnisse beschrieben werden. Aufgrund der starken Abweichung beider Einstiche der Skalenebene S1 kann von einer hohen kleinräumigen Variabilität der Eindringwiderstände über das gesamte Testfeld gesprochen werden. Die graphische Darstellung aller Ergebnisse

der Penetrologer-Kartierung findet sich im Anhang II; unterteilt für jedes Rasterfeld (Skalenebenen S1, S2 und S3).

Die Bodenfeuchte variiert über das gesamte Testfeld (Skalenebene S1) gesehen in allen ausgewählten Bodentiefen in etwa gleich stark. Auffällig ist in einer Tiefe von 0 – 20 cm eine relativ kleine Streubreite der gravimetrischen Wassergehalte. Die absoluten Werte der Bodenfeuchte der Skalenebene S2 liegen mit leichten Verschiebungen in etwa auf demselben Konzentrationsniveau wie die der Skalenebene S1. Die Bodenfeuchte der Skalenebene S3 wurde an einer Bodenprobe, repräsentativ für alle Rasterfelder dieser Skalenebene, bestimmt. Aufgrund der Skalenebene-Größe hätte eine Beprobung aller Standorte zu einer kompletten Zerstörung geführt. Signifikante Unterschiede finden sich zwischen folgenden Skalenebenen und Tiefen:

Tabelle 5-1: Signifikanztest zwischen den Skalenebenen je Tiefe für die Eindringwiderstände und die Bodenfeuchte. Angabe des Mittelwertes mit Ergebnissen des Post-hoc-Test bei $p < 0,05$. (Indize a und b bezeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte.)

	Eindringwiderstand; Tiefe [cm]				Bodenfeuchte; Tiefe [cm]			
	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80
S1	217,58 ^a	318,72 ^{ab}	337,07 ^a	301,45 ^a	13,56 ^a	11,72 ^a	10,32 ^a	10,32 ^a
S2	44,38 ^b	274,86 ^a	282,09 ^b	291,61 ^a	15,50 ^b	13,56 ^a	10,34 ^a	11,75 ^a
S3	69,62 ^b	330,18 ^b	275,30 ^b	286,01 ^a	13,96 ^a	13,89 ^a	13,99 ^a	12,43 ^a

Signifikante Unterschiede der Eindringwiderstände über die Tiefe jeder Skalenebene lassen auf kein wiederkehrendes Verteilungsmuster schließen, siehe Tabelle 5-1. In den Tiefen 0 – 20 und 40 – 60 cm ist jeweils die Skalenebene S1 signifikant unterschiedlich zur Skalenebene S2 und S3. In der Tiefe von 60 – 80 cm gibt es keine signifikanten Unterschiede. Die Bodenfeuchte ist inhomogen über alle Skalenebenen verteilt und unterscheidet sich in keinen Fällen signifikant von anderen Skalenebenen. Lediglich die Skalenebene S2 in einer Tiefe von 0 – 20 cm unterscheidet sich von den Skalenebenen S1 und S3 signifikant ($p < 0,05$).

Der Eindringwiderstand steht bei gleicher Bodenart und gleicher Trockenrohdichte nach Dexter et al. (2007) u.a. im direkten Zusammenhang mit der Bodenfeuchte. Die Korrelation beider für jeweils vier erzeugte Bereiche (Tiefen [cm] 0-20; 20-40; 40-60; 60-80) der Skalenebene S1 zeigen keine Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Bodenfeuchte; siehe Bestimmtheitsmaße Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Korrelation der Bodenfeuchten und der Eindringwiderstände über die Tiefe⁵

	Zone [cm]			
	0-20	20-40	40-60	60-80
S1	$r^2=0,0096$ bei n=60	$r^2=0,0339$ bei n=60	$r^2=0,1123$ bei n=60	$r^2=0,1079$ bei n=60
S2	$r^2=0,0016$ bei n=25	$r^2=0,0498$ bei n=25	$r^2=0,0436$ bei n=25	$r^2=0,0472$ bei n=24

⁵ Eine Korrelation zwischen der Bodenfeuchte und der Eindringwiderstände der Skalenebene S3 ist aufgrund von fehlenden Bodenfeuchtigkeitsdaten (n=1 je Zone) nicht möglich.

Die Korrelation des Eindringwiderstandes und der Bodenfeuchte der Skalenebene S2 erzeugt vergleichbare Ergebnisse.

5.3 Gasfracht auf das gesamte Testfeld

Die sechs eingebauten Inlets bringen das Deponiegas in die Gasverteilungsschicht (GVS) zur homogenen Verteilung ein. Die in die Gasverteilungsschicht eingebrachte Fracht kann durch an der Gasverteilungsstation automatisch aufgezeichnete mittlere Methan- und Kohlendioxidkonzentration im Deponiegas und die geförderte Deponiegasmenge kontinuierlich nachvollzogen und für die betrachteten Zeiträume wie folgt angegeben werden:

Tabelle 5-3: Zusammensetzung des Deponiegases April bis Juli 2013 gemessen an Gasverteilerstation (Mittelwert über 14 Tage vor der jeweiligen Messkampagne), Standardabweichung (SD)

Zeitraum	Mittlere CH ₄ -Konzentration		CH ₄ -Fracht		Mittlere CO ₂ -Konzentration		CO ₂ -Fracht	
	[Vol.-%]	SD	[g/(m ² · d)]	SD	[Vol.-%]	SD	[g/(m ² · d)]	SD
27.03 – 09.04.13	33,15	1,62	47,58	1,93	30,03	1,03	118,78	8,49
01. – 14.05.13	40,08	1,83	45,10	5,87	30,67	0,47	95,63	16,80
04. – 18.06.13	45,21	1,20	51,74	1,96	30,42	0,29	95,80	4,20
09. – 22.07.13	37,13	0,57	43,67	3,40	30,74	0,29	99,32	6,58

Tabelle 5-3 gibt jeweils den Mittelwert der mittleren Methan- und Kohlendioxidkonzentration und die daraus berechneten Frachten für 14 Tage⁶ vor der jeweiligen Messkampagne an. Die Methanfrachten für die Monate April, Mai und Juli 2013 betragen $(47,71 \pm 4,03) \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Um im Juni 2013 evtl. Kapazitätsgrenzen der Methanoxidationsschicht gezielt zu überschreiten, wurde die Methanfracht im Mai von 45,10 $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ um ca. 15 % auf 51,74 $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ erhöht. Die Kohlendioxidfrachten liegen im April für die Kampagnentage bei ca. 119 $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; im Mai, Juni und Juli bei $(97,48 \pm 1,84) \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität der Methanfracht auf die Methanoxidationsschicht wurden nach 4.1 drei Skalenebenen auf dem Testfeld eingerichtet.

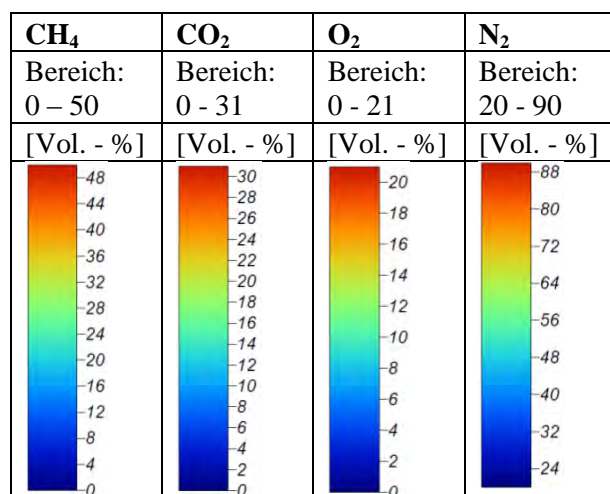
5.4 Zusammensetzung der Bodengasphase

Die Darstellung der Zusammensetzung der Bodengasphase zeigt Muster der jeweiligen Gaskonzentrationen auf und trägt somit zum Gesamtverständnis der Gasflüsse bei. Dargestellt wird die räumliche Variabilität der Skalenebenen S1, S2 und S3 im Juli 2013 in den Tiefen 25, 60 und 100 cm für die Skalenebenen S1 und S2 und in den Tiefen 25, 60 und 80 cm für Skalenebene S3. Für alle Abbildungen dieser Art werden die unter Tabelle 5-4 aufgezeigten Legenden angewendet.

⁶ Eine Durchströmung der gesamten Methanoxidationsschicht liegt nach mündlicher Überlieferung ungefähr in diesem Zeitraum.

5. Ergebnisse

Tabelle 5-4: Legende; Übersicht für Gaskonzentrationen aller Rasterlanzen aller Skalenebenen für Abbildungen 5-8 bis 5-11⁷



Die mit Hilfe der Gaslanzen ermittelten Gaskonzentrationen der Skalenebene S1 (komplettes Testfeld), Skalenebene S2 (Verfeinerung des unter Skalenebene S1 zwischen D3 und E4 befindlichen Quadrates) und Skalenebene S3 (Verfeinerung des unter Skalenebene S2 zwischen 00 und B2 befindlichen Quadrates) werden auf die gesamte Skalenebene interpoliert. Interpolierten Grafiken erzeugen eine qualitative Darstellung, die den Vergleich untereinander erlaubt, aber nicht quantitativ auswertbar sind.

Insgesamt muss zwischen einer zeitlichen und einer räumlichen Variabilität unterschieden werden. In den folgenden Abschnitten wird vornehmlich auf die räumliche Variabilität eingegangen.

Im Juli kommt es in einer Tiefe von 100 cm bei der Skalenebene S1 (Abbildung 5-8) zu zwei markanten Bereichen mit erhöhten Methankonzentrationen. Neben dem kleineren Bereich um B4 kommt es um B2 zu D2 zu erhöhten Methankonzentrationen. Insgesamt handelt es sich um räumlich stärker begrenzte Bereiche. Umliegende Bereiche weisen nahezu keine Methankonzentrationen auf. Die Kohlendioxidkonzentrationen dieser Skalenebene kennzeichnen sich durch einen Bereich im östlichen Teil des Testfeldes, der über die Spalte E und F mit einem kleinen Ausläufer über D6 einen Bereich mit geringen Kohlendioxidkonzentrationen um 0 Vol.-% aber mit höheren Sauerstoffkonzentrationen liegt. Bereiche mit höheren Kohlendioxidkonzentrationen befinden sich im Oberhangbereich um A1/2 bis ca. D1/2 und um B2 / C2. Neben den bei allen Gasen bis auf Sauerstoff vorkommenden stärkeren Konzentrationsänderungen in den Testfeldecken am Unterhang sind bei den Stickstoffkonzentrationen zwei Bereiche, ein kleinerer um B4 und ein größerer von B2 zu D2 bei denen es zu erhöhten Stickstoffkonzentrationen kommt, markant.

⁷ Ein laminiertes Ausdruck zur direkten Verwendung liegt dieser Arbeit im Anhang I bei.

Juli, Tiefe: 100 cm (S1, S2), 80 cm (S3)

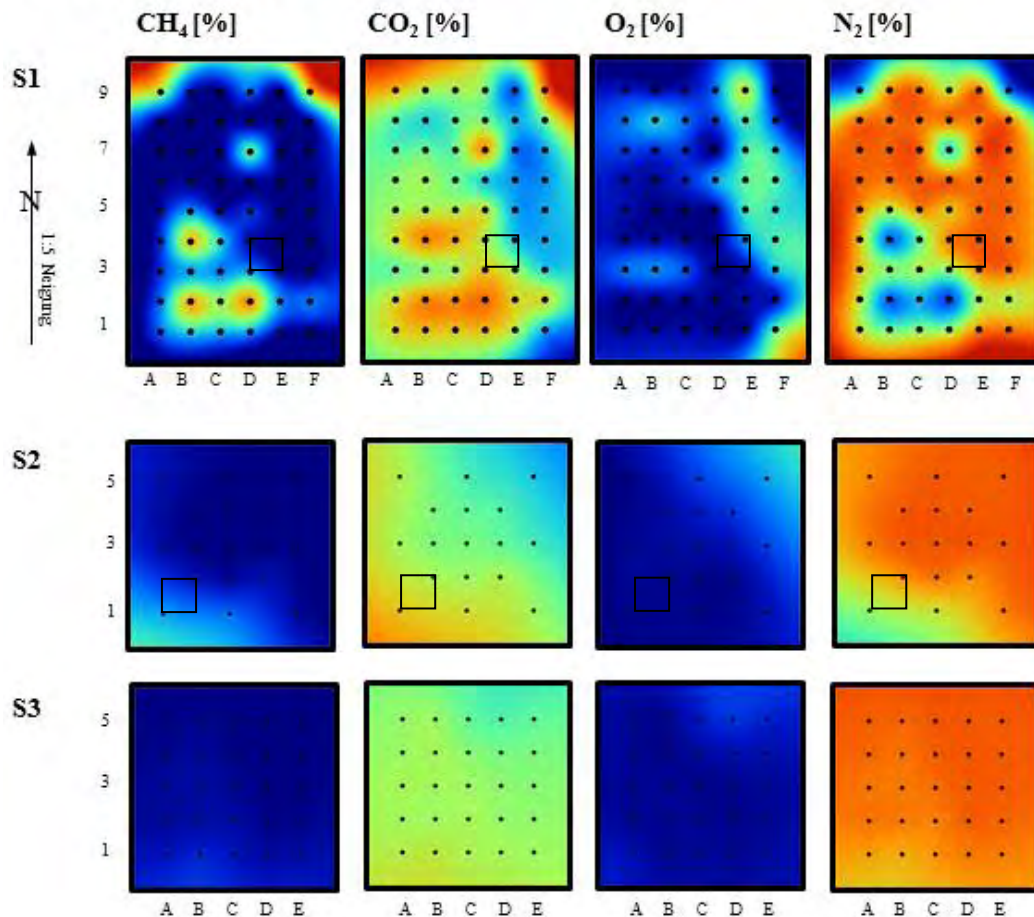


Abbildung 5-8: Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 100 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung). Skalenebene S2 stellt den Bereich zwischen D3, D4, E3 und E4 der Skalenebene S1 dar. Skalenebene S3 stellt den Bereich zwischen A1, A2, B1 und B2 der Skalenebene S2 dar. Skalenebenen S2 und S3 wurden jeweils durch ein schwarzes Quadrat in den Skalenebenen S1 und S2 dargestellt.

Anders sieht es bei der Skalenebene S2 im Juli und einer Tiefe von 100 cm aus. Hier kommt es nicht zu einer solch markanten Variabilität. Die Methan- und Sauerstoffkonzentrationen sind nahezu räumlich gleichmäßig verteilt. Größere Unterschiede treten in Form eines leichten ansteigenden Trends von Gaslanze E5 zu A1 bei den Kohlendioxidkonzentrationen auf. Die Stickstoffkonzentrationen weisen bis auf die Gaslanzen A1 und C1 gleiche Größenordnungen auf. Skalenebene S3 zeigt bei allen Gasen im Juli in der Tiefe von 80 cm (Abbildung 5-9) kaum eine Variabilität untereinander. Anders sieht es in einer Tiefe von 60 cm in Abbildung 5-9 aus.

Die Methan- und Stickstoffkonzentrationen der Skalenebene S3 in Abbildung 5-9 zeigen wieder eine sehr gleichmäßige Verteilung der jeweiligen Gaskonzentration. Die Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen variieren jedoch innerhalb der Skalenebene. So kann bei den Kohlendioxidkonzentrationen eine leichte abnehmende, und bei den Sauerstoffkonzentrationen eine leichte zunehmende Konzentrationsverschiebung von Punkt A1 zu E5 beschrieben werden. Vergleichbar ist Skalenebene S2. Die Methan- und Stickstoffkonzentrationen entsprechen denen der Skalenebene S3. Wieder ist keine größere Variabilität innerhalb der Skalenebene zu erkennen. Anders sieht es bei den Kohlendioxid-

und Sauerstoffkonzentrationen der Skalenebene S2 aus. Die höchsten Kohlendioxidkonzentrationen befinden sich um Punkt A1 und C1. Ein vergleichbares, allerdings entgegengesetztes Muster kann bei den Sauerstoffkonzentrationen beschrieben werden. Die Punkte A1 und C1 weisen mit C2 und D2 die geringsten Sauerstoffkonzentrationen auf.

Juli, Tiefe: 60 cm

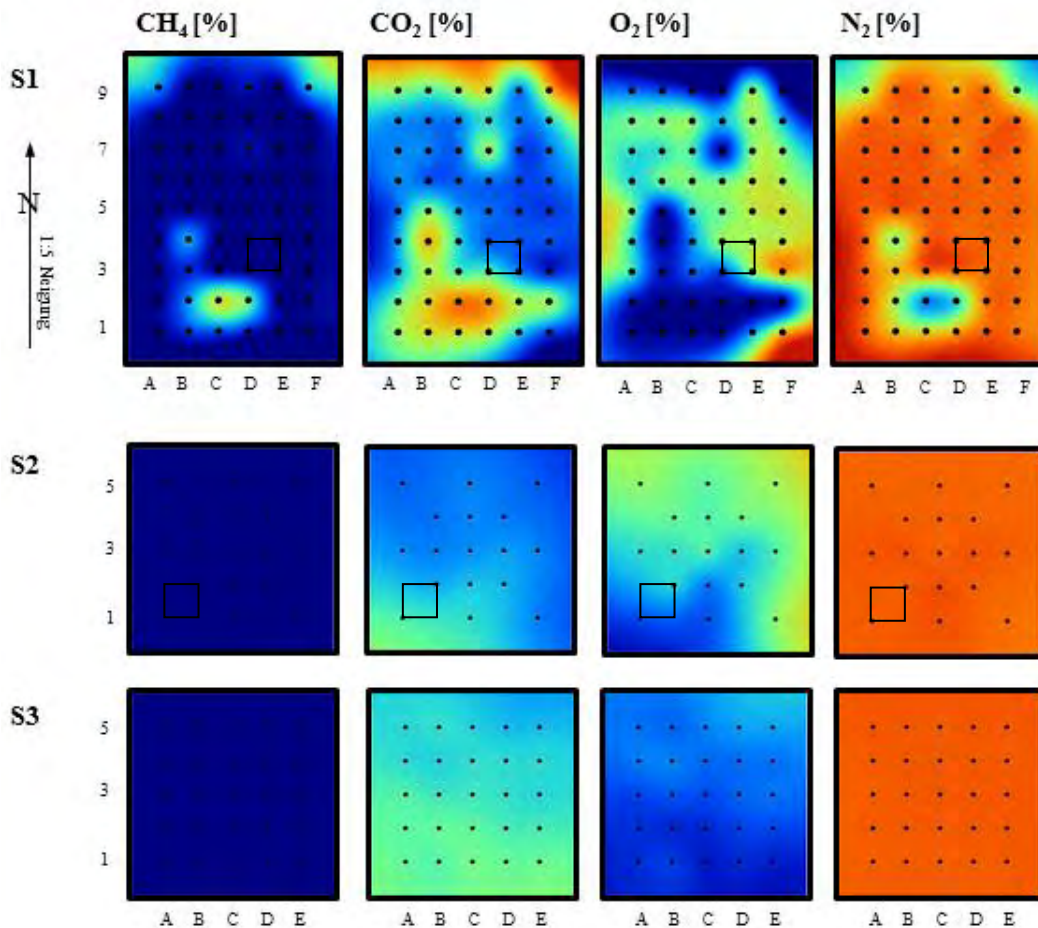


Abbildung 5-9: Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 60 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung). Skalenebene S2 stellt den Bereich zwischen D3, D4, E3 und E4 der Skalenebene S1 dar. Skalenebene S3 stellt den Bereich zwischen A1, A2, B1 und B2 der Skalenebene S2 dar. Skalenebenen S2 und S3 wurden jeweils durch ein schwarzes Quadrat in den Skalenebenen S1 und S2 dargestellt.

Die räumliche Variabilität aller Gase in einer Tiefe von 60 cm ist in der Skalenebene S1 am größten (Abbildung 5-9). Punktuell kann bei den Methankonzentrationen um C2 und D2 ein Bereich mit höheren Methankonzentrationen beschrieben werden. Ebenfalls fallen wieder die Randbereiche am Unterhang durch höhere Konzentrationen auf. Vergleichbar sind wieder die Stickstoffkonzentrationen. Der Bereich um C2 und D2 weist hier die geringsten Stickstoffkonzentrationen auf. Über die restliche Fläche des Testgeländes finden sich nahezu gleiche Stickstoffkonzentrationen. Eine noch stärkere Variabilität findet sich bei den Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen dieser Skalenebene. Im Oberhangbereich kann ein Bereich mit höheren Kohlendioxidkonzentrationen beschrieben, der sich deutlich von denen des restlichen Feldes unterscheidet. Auffällig ist hier der Bereich um die Gaslanzen E1 und F1, der kaum nennenswerte bis gar keine Methankonzentrationen aufweist und der

Bereich am Unterhangbereich der an Punkt F9 ein Maximum an Kohlendioxidkonzentrationen kennzeichnet. Das komplementäre Konzentrationsmuster zeigt der Verlauf der Sauerstoffkonzentrationen. Hier finden sich mit die höchsten Sauerstoffkonzentrationen um Punkt F1.

In der Tiefe von 25 cm zeigen die Sauerstoffkonzentrationen auf der Skalenebene S1 im Juli (Abbildung 5-10) eine stärkere Variabilität der Verteilung verschieden hoher Konzentrationen verteilt über das Testfeld. Auffällig sind die Bereiche am Unterhang an den Punkten A9 und F9 mit sehr geringen Sauerstoffkonzentrationen und zwei Bereiche am Mittel- bzw. Oberhang mit den Punkten um B4 bzw. B1, C1/2 und D2. Methan ist in dieser Tiefe nahezu nicht mehr mit den verwendeten Methoden nachweisbar. Bis auf den Bereich um D2 kommt es zu keinen nennenswerten Konzentrationen. Ähnlich sieht es bei den Stickstoffkonzentrationen aus. Über das gesamte Testfeld, mit der Ausnahme des Bereiches um D2 sind gleichmäßige Konzentrationen zu finden. Die Kohlendioxidkonzentrationen nehmen im Vergleich zu den Gaslanzen in 60 cm Tiefe weiter ab. Dort vorhandene räumliche Muster wie um die Punkte B2, C2 und D2 werden weiter abgeschwächt und sind in 25 cm Tiefe nur noch ausgeprägt um Punkt D2 mit Ausläufern zu C2, B2 zu erkennen.

Juli, Tiefe: 25 cm

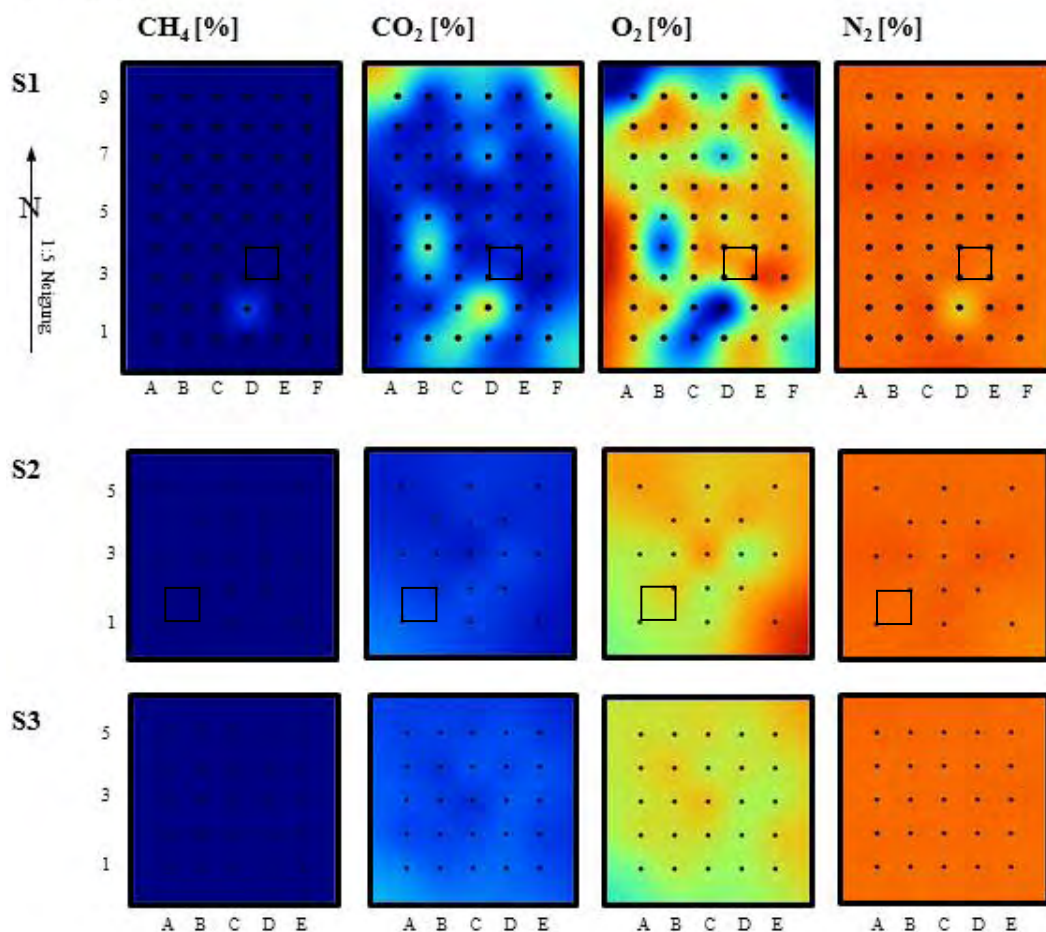


Abbildung 5-10: Gaskonzentration der Rasterlanzen auf den Skalenebenen S1, S2 und S3; Monat: Juli 2013 in 25 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung). Skalenebene S2 stellt den Bereich zwischen D3, D4, E3 und E4 der Skalenebene S1 dar. Skalenebene S3 stellt den Bereich zwischen A1, A2, B1 und B2 der Skalenebene S2 dar. Skalenebenen S2 und S3 wurden jeweils durch ein schwarzes Quadrat in den Skalenebenen S1 und S2 dargestellt.

Die Skalenebenen S2 und S3 spiegeln das Muster der gleichmäßigen Gasverteilung jeweils gut wieder. So kann bei beiden Skalenebenen bei den Methan- und Stickstoffkonzentrationen keine größere Variabilität beschrieben werden. Lediglich die Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen weisen jeweils leichte Veränderungen auf. So liegen bei der Skalenebene S2 im südlichen Bereich der Skalenebene höhere Konzentrationen direkt neben Bereiche niedriger. Auch bei den Kohlendioxidkonzentrationen kann eine leichte Variabilität erkannt werden. Skalenebene S2 spiegelt sehr gut das der Skalenebene S1 zwischen D3, D4, E3 und E4 interpolierte Muster der jeweiligen Gaskonzentrationen wieder.

Die drei Tiefen im Juli miteinander verglichen zeigen bei den Methankonzentrationen mit abnehmender Tiefe eine sich verkleinernde Fläche mit erhöhten Gaskonzentrationen. In einer Tiefe von 25 cm sind keine Methankonzentrationen mehr nachweisbar. Vergleichbar, allerdings invers verhalten sich die Stickstoffkonzentrationen. In 100 cm Tiefe sind über das gesamte Testfeld Bereiche mit niedrigen Stickstoffkonzentrationen zu erkennen, wohingegen in einer Tiefe von 25 cm auf dem gesamten Testfeld nahezu gleichhohe Stickstoffkonzentrationen zu finden sind. Die Sauerstoffkonzentrationen nehmen mit abnehmender Tiefe im Juli von oft nur wenigen bis keinen Prozenten in 100 cm Tiefe bis zu ca. 18 % in einigen Bereichen in einer Tiefe von 25 cm über größere Flächen über das gesamte Testfeld zu. Sowohl bei Methan, Kohlendioxid als auch invers bei Sauerstoff und Stickstoff weisen nur die Flächen höheren Gaskonzentrationen auf, die auch in höheren bzw. geringeren Tiefen höhere Gaskonzentrationen auswiesen. Es kommt mit abnehmender Tiefe zu einer Verkleinerung der Ausdehnung von Bereichen mit höheren Gaskonzentrationen bei Methan und Kohlendioxid und zu einer Vergrößerung der Ausdehnung von Bereichen mit höheren Gaskonzentrationen bei Sauerstoff und Stickstoff. Es kommt bei allen Gasen zu keiner messbaren horizontalen Gasmigration.

Zur besseren Erläuterung und Darstellung der zeitlichen Variabilität werden in Abbildung 5-11 die Gaskonzentrationen der Monate April bis Juli in einer Tiefe von 100 cm zusammenhängend dargestellt.

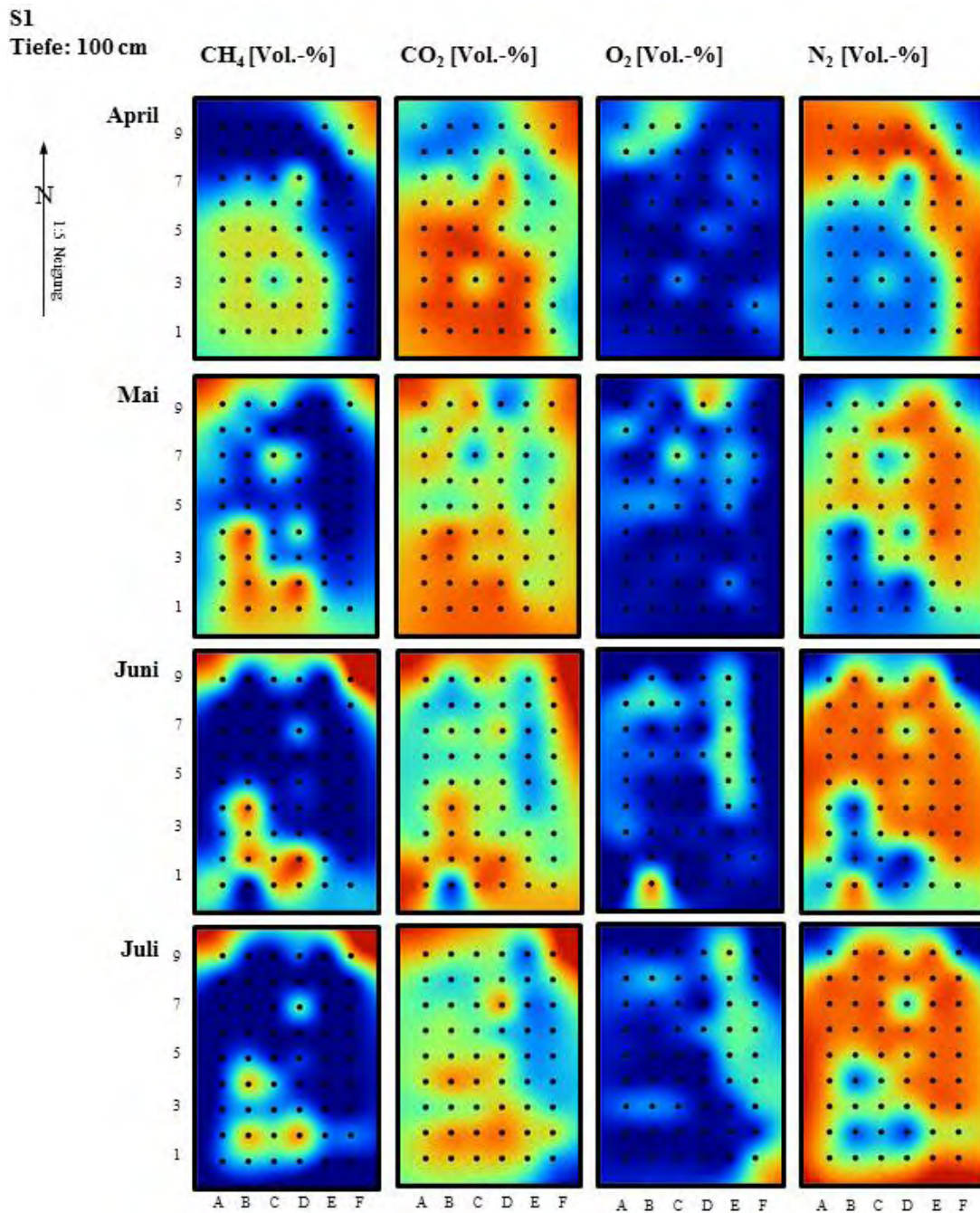


Abbildung 5-11: CH₄, CO₂, O₂- und N₂-Konzentrationen der Rasterlanzen (Skalenebene S1) der Monate April bis Juli 2013 in 100 cm Tiefe (Interpolierte Darstellung)

Über die Dauer von vier Monaten zeigen sich die Veränderungen der jeweiligen Gaskonzentrationen besonders gut. Mit zunehmenden Fortschreiten des Jahres verkleinern sich die Ausdehnungen der höheren Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen. Komplementär dazu vergrößern sich dazu die Flächen der höheren Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen über das Testfeld. Die Methankonzentrationen sind im April nahezu über das gesamte Testfeld gleichmäßig verteilt. Mit fortschreitender Zeit kommt es zur Entstehung von ein / zwei Bereichen, bei denen höhere (auch höhere als im April) Konzentrationen beschrieben werden können. Als räumlich stabile Muster können erhöhte Methankonzentrationen an den Punkten B2 bis D2 und B4 genannt werden. Auffällig ist weiter der Bereich um D7, der sich ebenfalls über die Dauer der Untersuchung durch erhöhte

Methankonzentrationen im Vergleich zum Umfeld ausgezeichnet. Bei den Kohlendioxidkonzentrationen zeichnen sich in einer Tiefe von 100 cm nicht solche eindeutig erkennbaren Bereiche aus. Allerdings kann eine Ansammlung von höheren Konzentrationen über die betrachteten Monate im Oberhangbereich beschrieben werden.

Eine Übersicht zur Streuung der Variabilität der einzelnen Skalenebenen gibt die Abbildung 5-12, in der die Streubreite der Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen der

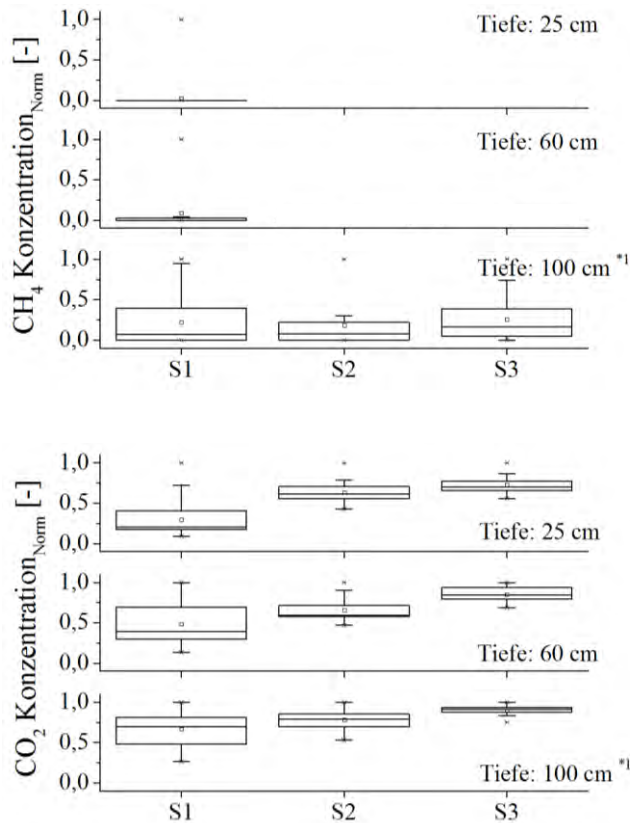


Abbildung 5-12: Variabilität der CH_4 - und CO_2 -Gaskonzentrationen der Skalenebenen S1, S2 und S3 im Juli 2013 aller drei Tiefen. Normierung auf max. auftretende Gaskonzentration. Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. Der Stern markiert das Minimum / Maximum.
*1:Tiefe SkE S3: 80 cm

Messkampagne im Juli für alle drei Tiefen und Skalenebenen normiert auf den jeweils höchsten Wert aufgetragen werden. Wie bei der Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-11 beschrieben, kann hier teilweise sehr gut die höhere Variabilität der Methankonzentrationen der Skalenebene S1 in der Tiefe von 100 cm im Vergleich zu den Skalenebenen S2 und S3 beschrieben werden. In geringeren Tiefen ist aufgrund von Methankonzentrationen um 0 Vol.-% keine Variabilität zu erkennen.

Bei den Kohlendioxidkonzentrationen kann eine ähnliche Verteilung beschrieben werden. Skalenebene S1 weist in allen drei Tiefen eine höhere Variabilität als auf den Skalenebenen S2 und S3 auf.

Weiter kann eine höhere Variabilität in einer Tiefe von 100 cm der Skalenebene S2 gegenüber Skalenebene S3 beschrieben werden. Die Variabilität in 60 und 25 cm Tiefe ist nicht eindeutig unterscheidbar.

Abbildung 5-13 gibt eine Übersicht der Variabilität der Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen der Messkampagne im Juli für alle drei Tiefen und Skalenebenen.

In 100 cm Tiefe kann ein eindeutiger Trend zur Abnahme der Variabilität ausgehend von der Skalenebene S1 über Skalenebene S2 hin zur Skalenebene S3 erkannt werden. In einer Tiefe

von 60 cm trägt Skalenebene S1 den größten Anteil an der Variabilität. Zwischen den Skalenebenen S2 und S3 kommt es wie bei den Kohlendioxidkonzentrationen zu einem leichten Unterschied zwischen den Konzentrationsbereichen. In der Tiefe von 25 cm liegen

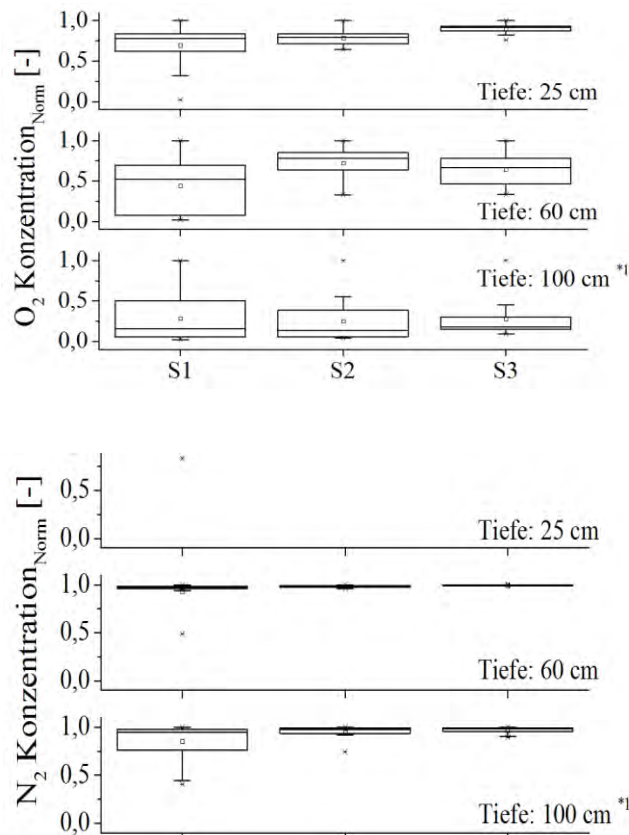


Abbildung 5-13: Variabilität der O_2 - und N_2 -Gaskonzentrationen der Skalenebenen S1, S2 und S3 im Juli 2013 aller drei Tiefen. Normierung auf max. auftretende Gaskonzentration. Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. Der Stern markiert das Minimum / Maximum. *1:Tiefe SkE S3: 80 cm

drei Tiefen und der drei Skalenebenen.

die Streuungen enger als in den anderen Tiefen beieinander. Die Stickstoffkonzentrationen weisen in einer Tiefe von 100 cm ebenfalls eine Abnahme der Variabilität der Konzentrationsbereiche ausgehend von der Skalenebene S1 über Skalenebene S2 hinüber zur Skalenebene S3 auf. In den Tiefen 60 und 25 cm kann ein Trend in dieser Auflösung nur vermutet werden.

Die Variabilität von Eigenschaften wird häufig über die Standardabweichung (SD) oder diese als Variabilitätskoeffizient (Vk) auf den jeweiligen Mittelwert normiert beschrieben. Tabelle 5-5 gibt eine Übersicht der Variabilitätskoeffizient der verschiedenen Gaskonzentrationen über die

Tabelle 5-5: Skalenebenen S1, S2, S3: Variabilitätskoeffizienten der Gaskonzentrationen im Juli 2013. Fett markiert sind der Annahme $Vk_{S1} > Vk_{S2} > Vk_{S3}$ je Tiefe, kursiv der Annahme $Vk_{S1;25} > Vk_{S1;60} > Vk_{S1;100}$ für Methan und Kohlendioxid (für Sauerstoff und Stickstoff invertierte Vorzeichen) widersprüchliche Werte.

Tiefe [cm]	Juli								
	S1			S2			S3		
	25	60	100	25	60	100	25	60	80
CH_4	6,6876	2,2899	1,2971	0 ⁸	0 ⁸	1,5110	0 ⁸	0 ⁸	1,0002
CO_2	0,6458	0,4894	0,3086	0,1615	0,1003	<i>0,1314</i>	0,0933	0,0930	0,0647
O_2	0,3362	0,7021	0,9126	0,0933	0,1323	0,8968	0,0433	0,2318	0,8500
N_2	0,0239	0,1171	0,2085	0,0104	<i>0,0080</i>	0,2160	0,0022	0,0022	0,0173

⁸ Alle untersuchten Gaslanzen in dieser Tiefe wiesen keine Methankonzentrationen auf. Um den Variabilitätskoeffizienten berechnen zu können, muss der Mittelwert von Null verschieden sein.

Aufgrund der räumlichen Größe der Skalenebenen sollte der Variabilitätskoeffizient folgender Überlegung entsprechen: $Vk_{S1} > Vk_{S2} > Vk_{S3}$. Da ein Einfluss der Position der Gas-Inlets, welche in die Gasverteilungsschicht münden, auf die Bodengaskonzentrationen nicht gegeben sein sollte, ist mit abnehmender Bodentiefe ein immer größerer Einfluss der Umgebungsparameter zu vermuten und der Boden zunehmend durch Bereiche unterschiedlicher Zusammensetzung (Wassergehalte, etc.) oder physikalischer Gegebenheiten (Eindringwiderstand, Einfluss auf Makroporen, etc.) gekennzeichnet. Mit abnehmender Tiefe kommt zudem noch die zunehmende Belüftung. Für die abnehmende Bodentiefe gilt somit die Annahme: $Vk_{S1;25} > Vk_{S1;60} > Vk_{S1;100}$. Für Sauerstoff und Stickstoff gelten die Vorzeichen für diese Annahme invertiert.

Die fettgedruckten Werte markieren die Variabilitätskoeffizienten der Gas-Konzentrationen, die der Annahme $Vk_{S1} > Vk_{S2} > Vk_{S3}$ nicht entsprechen. Es treten zweifach Variabilitätskoeffizienten auf Skalenebene S2 in einer Tiefe von 100 cm auf, die größer als die auf Skalenebene S1 sind. In der Tiefe von 60 cm der Skalenebene S3 kommt es einmal zur Überschreitung des Variabilitätskoeffizient der Skalenebene S2. Keines der Variabilitätskoeffizienten der Skalenebene S3 ist größer als der entsprechende Variabilitätskoeffizienten von Skalenebene S1. Der Annahme $Vk_{S1} > Vk_{S2} > Vk_{S3}$ wird von allen drei Tiefen nur von Kohlendioxid entsprochen, nicht aber von Methan, Sauerstoff und Stickstoff. Lediglich Variabilitätskoeffizienten der Gas-Konzentrationen in einer Tiefe von 25 cm entsprechen in allen geprüften Konstellationen der angenommenen Reihung. Hierzu liegen allerdings auf den Skalenebenen S2 und S3 Bereiche ohne detektierbare Methankonzentrationen vor.

Der Annahme $Vk_{S1;25} > Vk_{S1;60} > Vk_{S1;100}$ für Methan und Kohlendioxid bzw. $Vk_{S1;25} < Vk_{S1;60} < Vk_{S1;100}$ für Sauerstoff und Stickstoff entsprechen alle Wertepaare mit Ausnahme der Kohlendioxidkonzentrationen in 100 cm Tiefe auf Skalenebene S2 und der Stickstoffkonzentrationen in 60 cm Tiefe ebenfalls auf Skalenebene S2; kursiv markiert in Tabelle 5-5.

Fehlende Methankonzentration auf den Skalenebenen S2 und S3 erlauben keine Aussage zur räumlichen Variabilität. Die im April erhobenen Daten lassen jedoch Rückschlüsse auf das Verhältnis der Variabilität der Gaskonzentrationen zwischen den Skalenebenen S1 und S2 zu:

Tabelle 5-6: Skalenebenen S1, S2: Variabilitätskoeffizienten der Gaskonzentrationen im April 2013. Fett markiert sind der Annahme $Vk_{S1} > Vk_{S2} > Vk_{S3}$ je Tiefe, kursiv der Annahme $Vk_{S1;25} > Vk_{S1;60} > Vk_{S1;100}$ für Methan und Kohlendioxid (für Sauerstoff und Stickstoff invertierte Vorzeichen) widersprüchliche Werte.

	April					
	S1			S2		
Tiefe [cm]	25	60	100	25	60	100
CH ₄	1,5043	1,0971	0,7700	0,9521	0,1292	0,0447
CO ₂	0,8332	0,5952	0,4036	0,3981	0,0356	0,0119
O ₂	0,7147	1,3430	<i>1,1196</i>	0,8376	0,3768	0,4491
N ₂	0,2083	0,2941	0,3247	0,2320	0,1077	0,0341

Ebenfalls im April ist die Variabilität abhängig von der Größe der Skalenebene. Die Methan-

und Kohlendioxidkonzentrationen entsprechen vollständig dem Kriterium $V_{K_{S1}} > V_{K_{S2}}$. Die Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen weisen bis auf zwei Werte in einer Tiefe von 25 cm, in der die Variabilitätskoeffizienten auf Skalenebene S2 größere als auf Skalenebene S1 sind, größere Variabilitätskoeffizienten auf Skalenebene S1 als auf Skalenebene S2 auf. Auf eine Untersuchung der Variabilitätskoeffizienten von Skalenebene S3 muss zu diesem Zeitpunkt verzichtet werden, da die Lanzen erst im Juli 2013 gesetzt wurden.

Zur Prüfung auf vorhandene, sich gleich verhaltene Bereiche im Bezug zu den Gaskonzentrationen auf dem Testfeld (Gruppen), wurden die Methankonzentrationen der einzelnen Hangbereiche bzw. Reihen (1 bis 9) und Spalten (A bis F) der Skalenebene S1 in verschiedenen Kombinationen mittels mehrerer „Analysis of Variance“ (ANOVA) mit anschließendem Post-hoc-Test (HSD⁹ für ungleiches n) untersucht. Als Datengrundlage wurden jeweils die Methankonzentrationen in 100 cm Tiefe aufgrund der anzunehmenden geringsten äußeren Einflüsse der Monate April bis Juli verwendet; graphische Darstellung siehe Abbildung 5-11.

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Signifikanztests für unterschiedliche Gruppierungen von Testfeldbereichen je Monat für Methankonzentrationen in 100 cm Tiefe auf Skalenebene S1. (Angabe des Mittelwertes mit Ergebnissen des Post-hoc-Test (HSD) bei $p < 0,05$ in Indizes a und b.) Signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind fett markiert.

Lfd. Nr.	Reihen / Spalten	April	Mai	Juni	Juli
1	1 – 3	26,69^a	26,17^a	20,28^a	15,16^a
	4 – 9	14,29^b	10,73^b	6,24^b	5,77^b
2	1 – 4	26,34^a	24,16^a	18,19^a	14,19^a
	5 – 9	12,42^b	9,70^b	5,50^b	4,67^b
3	1 – 5	25,46^a	20,29^a	15,21^a	12,38^a
	6 – 9	9,85^b	10,77^b	5,93^b	4,55^b
4	1 – 6	24,09^a	18,01 ^a	12,61 ^a	10,35 ^a
	7 – 9	8,03^b	12,02 ^a	7,90 ^a	6,01 ^a
5	1 – 7	22,14^a	17,06 ^a	11,28 ^a	9,46 ^a
	8, 9	6,34^b	12,28 ^a	10,09 ^a	6,93 ^a
6	A, F, 1, 9	15,45 ^a	17,26 ^a	11,79 ^a	7,53 ^a
	B – E, 2 – 8	21,07 ^a	14,83 ^a	10,31 ^a	10,17 ^a
7	A – C	20,86 ^a	21,98^a	12,63 ^a	10,73 ^a
	D – F	16,08 ^a	10,20^b	9,45 ^a	7,08 ^a
8	A – D	21,53^a	20,89^a	13,19 ^a	11,41^a
	E, F	12,22^b	6,43^b	6,76 ^a	3,89^b
9	A – E	20,06 ^a	17,66 ^a	11,37 ^a	9,57 ^a
	F	10,79 ^a	7,73 ^a	9,23 ^a	5,56 ^a

Die unter den lfd. Nummern 1 bis 3 beschriebenen Gruppierungen unterscheiden sich an allen Messterminen signifikant hinsichtlich der Methankonzentrationen in 100 cm Tiefe. Am Oberhang gelegene Bereiche verhalten sich damit anders als am Unterhang gelegene Bereiche; der Mittelwert liegt signifikant oberhalb der des Unterhanges. Zur Auswahl der geeignetsten Unterteilung wird die mittlere Quadratsumme (MQ) mit berücksichtigt. Die MQ entspricht nach Bortz (2005) der Varianz und somit der Homogenität der überprüften

⁹ HSD: „Honestly Significant Difference“

Gruppe. Je kleiner MQ desto homogener die geprüfte Gruppe. Die geringste Variabilität im Durchschnitt der MQ ($\bar{\varnothing}_{MQ}$) zeigen die Unterteilungen des Testfeldes in zwei Gruppen der Variante 2 ($\bar{\varnothing}_{MQ} = 138,77$) mit einem Oberhangbereich von Reihe 1 bis 4 und der Variante 1 ($\bar{\varnothing}_{MQ} = 141,22$) mit einem Oberhangbereich von Reihe 1 bis 3; die restlichen Reihen bilden jeweils den Unterhangbereich. Statistisch signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den überprüften Gruppen dieser beiden Varianten bestehen in allen überprüften Monaten (April bis Juli). Die Daten lassen auf eine Verschiebung der Gruppenbildungsgrenze in Richtung des Oberhangbereiches im Untersuchungszeitraum von April zu Mai bis Juli schließen. Im April sind statistisch signifikant unterschiedliche Mittelwerte des Oberhanges bis hin einschließlich Reihe 7 zu finden, wohingegen ab Mai diese Grenze zwischen Ober- und Unterhang bis einschließlich Reihe 5 zu finden ist.

Daraufhin wurden zur Prüfung der Frage, ob sich Ober- und Unterhang bzgl. der weiteren Bodengaszusammensetzung in allen Tiefen und aller Gaskonzentrationen über alle Messtermine hin signifikant unterscheiden, die Gaskonzentrationen nach Unterteilung der Variante 2 über die Reihen 1 bis 4 sowie 5 bis 9 dem Ober- bzw. Unterhangbereich zugeordnet (Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15). Auf eine entsprechende Unterteilung der S2 und S3 wurde aufgrund der gegenüber Skalenebene S1 geringeren Variabilität verzichtet. Die Gruppenbildung wurde sowohl auf die Tiefen 60 und 25 cm als auch auf die Gase Kohlendioxid, Sauerstoff und Stickstoff übertragen. Tabelle 5-8 zeigt die Ergebnisse der Signifikanztests für die Gruppierungen der Gaskonzentrationen je Tiefe und Monat auf Ober- und Unterhang auf Skalenebene S1 auf.

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Signifikanztests für die Gruppierung der Gaskonzentrationen je Tiefe und Monat auf Ober- und Unterhang auf Skalenebene S1. (Angabe des Mittelwertes mit Ergebnissen des Post-hoc-Test (Tukey) bei $p < 0,05$ in Indizes a und b.) Signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind fett markiert.

Tiefe:	CH ₄			CO ₂			O ₂			N ₂		
	25	60	100	25	60	100	25	60	100	25	60	100
April												
OH	13,58 ^a	21,66 ^a	26,34 ^a	17,88 ^a	23,43 ^a	25,21 ^a	6,12 ^a	2,54 ^a	1,42 ^a	62,42 ^a	52,37 ^a	47,03 ^a
UH	2,73 ^b	5,72 ^b	12,42 ^b	6,62 ^b	12,31 ^b	17,54 ^b	12,46 ^b	5,46 ^b	3,52 ^b	78,19 ^b	76,51 ^b	66,52 ^b
Mai												
OH	4,46 ^a	14,61 ^a	24,16 ^a	12,04 ^a	19,27 ^a	23,90 ^a	9,35 ^a	4,01 ^a	1,13 ^a	74,15 ^a	62,10 ^a	50,81 ^a
UH	0,11 ^b	1,42 ^b	9,70 ^b	5,64 ^b	11,83 ^b	18,17 ^b	15,55 ^b	9,55 ^b	4,84 ^b	78,70 ^b	77,20 ^b	67,29 ^b
Juni												
OH	2,10 ^a	9,65 ^a	18,19 ^a	9,56 ^a	16,13 ^a	20,16 ^a	10,51 ^a	5,11 ^a	2,51 ^a	77,83 ^a	69,10 ^a	59,14 ^a
UH	0,14 ^b	1,83 ^b	5,50 ^b	5,23 ^b	10,08 ^b	16,11 ^b	15,23 ^b	10,06 ^b	4,66 ^b	79,40 ^a	78,03 ^b	73,73 ^b
Juli												
OH	0,38 ^a	5,15 ^a	14,19 ^a	7,18 ^a	15,10 ^a	19,79 ^a	12,66 ^a	5,49 ^a	2,71 ^a	79,78 ^a	74,25 ^a	63,31 ^a
UH	0,02 ^a	1,31 ^b	3,62 ^b	5,51 ^a	10,62 ^b	15,33 ^b	13,44 ^a	8,93 ^b	4,97 ^b	81,03 ^b	79,14 ^b	76,08 ^b

Bis auf wenige Ausnahmen bestehen zwischen allen gebildeten Gruppen signifikante Unterschiede der Mittelwerte. Die gebildeten Hangbereiche verhalten sich somit unterschiedlich. Die vier Ausnahme sind alle in einer Tiefe von 25 cm zu finden: im Juli Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff; im Juni Stickstoff. Es kann somit in dem betrachteten Zeitraum mindestens in den Tiefen 60 und 100 cm von einer signifikanten Teilung der Testfeldfläche in einen Ober- und Unterhang gesprochen werden.

Die Variabilität der Konzentration von Methan und Kohlendioxid wird in Abbildung 5-14, Sauerstoff und Stickstoff in Abbildung 5-15 dargestellt.

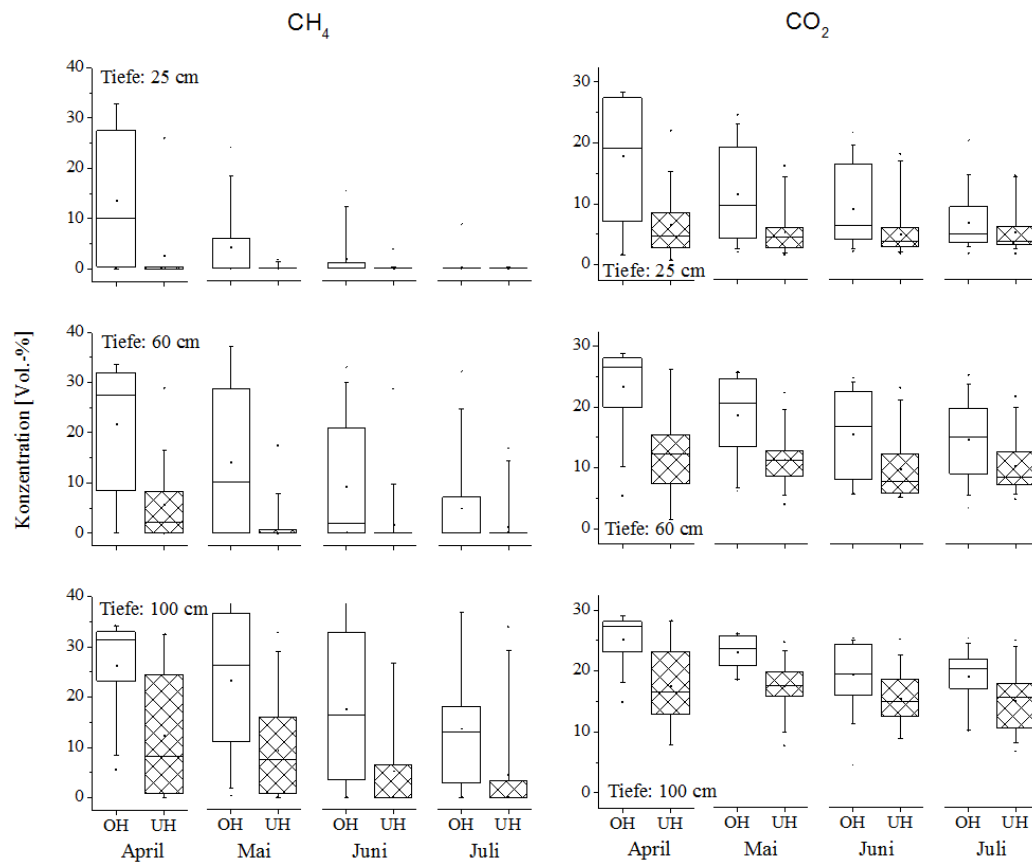


Abbildung 5-14: Variabilität der CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen im Ober- (OH) und Unterhangbereich (UH) auf Skalenebene S1 April bis Juli 2013 (Gruppenbildung: nach Tabelle 5-7, lfd. Nr. 2). Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. Der Stern markiert das Minimum / Maximum.

Über alle Tiefen und den gesamten betrachteten Zeitraum sind sowohl bei den Methan- als auch bei den Kohlendioxidkonzentrationen deutlich höhere Konzentrationen im Oberhangbereich (OH) als im Unterhangbereich (UH) zu erkennen. Mit der Zeit von April bis Juli kommt es zu einer Abnahme beider Konzentrationsbereiche. Bis in den Juni sind noch relativ oberflächennah Methankonzentrationen in einer Tiefe von 25 cm im Oberhangbereich festzustellen, wohingegen im Unterhangbereich diese kaum detektierbar sind. Ebenfalls im April sind diese nur gering im Unterhangbereich festzustellen. Von April bis Juli verringert sich die Differenz der Mediane des Ober- und Unterhangs der Methankonzentrationen in einer Tiefe von 100 cm zunehmend. Besonders die Streubreite der Konzentrationen am Unterhang wird zunehmend geringer. In den Tiefen 60 und 25 cm kann ein ähnlicher Effekt erkannt werden. Die Mediane verringern sich mit abnehmender Tiefe der Lanzen, bis sie in einer Tiefe von 25 cm gegen null gehen. Die Methankonzentrationen des Unterhangs liegen in allen untersuchten Tiefen und Monaten unter der des Oberhangs, bzw. laufen beide gegen Null. Eine abnehmende Konzentration mit zunehmender Höhe kann auch bei den Kohlendioxidkonzentrationen beschrieben werden. Generell liegen die Kohlendioxidkonzentrationen des Oberhangs und des Unterhangs näher beieinander als

die der Methankonzentrationen. Über die Zeit kann auch bei den Kohlendioxidkonzentrationen über alle Tiefen des Oberhangs und in 100 cm des Unterhangs ein Rückgang zumindestens des 75 Perzentils beobachtet werden.

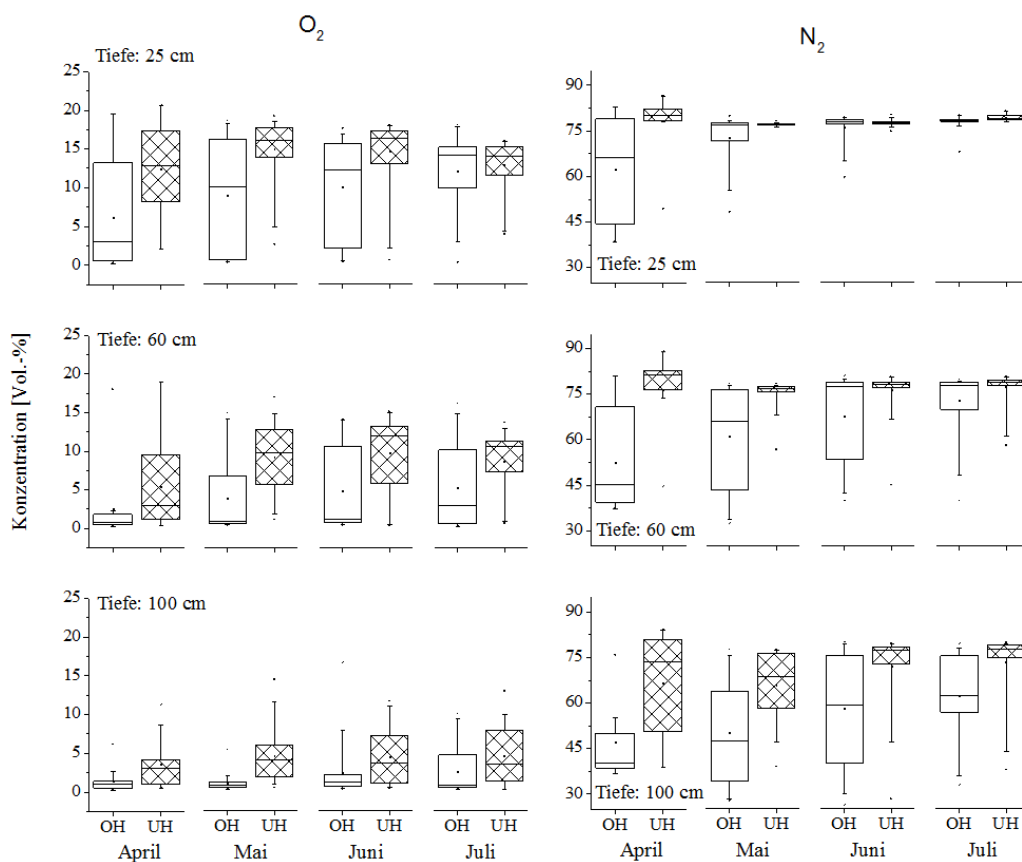


Abbildung 5-15: Variabilität der O_2 - und N_2 -Konzentrationen im Ober- (OH) und Unterhangbereich (UH) auf Skalenebene S1 April bis Juli 2013 (Gruppenbildung nach Tabelle 5-7, lfd. Nr. 2). Die Box umschließt die Perzentile von 25 bis 75 %. Die Trennlinie zeigt den Median. Die Whisker zeigen den Bereich von 1 bis 99 % auf. Die Kästchen markieren das arithmetische Mittel. Der Stern markiert das Minimum / Maximum.

Die Sauerstoffkonzentrationen und Stickstoffkonzentrationen zeigen ein der Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen komplementäres Bild. Die höchsten Sauerstoffkonzentrationen aller Tiefen werden in einer Tiefe von 25 cm gemessen. Die Konzentrationen am Unterhang sind höher als die des Oberhangs; eine Ausnahme bilden die Sauerstoffkonzentrationen in 25 cm Tiefe im Juli, die sich nahezu entsprechen. Mit der Zeit kommt es besonders in 100 cm Tiefe zu einem Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen im Unterhangsbereich. Der Median der Sauerstoffkonzentrationen des Unterhangs aller Tiefen liegt oberhalb der des Oberhangs, mit Ausnahme der Tiefe von 25 cm im Juli wo Oberhang und Unterhang etwa gleich auf liegen. Auffällig sind auch hier die relativ hohen Streubreiten der Sauerstoffkonzentrationen der verschiedenen Tiefen. Am Oberhang beträgt die absolute Streubreite in 100 cm Tiefe ca. 3 Vol.-% wohingegen im gleichen Zeitraum in einer Tiefe von 25 cm ca. 20 Vol.-% erreicht werden. Dieses Phänomen kann bei allen vier Gasen beschrieben werden.

Die höchsten Stickstoffkonzentrationen aller Tiefen werden in den Tiefen 25 cm und 60 cm gemessen. Wieder unterscheiden sich die Konzentrationen des Ober- und Unterhangs, indem durchgängig die höheren Stickstoffkonzentrationen im Unterhangbereich berechnet wurden. Mit der Zeit kommt es zu einer Verschiebung der Stickstoffkonzentrationen des Oberhangbereiches in Richtung der des Unterhangbereiches. Die steigenden Konzentrationen weisen auf eine bessere Durchlüftung des Oberhangbereiches mit der Zeit hin. Der Median der Stickstoffkonzentrationen des Unterhangs aller Tiefen liegt mindestens auf gleicher Höhe oder oberhalb der des Oberhangs. Im Gegensatz zu den Sauerstoffkonzentrationen bewegen sich die Streubreiten eher im moderaten Bereich und unterschreiten die der Sauerstoffkonzentrationen in den meisten Fällen.

Einflussfaktoren auf eine Verschiebung der jeweiligen Gaskonzentrationen sollen im folgenden Abschnitt untersucht werden.






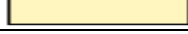

















5.5 Variabilität der Gasfracht und Methanoxidationseffizienz

Die alleinige Aufnahme der Verteilung der Gaskonzentrationen über das gesamte Testfeld ermöglicht noch keine Aussage über die tatsächlich anstehende Fracht bzw. eine Beurteilung der Methanoxidationseffizienz für einen gewissen Bereich. Um Aussagen hierzu zu treffen, ist es nötig, mit Kenntnis der Methan- und Kohlendioxidkonzentration des in das Testfeld einströmenden Gases über die Methan- und Kohlendioxidemission auf die Fracht bzw. Methanoxidationseffizienz zurückzurechnen (Christophersen et al. 2001), siehe Kapitel 4.3. Die Messung der Emissionen erfolgte nach der in Kapitel 4.2.2.3. beschriebenen Methode. Aufgrund der Testfeldgröße wurden die Emissionen nicht an allen 60 Rasterfeldern der Skalenebene S1 bestimmt, sondern an denjenigen 21 Feldern, deren summierte Emission aus der Kenntnis vergangener Messkampagnen 95 % der Gesamtemission entspricht. Zusätzlich wurde die Emission von weiteren 30 % der verbleibenden 39 Rasterfelder bestimmt. Die Position dieser so genannten variablen Rasterfelder rotiert von Kampagne zu Kampagne. Eine Ausnahme stellt die Messkampagne im Mai dar. Hier wurden die Emissionen der gesamten Testfeldfläche aufgenommen. Die Emissionen der Skalenebene S2 wurden jeweils von allen 25 Rasterfeldern dieser Skalenebene gemessen.

Hinsichtlich ihrer räumlichen Variabilität untersucht wurden jeweils die Methanfracht, -oxidationseffizienz, -emission und die Kohlendioxidemission der Monate April, Mai, Juni und Juli 2013 der Skalenebenen S1 und S2. Abbildung 5-16 stellt Ergebnisse der Monate April bis Juli der Skalenebene S1, Abbildung 5-17. die der Skalenebene S2 dar. Überprüfte Rasterfelder werden farblich dargestellt. Weiße bzw. farblose Bereiche kennzeichnen Messwerte, die für die Auswertung aufgrund von Messfehlern o. ä. nicht verwendet werden konnten oder Bereiche deren Emissionen nicht gemessen wurden.

Tabelle 5-9 zeigt die farblichen Zuordnungen der einzelnen Konzentrationsbereiche auf.

Tabelle 5-9: Legenden für Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17: Methanfracht, -emission, -oxidationseffizienz und Kohlendioxidemission¹⁰

		Skalenebene S1	Skalenebene S2
CH₄-Fracht [g m ⁻² d ⁻¹]		70 < 84	3,33 < 4
		56 < 70	2,67 < 3,33
		42 < 56	2 < 2,67
		28 < 42	1,33 < 2
		14 < 28	0,67 < 1,33
		0 < 14	0 < 0,67
CH₄-Emission [g m ⁻² d ⁻¹]		20 < 24	1,25 < 1,5
		16 < 20	1 < 1,25
		12 < 16	0,75 < 1
		8 < 12	0,5 < 0,75
		4 < 8	0,25 < 0,5
		0 < 4	0 < 0,25
CO₂-Emission [g m ⁻² d ⁻¹]		275 < 330	10 < 12
		220 < 275	8 < 10
		165 < 220	6 < 8
		110 < 165	4 < 6
		55 < 110	2 < 4
		0 < 55	0 < 2
CH₄- Oxidationseffizienz [%]		80 < 100	
		60 < 80	
		40 < 60	
		20 < 40	
		0 < 20	

¹⁰ Ein laminiertes Ausdruck zur direkten Verwendung liegt dieser Arbeit im Anhang I bei.

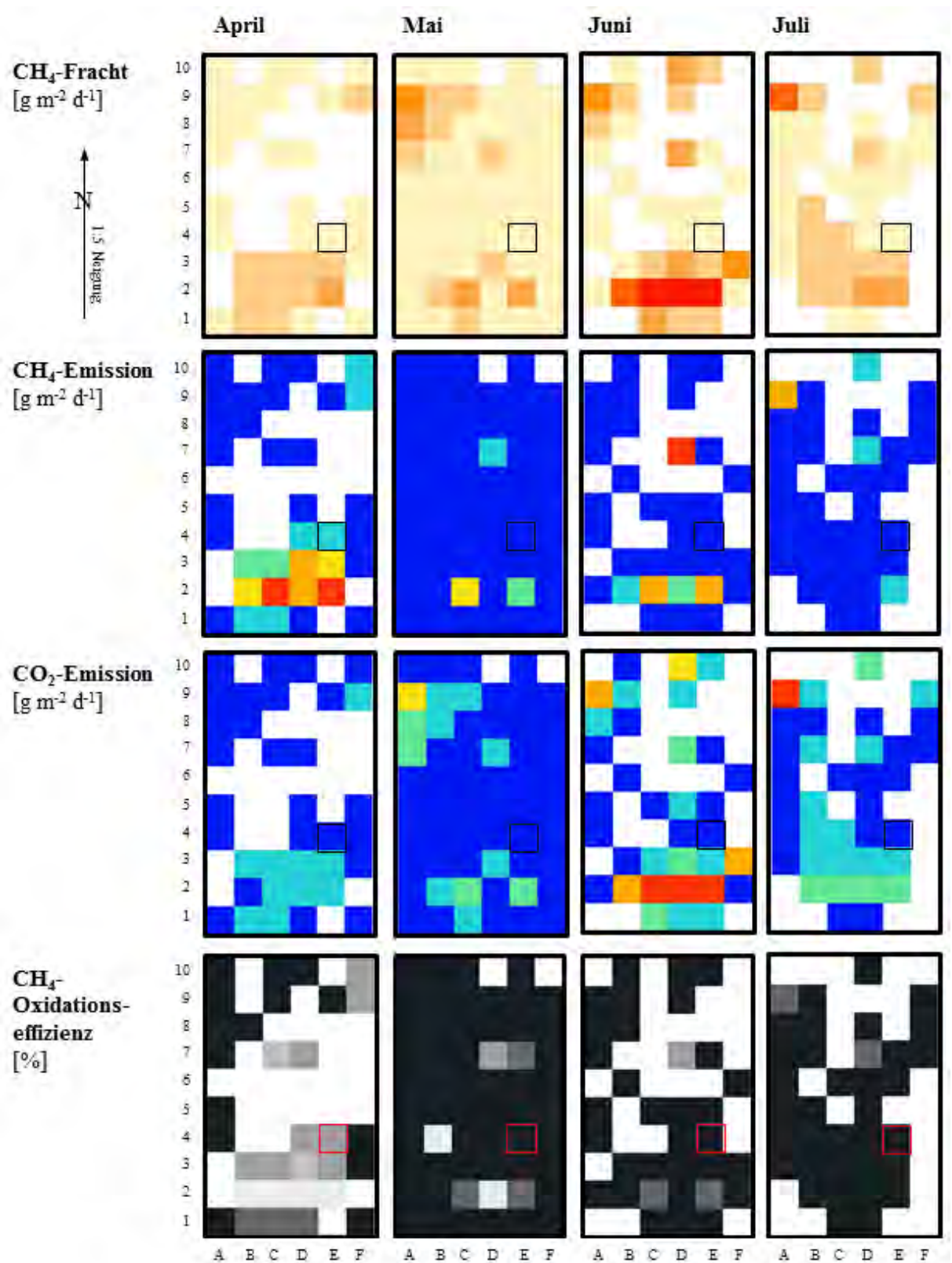


Abbildung 5-16: Methanfracht, -oxidationseffizienz, -emission und Kohlendioxidemission der Monate April, Mai, Juni und Juli auf der Skalenebene S1 von April bis Juli 2013 mit Markierung der Skalenebene S2 (Quadrat).

Die farbliche Darstellung der Methanfrachten für das gesamte Testfeld (Abbildung 5-16) lässt bereits auf eine unterschiedliche Befruchtung schließen. Zu allen vier Messterminen kommt es zu höheren Methanbefruchtungen in Bereichen des Oberhangs (Reihen 2 bis 3).

So weisen im April besonders die Reihen 2 bis 3 erhöhte Methanbefruchtungen auf. Reihe 1 weist trotz der Lage außerhalb der Auffangwanne teilweise leicht erhöhte Befruchtung auf. Im April folgen die Methan- und Kohlendioxidemissionen dem Muster der Methanbefruchtung. Bereiche höherer Methan- und Kohlendioxidemissionen sind im Bereich des Oberhanges die Reihen 2 und 3. Auch das Rasterfeld F9 weist nach höherer Methanbefruchtung erhöhte Methan- und Kohlendioxidemissionen auf. Starke Methanemissionen konnten während der Messkampagne im April besonders auf den Feldern C2 und E2 beobachtet werden. Bereiche hoher Methanoxidationseffizienz sind nahezu alle Rasterfelder, die in einem Methanfrachtfenster von 0 bis $14 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, also im unteren Bereich liegen. Bereiche mit höheren Methanfrachten weisen geringere Methanoxidationseffizienzen auf. Einer Annahme von geringerer Oxidation bei höherer Fracht entsprechen nach dieser Einteilung nicht die Rasterfelder C7 und D7. Trotz geringerer Methanfrachten von 0 bis $14 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ weisen diese eine Oxidationseffizienz von 20 bis 40, bzw. 40 bis 60 % auf.

Im Mai werden die Oberhangbereiche mit einer stärkeren Befruchtungen im April zum Teil bestätigt, zusätzlich kommt es um A9 mit den angrenzenden Feldern im Unterhangbereich ebenfalls zu erhöhten Methanfrachten. Das Muster der Methanbefruchtung findet sich bei den Methanemissionen bis auf dem Bereich um A9 und den angrenzenden Feldern im Unterhangbereich wieder. Insgesamt kommt es über das gesamte Testfeld gesehen zu sehr geringen Methanemissionen von 0 bis $4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Ausnahmen sind hier die Rasterfelder C2 und E2, die ebenfalls durch höhere Methanbefruchtungen auffallen und bereits im April für erhöhte Methanemissionen sorgten. Erhöhte Kohlendioxidemissionen finden sich auf allen Rasterfeldern die einer erhöhten Methanbefruchtung ausgesetzt waren. Die Oxidationseffizienz liegt über das gesamte Testfeld gesehen sehr hoch bei nahezu durchgehenden 100 %. Eine Ausnahme bilden hier wieder die Rasterfelder C2 und E2, und Rasterfeld D7, welches ebenfalls durch eine dem Umfeld erhöhte Methanfracht auffällt.

Im Juni kommt es während der viermonatigen Untersuchung zu den stärksten Methanbefruchtungen. Berücksichtigt werden muss hier die erhöhte Methangesamtfracht auf das Testfeld, die im Juni um ca. 15 % erhöht wurde. Bereiche erhöhter Methanbefruchtung sind besonders in Reihe 2, aber auch einzeln über das gesamte Testfeld zu verzeichnen. Die Rasterfelder der Reihe 2 finden sich ebenfalls bei den Methan- und Kohlendioxidemissionen mit erhöhten Emissionswerten wieder. Erhöhte Methanemissionen finden sich ansonsten auf dem ebenfalls mit erhöhter Methanfracht beaufschlagten Rasterfeld D7 wieder. Alle anderen Rasterfelder liegen in einem Methanemissionsbereich von $0 < 4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Hohe Kohlendioxidemissionen weisen im Oberhangbereich Rasterfelder mit hohen Methanfrachten, aber auch vereinzelt auch andere Rasterfelder auf. Erhöhte Kohlendioxidemissionen finden sich wie im April auf allen Rasterfeldern, die einer erhöhten Methanbefruchtung ausgesetzt waren. Die Oxidationseffizienz liegt über alle erfassten Rasterfelder gesehen sehr hoch bei nahezu durchgehenden 100 %. Eine Ausnahme bilden hier wieder die Rasterfelder C2 und E2, und Rasterfeld D7, welches ebenfalls durch eine dem Umfeld erhöhte Methanfracht auffällt.

Die Methanfracht im Juli ist vergleichbar mit der im Mai; siehe Tabelle 5-11. Allerdings zeigt sich nur bedingt eine vergleichbare Methanbefruchtung der Rasterfelder. Im Juli wird der Bereich des Oberhanges um die Reihen 2 und 3 ausgeprägter als im Mai mit Methan beaufschlagt und um das Rasterfeld A9 kommt es zu einer stärkeren Befruchtung direkt in dieses eine Rasterfeld als im Mai, wo zusätzlich mehrere umliegende Rasterfelder höhere Methanfrachten aufwiesen. Dieses Muster spiegelt sich ebenfalls bei den Kohlendioxidemissionen wieder. Alle Rasterfelder mit einer höheren Methanbefruchtung weisen ebenfalls höhere Kohlendioxidemissionen auf. Auffällig ist das Rasterfeld A9, welches ebenfalls durch höhere Methanemissionen auffällig ist. Methan wird sonst nur über drei weitere Rasterfelder in geringeren Mengen emittiert. Rasterfeld A9 fällt auch bei der Oxidationseffizienz mit einer Effizienz von $60 < 80 \%$ gegenüber dem restlichen Testfeld von 80 bis 100 % auf.

Zeitlich stabile räumliche Emissionsmuster können im Bereich des Oberhanges der Reihe 2 beschrieben werden. Hier folgen die Methan- und Kohlendioxidemissionen den Feldern mit stärkerer Methanbefruchtung. Anfänglich kommt es im April ausschließlich in diesem Bereich zu erhöhten Methanemissionen. Nachdem diese sich im Mai nur noch vereinzelt und abgeschwächt wiederfinden, sind im Juni besonders bei den Kohlendioxidemissionen stark erhöhte Emissionen derselben Reihe festzustellen. Ebenfalls auffällig ist der Bereich um Rasterfeld A9. Im April wurden hier keine, von dem Umfeld stark unterschiedliche Gas-Emissionen festgestellt. In den Folgemonaten kommt es zu immer höheren Kohlendioxid- und Methanemissionen. So werden im Juli ca. 41 % der gesamten erfassten Emissionen über dieses Feld A9¹¹ emittiert. Im April sind es $< 1 \%$; wohingegen ebenfalls die Gesamtemissionen von ca. $174 \text{ g Testfeld}^{-1} \text{ h}^{-1}$ im April auf $44 \text{ g Testfeld}^{-1} \text{ h}^{-1}$ im Juli sinken.

Tabelle 5-8 gibt eine Übersicht der überprüften Gruppen auf der Skalenebene S1 und die Mittelwerte mit den Ergebnissen des Post-hoc-Tests in den Indizes. Durchgehend signifikante Unterschiede lassen sich im April bei einer Unterteilung des Testfeldes in einen Oberhangbereich von Reihe 1 bis 3, bzw. 4 finden; lfd. Nr. 2 bzw. 3 Tabelle 5-8 und in eine Unterteilung des Testfeldes in drei Bereiche: einen Randbereich mit den Reihen 1 und 10 und den Spalten A und F mit zusätzlicher Unterteilung der Innenfläche in einen Ober- und einen Unterhangbereich, lfd. Nr. 5. Ab Mai lassen sich jedoch keine durchgehend signifikanten Unterschiede verschiedener Hangbereiche bezogen auf die Methanfracht, -emissionen, Kohlendioxidemissionen und der Oxidationseffizienz mit den überprüften Einteilungen des Testfeldes finden.

¹¹ Ein Feld entspricht ca. 1,7 % der gesamten Testfeldfläche.

5. Ergebnisse

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Signifikanztests für Ober- und Unterhangbereiche für die Methanfracht, -emission, Kohlendioxidemission und Oxidationseffizienz je Monat auf Skalenebene S1. (Angabe des Mittelwertes mit Ergebnissen des Post-hoc-Test (HSD) bei $p < 0,05$ in Indizes a und b.) Signifikant unterschiedliche Mittelwerte sind fett markiert.

Lfd. Nr.	Hanglage	Monat	CH ₄ -Fracht	CH ₄ -Emissionen	CO ₂ -Emissionen	Ox.-Eff.	
1	OH (1 - 2) UH (3 - 10)	April	16,34^a	10,29^a	58,78^a	52,15 ^a	
			6,24^b	3,13^b	24,70^b	76,16 ^a	
		Mai	11,81 ^a	2,47^a	50,48 ^a	82,65 ^a	
			7,91 ^a	0,33^b	37,40 ^a	95,66 ^a	
		Juni	41,53^a	6,12 ^a	173,79^a	91,51 ^a	
			17,34^b	1,04 ^a	76,73^b	97,08 ^a	
		Juli	21,43 ^a	1,65 ^a	102,94^a	94,45 ^a	
			13,42 ^a	1,14 ^a	64,13^b	96,23 ^a	
	2	OH (1 - 3) UH (4 - 10)	April	16,74^a	10,16^a	61,26^a	52,98^a
				3,57^b	1,51^b	14,94^b	82,19^b
		Mai	9,16 ^a	1,65 ^a	39,86 ^a	88,41 ^a	
			8,52 ^a	0,38 ^a	40,22 ^a	95,02 ^a	
		Juni	35,66^a	4,02 ^a	152,61^a	93,96 ^a	
			15,40^b	1,24 ^a	67,29^b	96,76 ^a	
		Juli	18,31 ^a	0,93 ^a	89,26 ^a	96,79 ^a	
			13,19 ^a	1,36 ^a	62,39 ^a	95,56 ^a	
3		OH (1 - 4) UH (5 - 10)	April	14,53^a	8,62^a	53,72^a	57,61^a
				2,81^b	1,10^b	12,02^b	84,58^b
		Mai	7,36 ^a	1,26 ^a	32,21 ^a	86,74 ^a	
			9,68 ^a	0,43 ^a	45,69 ^a	97,37 ^a	
		Juni	30,96 ^a	3,31 ^a	133,00 ^a	95,02 ^a	
			16,52 ^a	1,46 ^a	71,83 ^a	96,19 ^a	
		Juli	16,09 ^a	0,65 ^a	78,88 ^a	97,66 ^a	
			13,89 ^a	1,69 ^a	63,98 ^a	94,56 ^a	
	4	Rand (A,F,1,10)	April	5,21^a	1,60^a	23,42 ^a	86,48^a
				12,68^b	8,54^b	44,10 ^a	50,07^b
Innen (Rest)		Mai	7,84 ^a	0,37 ^a	36,98 ^a	97,58 ^a	
			9,43 ^a	1,10 ^a	42,65 ^a	89,23 ^a	
		Juni	19,29 ^a	0,38 ^a	87,52 ^a	99,01 ^a	
			27,25 ^a	3,97 ^a	114,18 ^a	92,92 ^a	
		Juli	13,43 ^a	2,02 ^a	61,80 ^a	95,10 ^a	
			15,50 ^a	0,78 ^a	75,57 ^a	96,41 ^a	
5		Rand (A,F,1,10)	April	5,21^a	1,60^a	23,42^a	86,48^a
				20,04^b	13,90^b	68,61^b	36,07^b
	Innen 1 (2,3,4)	Mai	2,16 ^a	0,88^a	9,09^a	78,06^a	
			7,84 ^a	0,37 ^a	36,98 ^a	97,58^a	
	Innen 2 (5 - 9)	Juni	10,29 ^a	2,18 ^a	43,88 ^a	77,15^b	
			8,91 ^a	0,46 ^a	41,91 ^a	96,47^a	
		Juli	19,29 ^a	0,38 ^a	87,52 ^a	99,01 ^a	
			38,45 ^a	5,46 ^a	161,46 ^a	92,21 ^a	
		Juli	14,81 ^a	2,31 ^a	61,65 ^a	93,70 ^a	
			13,43 ^a	2,02 ^a	61,80 ^a	95,10 ^a	
			19,44 ^a	0,85 ^a	95,14 ^a	97,06 ^a	
			11,20 ^a	0,70 ^a	54,23 ^a	95,71 ^a	

Werden die Summen der in das gesamte Testfeld einströmenden Frachten miteinander verglichen, ist eine starke Differenz zwischen der Methansollfracht des gesamten Testfeldes und der Methanistfracht der erfassten Fläche, besonders der Monate April, Mai und Juli, auffällig; siehe Tabelle 5-11. Obwohl mit der festgelegten Messstrategie 95 % der Emissionen erfasst werden sollen, wurden über die entsprechenden Rasterfelder im April nur ca. 31 %, im Mai ca. 53 %, im Juni ca. 73 % und im Juli ca. 57 % der Sollfracht berechnet. Generell kann bei einer höheren Methangesamtfracht (Sollfracht) auf das Testfeld auch eine höhere Istfracht festgestellt werden, dies zeigt der Vergleich von Mai und Juni. Allerdings lässt sich mit den bisher durchgeführten Untersuchungen kein Zusammenhang finden, der alle Differenzen zwischen Soll- und Istfracht plausibel erklärt.

Tabelle 5-11: Effektivität des Gesamtprozesses der Methanoxidation auf dem Testfeld von April bis Juli 2013, Soll- und Ist-Methanfracht

Monat	Effektivität Gesamtprozess	Methan- Emissionen	Abgedeckte Testfeldfläche mittels Emissions- messungen	Istfracht (Methanfracht auf erfasster Fläche)	Sollfracht (Methanfracht auf gesamtem Testfeld)
	(= Emissionen/ Gesamtfracht Testfeld · 100)	[g / (Testfeld · h)]	[%]	[g / (Testfeld · h)]	[g / (Testfeld · h)]
April	87,19	127,5	58,33	309,2	995,04
Mai	96,63	32,4	96,67	505,4	961,96
Juni	94,62	59,5	56,67	807,2	1105,50
Juli	96,50	32,5	60,00	531,1	926,84

Die Effektivität des Gesamtprozesses kann, bezogen auf die Istfracht und die erfassten Emissionen, von Mai bis Juli mit über 94 % angegeben werden. Im April liegt diese bei ca. 87 %. Allerdings kann keine Aussage zu den Zeiten zwischen den jeweiligen Messterminen getroffen werden.

Die Darstellung der Methanfrachten, Methan- und Kohlendioxidemissionen und der Methanoxidationseffizienz der S2 (Abbildung 5-17) zeigen in den gewählten Darstellungsbereichen für die gewählte Klasseneinteilung generell eine eher homogene Verteilung in allen untersuchten Monaten. Eine Ausnahme bilden die Kohlendioxidemissionen im April, die stärker variieren und erhöhte Werte in den Feldern B1, B2, die absolut betrachtet höher als die der Skalenebene S1 für das gesamte Testfeld sind, zeigen.

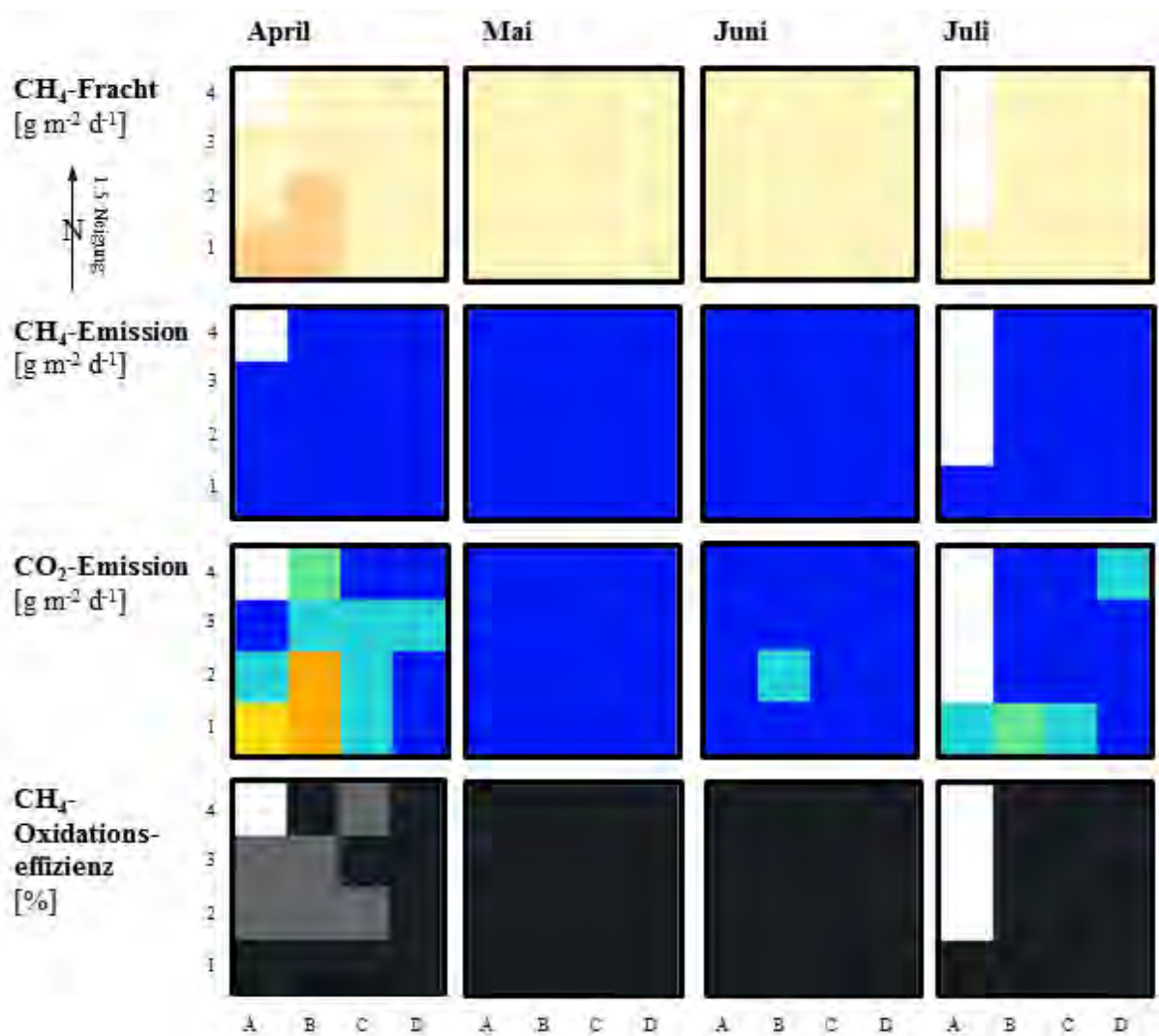


Abbildung 5-17: Methanfracht, -oxidationseffizienz, -emission und Kohlendioxidemission der Monate April, Mai, Juni und Juli 2013¹² auf Skalenebene S2

Im April treten auf der Skalenebene S2 ca. 45 % der Kohlendioxidemissionen in ca. 19 % der Fläche (Felder A1, B1 und B2) aus. Die idealisierte Summenbildung der Emissionen der 25 S2-Felder und die mit der großen Haube auf demselben Rasterfeld gemessenen Emissionen entsprechen somit nicht einander. In den Monaten Mai und Juni kommt es in der Fläche zu kaum unterschiedlich hohen Kohlendioxidemissionen. Im Juli sind hangoberseitig im Bezug zum restlichen Teil der Skalenebene erhöhte Kohlendioxidemissionen festzustellen. Die Methanfracht kann als homogen verteilt über die Skalenebene angesehen werden. Die Methanoxidationseffizienz liegt während allen Monaten über 60 %, von Mai bis Juli gar über 85 %. Zeitlich stabile Emissions- oder Methanfrachtmuster können für die untersuchte Dauer nicht eindeutig beschrieben werden.

¹² Hinweis für Anwender des Oxidata-Programms: Zur Berechnung der anliegenden Methanfrachten und der Methanoxidationseffizienz wurde das Gültigkeitskriterium von „R2 of Slope Gas \geq Toetsfactor Gas“ zur Berechnung der Methan- und Kohlendioxidemissionen entfernt.

Die Wiederfindung der addierten Deponiegas-Emissionen der Skalenebene S2 im Bezug zum Feld E4 der Skalenebene S1 variieren sehr stark von ca. 168 % im April, zu ca. 9 % im Mai, ca. 30 % im Juni und ca. 56 % im Juli.

Der aufgrund der räumlichen Größe der Skalenebenen getroffenen Annahme, dass der Variabilitätskoeffizient der Methanfracht, die sich aus den Methan- und Kohlendioxidemissionen errechnet auf Skalenebene S1 größer ist, als derjenige auf der Skalenebene S2, wird in den Monaten April, Mai und Juni entsprochen (Tabelle 5-12). Eine Ausnahme bildet die Methanfracht im Juli. Hier ist die Variabilität auf Skalenebene S2 größer als auf Skalenebene S1. Eine räumliche größere Variabilität der Methanfracht auf Skalenebene S1 kann somit nicht eindeutig belegt werden.

Tabelle 5-12: Variabilitätskoeffizienten der Methanfrachten, -emissionen, Kohlendioxidemissionen und Methanoxidationseffizienzen der Monate April bis Juli 2013 der Skalenebenen S1 und S2

	Monat							
	April		Mai		Juni		Juli	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
CH₄-Fracht	0,954	0,720	1,138	0,677	0,945	0,648	0,788	0,959
CH₄-Emission	1,374	0,950	2,860	1,206	2,378	1,325	2,674	1,165
CO₂-Emission	0,959	0,723	1,103	0,681	0,895	0,648	0,720	0,959
CH₄-OxEff.	0,425	0,148	0,210	0,036	0,107	0,018	0,084	0,003

Die Variabilitätskoeffizienten der Methanemissionen und -oxidationseffizienzen entsprechen in allen Fällen der Annahme der größeren Variabilität mit Zunahme der Skalenebenengröße. Die Variabilitätskoeffizienten der Kohlendioxidemissionen widersprechen dieser Annahme nur im Juli.

Gemäß Abbildung 5-16 wird eine hohe Methanfracht oft gemeinsam mit einer geringeren Methanoxidationseffizienz beobachtet. Eine Abhängigkeit beider Faktoren voneinander kann aber ohne weitere Differenzierungen nicht bestätigt werden. Im April können auf der Skalenebene S1 ($n = 32$) ca. 75 % der Oxidationseffizienz über die unterschiedliche Fracht erklärt werden. Dieser Wert verschlechtert sich aber maßgeblich bei Berücksichtigung des gesamten Testfeldes im Mai ($n = 57$) zu ca. 5 %. Im Juni ($n = 33$) wird ein r^2 von 0,7107 und im Juli ($n = 36$) von 0,4565 erzielt. Ein Zusammenhang ist im April und Juni damit stärker ausgeprägt als im Mai und Juli. Veränderliche, auf das Testfeld einflussnehmende Faktoren und damit die Methanoxidationskapazitäten und das Methan- und Kohlendioxidemissionsverhalten beeinflussend sind die unter Punkt 5.1 „Wetterdaten und davon beeinflusste Bodenparameter“ und 5.2 „Bodeneigenschaften“ aufgeführten Parameter. Das r^2 der Skalenebene S2 liegt bei einem $13 \leq n \leq 16$ zwischen 0,0325 (April) und 0,1559 (Juni). Ein signifikanter Zusammenhang kann somit ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

Für alle an den vier Messkampagnen von April bis Juli durchgängig erfassten Flächen der Skalenebene S1¹³ wurde die Einflussnahme der Bodenfeuchte auf die Methan- und Kohlendioxidemissionen und die Temperatur auf die Methanoxidation untersucht.

Die Bodenfeuchte schwankt, wie im Kapitel 5.2 beschrieben, zwischen 6 und 22 %-TG über das gesamte Testfeld. Da sie nur einmalig für das gesamte Testfeld bestimmt wurde, mussten zur Untersuchung des Einflusses der Bodenfeuchte auf die Gasemission die Daten der an drei Positionen (Unter-, Mittel- und Oberhang) fest installierten Sensoren verwendet werden. Hierbei wurden jedem Rasterfeld der Skalenebene S1 die Daten des jeweils nächstgelegenen Sensorsatzes zugeordnet. Ein Zusammenhang zwischen der Bodenfeuchte in 5 cm Tiefe und den Gasemissionen konnte mit einem r^2 von 0,0209 nicht nachgewiesen werden. Eine Überprüfung des gleichen Zusammenhanges mit einer gemittelten Bodenfeuchte über eine Tiefe von 80 cm kann ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

Ein Einfluss der Bodentemperatur auf die Methanoxidation konnte mit einem r^2 von 0,2350 ebenfalls nur unzureichend nachgewiesen werden. Hierzu wurden ebenfalls die Daten der dem jeweiligen Rasterfeld der Skalenebene S1 nächst gelegenen Bodenlogger nach 5.1 verwendet und mit der jeweiligen Methanoxidationseffizienz korreliert.

¹³ Von April bis Juli 19 durchgängig erfasste Felder der Skalenebene S1: A4, A5, A7 - A9, B2, B3, B8, C1 - C3, D1 - D4, D7, E2 - E4; entsprechen ≈ 32 % der gesamten Testfeldfläche.

6. Diskussion

Um die Methanoxidationsprozesse in Deponie-Abdeckschichten besser verstehen zu können, ist die Quantifizierung von Gasflüssen (Methanfracht, Methanemission) sowie der Zusammensetzung der Bodengasphase von entscheidender Bedeutung. Giani et al.(2002), Spokas et al. (2003), Rachor et al. (2009), Röwer et al. (2010), Geck (2011) und Rachor et al. (2012) zeigten bereits, dass eine räumliche Heterogenität von Gasflüssen in Deponie-Abdeckschichten vorherrscht. Vor diesem Hintergrund war Ziel der vorliegenden Arbeit, die räumliche Heterogenität der Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Stickstoffflüsse in einem Testfeld mit einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht über einen Zeitraum von April bis Juli auf verschiedenen Skalenebenen näher zu spezifizieren. Zur Bestimmung der Gaskonzentrationen in der Bodenluft wurde das Testfeld mit Gaslanzen in verschiedenen Tiefen ausgestattet, die Methan- und Kohlendioxidemissionen wurden mittels Haubenmessung quantifiziert. Hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Verteilung und Variabilität der Gaskonzentrationen und Gasflüsse durch die Abdeckschicht wurden eingangs Hypothesen formuliert und geprüft. Physikalische Einflussfaktoren des Wetters und davon abhängige Parameter wie beispielsweise der Lufttemperatur und der davon abhängigen Bodentemperatur sollten auf eine mögliche Beeinflussung auf die Methanoxidation, -konzentration und -emission untersucht werden.

Aufgrund einer zeitlich konstanten Befruchtung des Testfeldes müssen auftretende räumliche und zeitliche Emissions- und Gaskonzentrationsmuster von äußeren Begebenheiten abhängig sein. Im Folgenden werden die Umgebungsparameter, die auf das offene System der Methanoxidationsschicht einwirken dargestellt.

6.1 Wetterdaten und davon beeinflusste Bodenparameter

Die aufgezeigten Wetterdaten lassen auf eine durchschnittliche jahreszeitliche Entwicklung der Umgebungsparameter in Nordholland schließen;(Meteorologisch Instituut Koninklijk Nederlands 2012a),(Meteorologisch Instituut Koninklijk Nederlands 2012b). Neben anderen kann nach Christophersen et al. (2001) eine Änderung des Umgebungsdruckes Änderungen der Emissionen durch Druckausgleichsbewegungen zwischen Deponiekörper und Atmosphäre induzieren. Ein fallender und somit einer begünstigten Gasemission entsprechender Luftdruck wurde während allen Messkampagnen, mit Ausnahme des 17.06. wo es zu einem leicht steigenden Luftdruck mit +0,09 hPa/h kommt, aufgenommen. Neben der Richtung der Änderung ist die Änderungsstärke von Bedeutung. Im April konnten die stärksten Änderungen mit -0,51 (08.04.) und -0,35 (09.04.) hPa h⁻¹ aufgezeichnet werden. Zusätzlich muss die Historie des Luftdruckverlaufes betrachtet werden. Vornehmlich steigende Luftdrücke würden bei einem anschließend fallenden Luftdruck für höhere Emissionen als ein über längerer Zeit fallender Luftdruck sorgen. Aufgrund der aktiven Begasung in das Testfeld im Gegensatz zu einer normalen Deponie und der relativ gleichbleibenden Luftdruckschwankungen während der Messzeiträume wird der Luftdruckeinfluss auf die Gasemissionen als nicht so entscheidend eingeordnet. Sich

verändernde Emissionsmuster müssen somit von weiteren Faktoren neben dem Luftdruck abhängig sein.

Die Aufnahme der maximalen und durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten ist nach Abschluss der Untersuchungen scheinbar nur für eine grobe Einordnung der Daten zu verwenden. Generell scheint die Art und Weise der Aufnahme zu lückenhaft und lässt nur auf grobe Umgebungsverhältnisse Rückschlüsse zu. Vermutet wird eine Verschiebung der Verhältnisse von konvektiven und diffusiven Gasströmen u. a. bedingt durch eine Änderung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung und einem dadurch veränderten Diffusions- und Druckgradienten über die Mächtigkeit der Methanoxidationsschicht bzw. deren Veränderung an Stellen mit präferenziellen Fließwegen. Geck (2011) beschreibt keine einheitliche Beeinflussung der Bodengaskonzentrationen durch eine Luftdruckänderung oder den Wind, weist aber auch auf die in einer Simulation von Poulsen et al. (2003) gefundenen Druckschwankungen aufgrund von Verwirbelungen hin, die einen Einfluss auf den Gasaustausch, d. h. auf die Emissionen, weniger auf die Bodengaskonzentrationen induzieren.

Die von der Lufttemperatur beeinflusste Bodentemperatur steigt mit dieser an. Mit zunehmender Tiefe kommt es zu einer Glättung der Bodentemperaturkurve. Tagesgang abhängige Sonneneinstrahlungen und Lufttemperaturen führen besonders in den oberen Bodenschichten zu veränderlichen Bodentemperaturen, was an der im Gegensatz zu tieferen Bodenschichten höheren Amplitude erkennbar ist. Die Amplitude nimmt mit der Tiefe ab, da der Einfluss der Lufttemperatur mit der Tiefe aufgrund der Wärmekapazität des Bodens vermindert wird. Wärmeenergie wird von dem Boden und enthaltenden Bestandteilen wie u. a. der Bodenluft und vor allem dem Bodenwasser aufgenommen. Luft besitzt eine eher geringe Wärmekapazität wohingegen Wasser bzw. das Bodenwasser durch eine höhere charakterisiert wird und damit besonders für die Wärmeaufnahme verantwortlich ist (Scheffer et al. 2010). Weitere Einflussfaktoren, die auf Temperaturamplitude einwirken, sind eine hohe Lagerungsdichte, die ebenfalls zu einer Erhöhung der Wärmekapazität führt. Das mit einer relativ konstanten Temperatur in das Testfeld einströmende Deponiegas setzt den ohnehin geringen Einfluss der Lufttemperatur in der Tiefe noch weiter herab. Es ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Tiefe der Einfluss von äußeren Parametern abnimmt. Der Anstieg der Lufttemperatur von ca. 2,5 °C Anfang April auf etwa 24 °C Anfang August zeigt einen wie auf den nördlichen, gemäßigten Breiten erwarteten sommerlichen Anstieg. Zwar konnte keine ausreichend gute Korrelation zwischen der Bodentemperatur und der Methanoxidation nachgewiesen werden ($r^2 = 0,2350$), jedoch lässt eine positive Steigung der Korrelationsgeraden auf eine zunehmende Methanoxidation mit zunehmender Bodentemperatur schließen. Mit einer zunehmenden Temperatur kommt es bis zu einem spezifischen Temperaturoptimum unter ausreichendem Nahrungsangebot zu einer höheren Stoffwechselrate bei Bakterien, die wiederum eine höhere Menge an Methan zu Kohlendioxid verstoffwechseln. Nach Scheutz et al. (2009) steigert eine Temperaturerhöhung von 10 °C in einem Bereich von 10 bis 30 °C die Methanoxidationsrate um 70 bis 310 %. Beschrieben wird der Anstieg der Methanoxidation in Abhängigkeit von

der Temperatur durch den Q_{10} -Wert, der in dem Bereich von 10 bis 30 °C zwischen 1,7 und 4,1 (Scheutz et al. 2009) liegt.

Die Temperatur beeinflusst hauptsächlich die biologisch ablaufende Methanoxidation, wohingegen die Feuchtigkeit und die Porenstruktur direkten Einfluss auf die Gasverteilung und damit indirekt auf die Methanoxidation durch eine Limitierung des eindringenden Sauerstoffs in die Methanoxidationsschicht nehmen. Eine ausreichend gute Korrelation zwischen der Bodenfeuchte und der Gasemission konnte nicht nachgewiesen werden ($r^2 = 0,0209$), jedoch lässt hier eine negative Steigung der Korrelationsgeraden auf abnehmende Gasemissionen mit zunehmender Feuchte schließen.

Physikalische Gegebenheiten die auf die Diffusion und Konvektion besonderen Einfluss nehmen ist wie im Grundlagenkapitel 2 der *Carman-Kozeny*-Gleichung beschrieben die Porosität, für die der Wassergehalt der Methanoxidationsschicht eine tragende Rolle spielt. Die Bodenfeuchte und damit die Wärmekapazität des Bodens ist abhängig vom gefallenem Niederschlag; je nach Tiefe von mehr oder weniger lang zurückliegenden Ereignissen. Das insgesamt beobachtete Abfallen der Feuchtigkeit in Abbildung 5-3 in allen Tiefen mit fortschreitender Zeit lässt auf eine negative Gesamtbilanz bzgl. des Wasserhaushaltes schließen, die im Sommer durch geringere Niederschlagsmengen und höhere Umgebungs- und Bodentemperaturen und einer damit einhergehenden höheren Verdampfung und vor allem mit einer steigenden Evapotranspiration durch Pflanzen beschrieben werden kann. Allmählich kommt es zu einer Austrocknung der Methanoxidationsschicht. In einer Tiefe von 80 cm liegt der Feuchtegehalt des Oberhangs oberhalb der des Mittel- und Unterhangs. Zum Sommer kommt es zu einem stetigen Abfallen der Feuchte im Oberhangbereich und die Feuchtesensoren zeigen eine gegenüber dem Mittel- und Unterhang geringere Bodenfeuchte an. Wahrscheinlich ist ein laterales Abfließen von Wasser in den Unterhangbereich, was eine schnellere Austrocknung des Oberhangbereiches bedeutet. Durch die geringere Feuchtigkeit im Oberhangbereich kommt es zu einem schnelleren Abriss des Kapillarsaumes in der Kapillarschicht. Da es über den betrachteten Zeitraum zu einem leichten Abfall der gesamten Feuchte kommt, scheint es anfänglich im Juni und ausgeprägter im Juli im östlichen Bereich des Testfeldes zu besseren Bedingungen für das Eindringen bzw. Austauschen von Gasen gekommen zu sein. Gebert et al. (2011a) zeigen den Zusammenhang einer höheren Sauerstoffdiffusion bei verschiedenen Kompaktionszuständen eines Bodens auf und zeigen eine Relevanz der physikalischen Beschaffenheiten der Methanoxidationsschicht zur mikrobiellen Methanoxidation auf. Die beschriebene unterschiedliche Verteilung der Wassergehalte lässt auf Unterschiede in der Porengrößenverteilung und auf einer damit einhergehend unterschiedlich schnelle Gasdiffusion schließen. Eine dem restlichen Testfeld gegenüber erhöhter Sauerstoffkonzentration entspricht einer komplementär niedrigeren Kohlendioxidkonzentration. Die Methankonzentrationen liegen zu diesem Zeitpunkt generell auf einem sehr niedrigen, die Stickstoffkonzentrationen auf einem sehr hohen Niveau, was ebenfalls auf eine gute Durchlüftung des Testfeldes hinweist.

Die über den betrachteten Zeitraum zunehmende Umgebungs- und Bodentemperatur hat wahrscheinlich eine höhere Methanoxidationsaktivität zu Folge. Scheutz et al. (2009) haben für die Temperaturabhängigkeit der Methanoxidation herausgefunden, dass das Temperaturoptimum für die Methanoxidation für die meist mesophilen methanotrophen Bakterien zwischen 25 und 35 °C liegt. Die Bodentemperaturen nähern sich mit der Zeit immer mehr diesem Optimum an, wohingegen die Temperaturen zu Anfang April bei ca. 5 °C starten und somit unterhalb der optimalen Temperaturspanne zur Methanoxidation liegen.

Zur weiteren Beschreibung der Methanoxidationsschicht wurden die Eindringwiderstände über das Testfeld aufgenommen. Bei vergleichbarer Feuchte können Rückschlüsse auf Trockenrohddichte des Bodens gezogen werden (Dexter et al. 2007) und ermöglichen so eine Aussage zu vorhandenen Emissionsmustern, ob diese durch einen unterschiedlich verdichteten Boden begünstigt oder verursacht werden. Je dichter ein Boden gelagert ist, desto geringer ist seine Gasdurchlässigkeit. Da jedoch die Feuchte nicht gleichmäßig über das Testfeld verteilt war und dadurch eine Feuchtekorrektur der Eindringwiderstände hätte stattfinden müssen, was aufgrund fehlender volumetrischer Wassergehalte nicht durchgeführt werden konnte, mussten die absoluten Messwerte verwendet werden. Zwischen zwei parallelen Einstichen auf der Skalenebene S1 mit einem Abstand von nur ca. 20 bis 30 cm zeigen sich dabei sehr oft große Unterschiede. Eine Mittelwertbildung und ein Vergleich von absoluten Positionen auf dem Testfeld würden zu keinen sinnvollen Ergebnissen führen. Die beobachtete Variabilität zeigt sich über die gesamte Einstichtiefe. Die starke Verfestigung der ersten 20 cm mit dem verbundenen Vorstechen um eine Aufnahme des Eindringwiderstandes der darunterliegenden Schichten zu ermöglichen kann evtl. auf eine Wirkung von Pflanzenwurzeln zurückzuführen sein. Teilweise ist mit zunehmender Tiefe eine Abnahme des Eindringwiderstandes zu erkennen, was einen abnehmenden Einfluss von Pflanzenwurzeln mit der Tiefe entsprechen würde. Die sehr große Variabilität der Parallelmessungen auf dieser Skalenebene deutet auf eine sehr kleinräumig hohe Variabilität des Eindringwiderstandes und somit des bodenphysikalischen Zustandes hin. Ein hoher Eindringwiderstand kann entweder auf eine sehr hohe Dichte des Bodens oder auf Bodentrockenheit zurück zu führen sein. Bei gegebener Textur des Bodens ist im ersten Fall die Gasdurchlässigkeit geringer, im zweiten Fall bei gleicher Dichte des Bodens höher.

Eine Korrelation der Bodenfeuchte und des Eindringwiderstandes konnte nicht bestätigt werden. Gründe dafür können evtl. an den unterschiedlichen Probenahmestellen und damit der Variabilität der Bodendichte, die offensichtlich kleinräumig stark streuen kann, oder aber auch darin gefunden werden, dass die gleiche Dichte des Bodens bei unterschiedlicher gravimetrischer Bodenfeuchte einen unterschiedlichen Eindringwiderstand erzeugt. Christensen et al. (1989) geben eine Methode zur Analyse des Eindringwiderstandes unter Verwendung der volumetrischen Feuchte, die im Rahmen dieser Abschlussarbeit nicht erhoben wurde. Auf die Korrelationsanalyse zwischen den Gaskonzentrationen und des Eindringwiderstandes wurde wegen des nicht herausrechenbaren Wassergehaltes verzichtet.

Die in Tabelle 5-11 aufgeführten Werte zur Effektivität des Gesamtprozesses der Methanoxidation auf dem Testfeld zeigen generell eine sehr gute Effizienz. Anfängliche

Anlaufprozesse im April bedingt durch eine längere Gaszufuhrunterbrechung im Winter 2012 / 2013, auf die eine Anpassung der methanotrophen Population an das neue Substratangebot folgte, sind bereits im Mai mit einer Effektivität des Gesamtprozesses von ca. 97 % nicht mehr zu erkennen. Die relativ große Differenz zwischen der Soll- und der berechneten Istfracht¹⁴ kann nur durch eine bereits in der Gasverteilungsschicht stattfindende Methanoxidation erklärt werden. Die 100 cm Gaslanzen erlauben eine direkte Beprobung der Bodengasphase oberhalb der Gasverteilungsschicht und weisen geringere Methankonzentrationen als im zuströmenden Deponiegas auf. Die Differenz muss in der Gasverteilungsschicht bereits oxidiert worden sein.

Die geplante Überschreitung der Kapazitätsgrenze der Methanoxidationsschicht im Juni wurde nicht erreicht. Eine Befrachtung von ca. 15 % mehr Methan als im Mai in das Testfeld zeigt keine eindeutig diesem Effekt zuordenbare Ergebnisse. Der Fluss von ca. $3 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ lag über dem von Stegmann et al. (2006) vorgeschlagenen Grenzwert von $0,5 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ als Voraussetzung für die Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge, aber unter dem von IFAS (2012) genannten maximalen Grenzwert von $4 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Im April, Mai und Juli wurde jeweils ein Fluss von ca. $2,6 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ eingestellt. Das Testfeld könnte somit sehr wahrscheinlich unter wärmeren, sommerlichen Bedingungen eine noch höhere Fracht ohne negative Auswirkungen auf die Gesamteffektivität oxidieren.

6.2 Zunahme der Variabilität der Bodengaskonzentrationen mit der Größe der Skalenebene

Das Deponiegas wird wie in Kapitel 5.3 in den Monaten April, Mai und Juli nahezu mit konstanter Fracht über die Gasverteilungsstation in das Testfeld eingebracht. Die Standardabweichung (SD) der Methanfracht variiert von minimal $1,93 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im April zu maximal $5,87 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im Mai, die Methanfracht wird aber dennoch gleichmäßiger in das Testfeld eingebracht als die Kohlendioxidfracht mit einer maximalen SD im Mai von $16,80 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Die Datengrundlage lässt keine Rückschlüsse auf veränderliche Pumpenleistungen o. ä. aufgrund gleichbleibender in das Testfeld geförderter Gesamtvolumina zu. Alle aufgezeigten Umgebungsparameter zeigen keine Anomalien auf. Vermutlich sind die Änderungen auf ein Eindringen von Umgebungsluft in den Deponiekörper zurückzuführen, wobei eine Verstoffwechslung des Sauerstoffs in Kohlendioxid erfolgt. Dies ist oft der Fall, wenn die Deponie, aus der das Deponiegas gewonnen wird, nicht vollständig dicht ist und übersaugt wird.

Die Interpolation der verschiedenen Gaskonzentrationen über die Tiefen 100, 60 und 25 cm erlaubt einen qualitativen Vergleich der einzelnen Tiefen bzw. Zeitpunkte. So kann eine zunehmende Belüftung des gesamten Testfeldes von April bis Juli anhand der Stickstoffkonzentration nahe dem atmosphärischen Niveau in 100 cm Tiefe festgestellt werden. Allerdings kommt es bei der Interpolation aufgrund der gewählten

¹⁴ Die Sollfracht für das Testfeld wird durch das Gaszufuhrsystem reguliert und geloggt. Rechnerisch kann durch die unter Kapitel 4 erwähnten Formeln die Istfracht durch die Bodengaskonzentrationen und den Emissionen unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Gasverteilung in der Gasverteilungsschicht berechnet werden.

Darstellungsgröße in den Randbereichen zu Artefakten. Die graphischen Darstellungen im Randbereich suggerieren hohe Methankonzentrationen. Beispielhaft seien hier die Bereiche oberhalb auf der Abbildung der Punkte A9 und F9 der Methankonzentrationen im Juli in einer Tiefe von 100 cm auf Skalenebene S1 (Abbildung 5-8) zu nennen. Die Randbereiche der interpolierten Darstellungen wurden nur der Vollständigkeit halber aufgrund von Emissionsmessungen auf diesen Flächen mit aufgeführt. Weiter wurde eine Interpolation zwischen den Punkten nicht validiert, jedoch entsprechen die interpolierten Konzentrationsübergänge auf Skalenebene S1 auch in allen Fällen etwa der Skalenebene S2 und diese wiederum der Skalenebene S3. Inwiefern diese Ergebnisse allerdings auf andere Bereiche des Testfeldes übertragen werden können wurde nicht überprüft. Anhand von Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-10 kann die räumliche Variabilität auf allen drei Skalenebenen und die Veränderung der Gaszusammensetzung mit der Tiefe für den im Juli erhobenen Datensatz diskutiert werden, der von allen vier durchgeführten Messkampagnen am vollständigsten ist. Die Daten lassen auf eine ungleichmäßige Verteilung der Gaskonzentrationen im Testfeld sowohl in der Fläche als auch vertikal über die Tiefe schließen. Eine Übersicht über die Streuung geben Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13, die mit einigen Ausnahmen bei einzelnen Gasen und Tiefenstufen eine Abnahme der Variabilität mit der Skalenebenengröße $S1 > S2 > S3$ zeigen. Tabelle 5-5 zeigt die schon aus den Abbildungen ersichtlichen Abweichungen: In zwei Fällen, der Methan- und Stickstoffkonzentration in 100 cm Tiefe, ist die Variabilität der Skalenebene S2 höher als die der Skalenebene S1. Skalenebene S3 überschreitet den Variabilitätskoeffizient von Skalenebene S2 in einem Fall, nämlich der Sauerstoffkonzentration in 60 cm Tiefe. Die Variabilitätskoeffizienten von Skalenebene S1 werden in keinem Fall von denen der Skalenebene S3 überschritten. Auch für den Datensatz im April, an dem nur Daten für die Skalenebenen S1 und S2 vorliegen, zeigt sich in 80 % der Fälle ein höherer Variabilitätskoeffizient der Skalenebene S1 gegenüber der Skalenebene S2 (Tabelle 5-6).

Die Hypothese 1, dass die Variabilität der Bodengaskonzentrationen mit der Größe der Skalenebene zunimmt, kann somit angenommen werden.

Über der Tiefe betrachtet wird der Hypothese $V_{k_{S1;25}} > V_{k_{S1;60}} > V_{k_{S1;100}}$ für Methan und Kohlendioxid und $V_{k_{S1;25}} < V_{k_{S1;60}} < V_{k_{S1;100}}$ für Sauerstoff und Stickstoff nicht auf allen beprobten Bereichen des Testfeldes entsprochen. Zustände kamen die Hypothesen da mit abnehmender Bodentiefe ein immer größerer Einfluss der Umgebungsparameter zu vermuten ist. Der Boden wird zunehmend durch Bereiche unterschiedlicher Zusammensetzung (Wassergehalte, etc.) oder physikalischer Gegebenheiten (Eindringwiderstand, Makroporen, etc.) gekennzeichnet. Mit abnehmender Tiefe kommt zudem noch die zunehmende Belüftung. Diese Überlegung setzt eine gleichmäßige Beaufschlagung mit Deponiegas voraus, die durch die sechs Gas-Inlets, die in die Gasverteilungsschicht münden, erreicht werden soll. Genau entgegengesetzt sollte es sich dadurch für die Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen verhalten. Hier kann von einem gleichmäßigeren Einfluss der Umgebungskonzentrationen an der Geländeoberfläche ausgegangen werden. Mit zunehmender Tiefe spielen dann die genannten Faktoren für die unterschiedliche Verteilung eine zunehmende Rolle. Im Juli fallen hier die Variabilitätskoeffizienten von Kohlendioxid

in einer Tiefe von 100 cm und Stickstoff in einer Tiefe von 60 cm auf Skalenebene S2 heraus, die jeweils größer bzw. kleiner als erwartet ausfallen. Auf den Skalenebenen S1 und S3 entspricht im Juli die Reihung aller Variabilitätskoeffizienten dieser Hypothese (Ausnahme April Skalenebene S1, Sauerstoff, 100 cm Tiefe). Generell scheint die Variabilität der Gaskonzentrationen über der Tiefe auf Skalenebene S3 kleiner als auf Skalenebene S1 zu sein. Skalenebene S2 bildet einen Übergangsbereich; auf der die Variabilität sowohl kleiner und teilweise größer als auf Skalenebene S1 als auch auf Skalenebene S3 ist ($S1^a$, $S2^{ab}$, $S3^b$). Die bodenphysikalischen Eigenschaften, die Wassersättigung und die Belüftung variieren demnach auch auf der größeren Skalenebene (S1) stärker als auf den jeweils kleineren Skalenebenen. Werden die Abbildungen der interpolierten Gaskonzentrationen über die Tiefe miteinander verglichen, entsprechen die Muster den Erwartungen. Die Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen nehmen mit abnehmender Tiefe ab und die Gasphase wird somit immer weniger vom in die Gasverteilungsschicht eingebrachten Methan und Kohlendioxid geprägt, wohingegen die Sauerstoff- und Stickstoffkonzentrationen zunehmen. Sauerstoff und Stickstoff dringen aus der Umgebungsluft diffusiv in den Boden ein und üben daher mit abnehmender Tiefe einen immer stärkeren Einfluss auf die Gasphase aus.

Abbildung 5-11 zeigt graphisch die Veränderung der Gaszusammensetzung über die Zeit. Besonders die Methan-, Kohlendioxid- und Stickstoffkonzentrationen variierten räumlich sehr stark über das Testfeld über den betrachteten Zeitraum. Von Monat zu Monat kommt es neben einer kleinen Änderung der räumlichen Ausbreitung aber eher zu keiner stärkeren Variabilität über die Zeit. Zeitlich stabile Emissions-Muster können besonders im Oberhangbereich beschrieben werden.

6.3 Inhomogenes Auftreten der Emissionen auf allen Skalenebenen und Zunahme der Variabilität der Methan- und Kohlendioxidemissionen mit der Größe der Skalenebene

Die Methan- und Kohlendioxidkonzentrationen der Bodengasphase alleine erlauben weder einen Rückschluss auf die räumliche Verteilung der Gasfracht noch auf die räumliche Verteilung der Methanoxidationseffizienz. Durch Verbindung der Gaskonzentrationen im einströmenden Gas mit den Emissionsmessungen wurde über die Kohlenstoffbilanz die auf die einzelnen Rasterfelder aufgebrachte Methanfracht und die Methanoxidationseffizienz errechnet (Abbildung 5-16).

Die Bereiche erhöhter Emissionen entsprechen zum großen Teil denen erhöhter Methanfrachten. Erwähnenswert ist allerdings eine Verengung des Methan-Kohlendioxid-Verhältnisses zwischen im April und Juni im Oberhangbereich.¹⁵ Die in Abbildung 5-2 aufgezeigte Temperaturerhöhung in den einzelnen Bodenschichten fördert eine höhere Methanoxidationsrate bei gleicher Fracht. Die aufgrund der vermehrt aufgetretenen höheren Emissionen im Oberhangbereich gebildeten Gruppen nach Tabelle 5-10 zeigten keine

¹⁵ Ein Verschieben von höheren Methan- und mittleren Kohlendioxidemissionen im April im Oberhangbereich zu mittleren Methan- und höheren Kohlendioxidemissionen im Juni.

signifikant durchgängige Unterteilung der Skalenebene S1 in einen Ober- und Unterhangbereich oder einen signifikanten Einfluss des Randbereichs. Häufig handelt es sich lediglich im April um signifikante Unterscheidungen ($p < 0,05$) in verschiedene Emissionsbereiche. Im April wurden die höchsten Bodengaskonzentrationen und die geringsten Abbauraten festgestellt, wodurch sich die stärksten Emissionsmuster ausbildeten. Insgesamt zeigt sich auch auf der Skalenebene S2 ein inhomogenes Austreten sowohl der Methan- als auch der Kohlendioxidemissionen, besonders im April. Auf dem Rasterfeld E4 auf Skalenebene S1 werden im Vergleich zu den kumulierten S2-Flächen höhere Methanemissionen gemessen werden. Da es räumlich und zeitlich zu unterschiedlich starken Emissionen gekommen ist, kann ein Emissionsverhalten einer Deponie wie auch schon beschrieben von Rachor et al. (2010) nicht anhand von einer einzelnen Messkampagne erfasst werden.

Die in Tabelle 5-12 dargestellten Variabilitätskoeffizienten der Skalenebene S1 und S2 für die Methanfracht, -emission, Kohlendioxidemission und die Methanoxidationseffizienzen belegen eine Zunahme der Variabilität mit der Größe der Skalenebene.

Die Hypothese 2, dass die Emissionen auf allen Skalenebenen (S1 und S2) inhomogen aus dem Oberboden austreten und die Variabilität der mittels Haubenmessung auf der Skalenebene S1 gemessenen Methan- und Kohlendioxidemissionen größer als diejenigen auf der Skalenebene S2 ist, kann somit angenommen werden.

6.4 Inhomogene räumliche Befruchtung der Methanoxidationsschicht und entsprechender Anstieg der Bodengaskonzentrationen Richtung Oberhang

Die räumliche Variabilität der Gaskonzentrationen über die betrachteten Monate lässt auf eine unterschiedliche Durchströmung der Hangbereiche des Testfeldes schließen. Die erhöhten Methanfrachten im Oberhangbereich über den gesamten betrachteten Zeitraum wurden auch schon von Geck (2011) für denselben Standort beschrieben. Abbildungen 5.14 und 5.15 stützen die Hypothese. Da das Testfeld an Ober- und Unterhang identisch aufgebaut ist und somit eine Gasverteilung flächig homogen erfolgen sollte, sind Einflussfaktoren auf eine ungleichmäßige Fracht auf die Methanoxidationsschicht zu suchen. Kröckel (2011) fand auf demselben Testfeld keinen signifikanten Einfluss der Hangposition und der Entfernung zu den Gasinlets auf die Bodengaskonzentration. In den Tiefen 60 und 100 cm kann hinsichtlich der Zusammensetzung der Bodengasphase von einer signifikanten Unterteilung des Testfeldes in mindestens einen Oberhangbereich und einen Unterhangbereich (Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8) gesprochen werden. Die aufgrund der vermehrt aufgetretenen höheren Methanfrachten im Oberhangbereich gebildeten Gruppen nach Tabelle 5-10 zeigten keine signifikant durchgängige Unterteilung der Skalenebene S1 in einen Ober- und Unterhangbereich oder einen signifikanten Einfluss des Randbereichs. Auch eine signifikante Unterscheidung von Ober- und Unterhangbereich mit einem nicht signifikant unterschiedlichem Übergangsbereich konnte nicht nachgewiesen werden. Häufig handelt es sich lediglich im April um signifikante Unterscheidungen ($p < 0,05$) in

verschiedene Frachtbereiche. Die Variabilitätskoeffizienten der Methanfrachten auf Skalenebene S1 liegen weitgehend über denen von Skalenebene S2.

Wahrscheinlich spielen Faktoren wie die Neigung des Testfeldes auf die Feuchteverteilung in der Methanoxidationsschicht und in der Gasverteilungsschicht eine übergeordnete Rolle. Nach Moldrup et al. (2000) und David Suits et al. (2004) erhöht die Bodenfeuchte die Tortuosität des Porensystems und vermindert damit die Diffusivität von Gasen. Im Oberhangbereich würde ein geringer mächtiger oder abreißender Kapillarsaum an der Grenze zwischen Kapillarschicht (Sand) und Kapillarblock (Kies, dient auch als Gasverteilungsschicht) zu einer gegenüber dem Unterhang erhöhten Gasdurchlässigkeit führen und so eine stärkere Befruchtung dieses Bereichs verursachen. Mit zunehmender Strecke zum Testfeldfuß wird der Kapillarsaum immer durchgängiger und undurchlässiger für das Deponiegas, was eine geringere Befruchtung des Unterhangbereiches erklären würde, was auch schon Berger et al. (2005) in einer im Labor simulierten Kapillarsperre beschrieben haben. Röwer, I. bestätigt dies ebenfalls in ihrem anstehendem Paper: „They found several indications for the upslope section receiving a higher gas load: ... and (4) the water saturation was higher downslope.“ Mit den bis in 80 cm Tiefe entnommenen Bodenproben und der anschließenden Feuchtigkeitsbestimmung konnte solch ein Trend neben einer leichten Variabilität über das Testfeld nicht nachgewiesen werden. Widersprüchlich zu dieser Überlegung ist allerdings der Bereich um A9 im Mai, Juni und Juli, der nahezu dieselbe Befruchtung wie Bereiche im Oberhangbereich erfährt. Randbereiche, wie im April die Rasterfelder B1 und C1, erfahren wahrscheinlich aufgrund von Gasmigrationen stärkere Befruchtung als erwartet. Ein möglichst homogener Gasfluss und eine gleichmäßige Durchlässigkeit innerhalb einer Methanoxidationsschicht sind eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine effiziente Methanoxidation (ÖVA Arbeitsgruppe 2008). Bei einer stärkeren Hangneigung wäre zu erwarten, dass der Kapillarsaum weiter unten am Hang abreißt und das Gas somit über eine größere Fläche der Methanoxidationsschicht migrieren würde. Die dadurch verringerte Flächenfracht würde eine höhere Oxidationsleistung zur Folge haben. Hier muss ein Optimum zwischen der Funktion der Kapillarschicht als Dränschicht und als Gasverteilungsschicht gefunden werden.

Abbildung 5-2 zeigt den Temperaturverlauf über die Bodentiefe. Die Auswahl des dargestellten Zeitraumes wurde aufgrund einer zunehmenden Temperaturamplitude zwischen den Loggern gewählt, so dass der Zeitraum vor den Messkampagnen von Anfang Februar bis Anfang April zusätzlich mit dargestellt wird. Aufgrund eines Defektes des Gaszufuhrsystems erfolgte vom 01.02.2013 bis zum 11.03.2013 keine aktive Begasung des Testfeldes. In diesem Zeitraum zeigen die Temperatursensoren an Unter-, Mittel- und Oberhang sehr ähnliche Werte mit einer maximalen Differenz von 5,29 bis 4,42 °C in einer Tiefe von 15 cm am 06.03.2013. Mit Einschaltung der aktiven Begasung wurde ein Auseinandergleiten der Bodentemperaturen an Unter-, Mittel- und Oberhang mit Temperaturen von 22,82 bis 16,94 °C in einer Tiefe von 80 cm Ende Juli beobachtet. Dies wird auf einen Effekt des eingeleiteten Deponiegases zurückgeführt. Am Unterhang werden die geringsten Temperaturen, am Oberhang die höchsten Temperaturen beobachtet, wodurch die Bodentemperatur des Unterhangbereiches scheinbar geringer durch das Deponiegas

beeinflusst wird als der Oberhangbereich. Aus der unterschiedlichen Erwärmung der Hangbereiche wird gefolgert, dass der Oberhang stärker mit dem relativ zum Boden warmen Gas durchströmt wird und damit die Methanoxidationsschicht hier eine höhere Befruchtung erfährt als der Mittel- und Unterhang. Eine Wärmeentwicklung aufgrund der biologischen Aktivität bei erhöhter Fracht kann diesen Effekt verstärken. Dieses Phänomen kann allerdings nur auftreten, wenn der Oberhang gasdurchlässiger ist als die anderen Bereiche des Testfeldes. Bei gleicher Einbauweise, d. h. einem gleichen Verdichtungsgrad kann dies nur passieren, wenn es am Oberhang in der Methanoxidationsschicht trockener ist bzw. wenn am unteren Rand der Kapillarschicht der Kapillarsaum abreißt, was stets zuerst am Oberhang passiert, da das Wasser sich von oben nach unten bewegt. Unter Kapitel 5.5 wurde bereits auf eine Unterteilung des Testfeldes in verschiedene Hangbereiche hingewiesen, die aufgrund dieses Effektes eindeutig unterstützt werden.

Die Hypothese 3, dass die Befruchtung der Methanoxidationsschicht räumlich inhomogen ist und entsprechend der räumlichen Muster der Bodengaskonzentrationen zum Oberhang hin ansteigt, kann somit nur zum Teil, nämlich der inhomogenen räumlichen Befruchtung der Methanoxidationsschicht angenommen werden. Allerdings treten nicht durchgängig höhere Frachten an Positionen mit entsprechenden Bodengaskonzentrationen nur am Oberhangbereich auf.

7. Fazit

Die hinzu gewonnenen Erkenntnisse der Prozessanalyse der Methanoxidation und der Analyse der Rekultivierungsschicht (Teilprojekt 1 des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundprojekt MiMethox – „Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten“), in dessen Rahmen diese Bachelorarbeit erstellt wurde, leisten einen kleinen Beitrag zum besseren Verständnis der Methanoxidationsprozesse in Deponie-Abdeckschichten und folgen somit dem in Artikel 20a Grundgesetz verankerten Nachhaltigkeitsgedanken.

Die Ergebnisse zur Überprüfung der Hypothesen weisen bei einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht auf bereits kleinräumig sehr starke Unterschiede der Eigenschaften und somit einer unterschiedlichen Methanoxidation hin. Die Leistung von Methanoxidationsschichten, wie häufig auch bei anderen offenen System, ist abhängig von Umgebungsparametern und wird durch diese beeinflusst. Physikalische Einflussfaktoren des Wetters und davon abhängige Parameter wurden auf eine mögliche Beeinflussung auf die Methanoxidation, -konzentration bzw. -emission untersucht, konnten aber nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Die räumlichen Muster der Bodengaskonzentrationen und -emissionen variieren zwischen den Messterminen, wobei mit die räumliche Variabilität höher war als die zeitliche. Mit einer Zunahme der Fläche der Methanoxidationsschicht steigt ebenfalls die räumliche Variabilität. Da es über die Zeit zu unterschiedlich starken Emissionen gekommen ist, kann ein Emissionsverhalten einer Deponie nicht anhand von einer einzelnen Messkampagne erfasst werden. Um einer Entstehung von Hotspots aus präferenziellen Fließwegen und somit einer massiven Methanemission entgegen zu wirken, ist es weiterhin sinnvoll durch Begehungen solche Bereiche auf einer abgedeckten Deponie zu identifizieren und durch geeignete Maßnahmen wie z. B. einer Sanierung zu minimieren, um geringstmögliche Methanemissionen in die Atmosphäre zu gewährleisten. Ein inhomogenes Auftreten von Gasemissionen aus dem Oberboden auf allen untersuchten Skalenebenen folgert die Notwendigkeit einer Begehung von abgedeckten Deponien in kleinstmöglichen Rasterflächen. Die Untersuchungen haben weiter eine inhomogene räumliche Befruchtung der Methanoxidationsschicht mit Deponiegas gezeigt. Diese räumlich erhöhte Befruchtung kann an einigen Stellen evtl. zu einer Überfrachtung führen, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft wurde. Mit der gewählten Erhöhung der Methanfracht um ca. 15 % wurde kein auf diese Mehrfracht resultierendes Phänomen beobachtet. Es handelt sich somit um keine Überfrachtung des gesamten Testfeldes. Zeitlich stabile Muster der Gasemissionen emittieren aufgrund von präferenziellen Fließwegen Deponiegas mit höheren Methankonzentrationen als die übliche Fläche. In wie fern hier eine Überfrachtung einzelner Felder vorliegt steht zur Diskussion.

Insgesamt stellt die mikrobielle Methanoxidation in einer als Methanoxidationsschicht ausgeführten Deponie-Abdeckschicht ein hohes Potential zur Verminderung deponiebürtiger Methanemissionen dar.

8. Ausblick

Nach der Messkampagne im August 2013 wurde die Methanoxidationsschicht des untersuchten Testfeldes abgetragen und erneut im verdichteten Zustand aufgebaut. Um einen direkten Vergleich beider Varianten zu erzielen, sollten trotz des hohen materiellen Einsatzes ebenfalls alle drei Skalenebenen (S1, S2, S3) mit Gaslanzen in den zuvor verwendeten Tiefen und der Installation der sonstigen Gerätschaften versehen werden. Die Gaslanzen auf den Skalenebenen S1 und S2 wurden bereits gesetzt, für Skalenebene S3 gibt es derzeit keine konkrete Planung. Um zusätzlich Emissionsmessungen auf der Skalenebene S3 durchführen zu können, wäre die Entwicklung einer kleinen Haube mit einer Fläche $< 0,04 \text{ m}^2$ ratsam. Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Fracht über die Fläche, können durch die Aufnahme der Emissionen auch auf kleinskaligen Ebenen wie der Skalenebene S3 detaillierte Aussagen zum Fließverhalten und Einflussparameter gefunden und beschrieben werden. Der Untersuchungszeitraum wäre so zu wählen, dass wenigstens die Variabilität über die Dauer eines kompletten Jahres und somit der Jahreszeiteneinfluss festgestellt werden kann.

Die ungleichmäßige Verteilung der Gasfracht lässt auf weitere Einflussfaktoren schließen. Einer rein vertikalen Durchströmung stehen viele Einflussparameter wie der örtlich variablen Bodenverdichtung, Agglomeratbildung der Methanoxidationsschicht oder auch der an verschiedenen Hanglagen unterschiedliche Wasserhaushalt entgegen. Weitere und detailliertere Untersuchungen zur Gasverteilung und Gasströmung innerhalb des Testfeldes würden weitere Anhaltspunkte zur Durchströmung von porösen Schichten geben, die auch die Differenz von theoretischer Sollfracht und der zurückgerechneten Istfracht erklären könnten.

Für Penetrologger-Kartierungen werden nach Campbell et al. (1991) 10 Messungen pro Testbereich empfohlen. Durch das Eindringen des Konus kann eine Beeinflussung des benachbarten Testbereiches ausgeschlossen werden, wenn nach Eijkelkamp environmental (2010) ein Abstand von mindestens 50 bis 60 cm eingehalten wird. Besonders bei den kleineren Skalenebenen 2 und 3 muss hier ein guter Mittelweg zur Fehlerminimierung zwischen genügend hoher Messungen zur Fehlerrelativierung und einzuhaltender Abstand der einzelnen Messpunkte gefunden werden. Eine höhere Anzahl der Messungen als bisher durchgeführt ist zur genaueren Beschreibung des Testfeldes zu empfehlen. Da es sich allerdings um invasive Maßnahmen handelt, ist eine Penetrologger-Kartierung erst zum Ende des Untersuchungszeitraumes sinnvoll.

Kurzzeitig veränderliche Umweltfaktoren wie die vorherrschenden maximalen und Durchschnittswindgeschwindigkeiten oder ein veränderlicher Luftdruck scheinen maßgeblich an einer Verschiebung des vorhandenen Gasprofiltyps beteiligt zu sein. Um näher-spezifizierte Sog- und Stauwirkungen im Boden zu erhalten sind genaue Messaufnahmen während der Haubenmessungen oder die Entwicklung anderer Installationen nötig. Die Änderung dieses Gasprofiltyps würde maßgeblich zum Verständnis der vorhandenen Gaskonzentrationen in den Gaslanzen und den räumlichen und zeitlichen Mustern des Emissionsverhaltens beitragen.

9. Literaturverzeichnis

- Berger, J.; Fornés, L. V.; Ott, C.; Jager, J.; Wawra, B.; Zanke, U. (2005): Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier. In: *Waste Manag* 25 (4), S. 369–373. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.02.005.
- Bortz, J. (2005): Statistik. Für human- und sozialwissenschaftler; sechste Auflage. Verlagsort Wein; Verlag Springer.
- Butz, W. (2006): Ansatz für die Schätzung der luftseitigen Deponieemissionen für das E-PRTR März 2006.
- Campbell, D. J.; O’Sullivan, M. F. (1991): The Cone Penetrologer in Relation to Trafficability, Compaction, and Tillage. In: *Soil Analysis. Physical Methods. Books in Soil, PLants and the Environment*.
- Christensen, N. B.; Sisson, J. B.; Barnes, P. L. (1989): A method for analyzing penetration resistance data. In: *Soil and Tillage Research* 13 (1), S. 83–91. DOI: 10.1016/0167-1987(89)90040-8.
- Christophersen, M.; Kjeldsen, P.; Holst, H.; Chanton, J. (2001): Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. In: *Waste Management & Research* 19 (6), S. 595–612. DOI: 10.1177/0734242X0101900616.
- David Suits, L.; Sheahan, T. C.; Cabral, A. R.; Tremblay, P.; Lefebvre, G. (2004): Determination of the Diffusion Coefficient of Oxygen for a Cover System Including a Pulp and Paper By-Product. In: *Geotech. Test. J.* 27 (2), S. 11233. DOI: 10.1520/GTJ11233.
- Detener, F.; Stevenson, D.; Cofala, J.; Mechler, R.; Amann, M.; Bergamaschi, P. et al. (2005): The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone and radiative forcing: CTM calculations for the period 1990–2030.
- Dexter, A. R.; Czyż, E. A.; Gałę, O. P. (2007): A method for prediction of soil penetration resistance. In: *Soil and Tillage Research* 93 (2), S. 412–419. DOI: 10.1016/j.still.2006.05.011.
- Eijkelkamp environmental (2010): Penetrologer Gebrauchsanweisung. M1.06.15.SA.D.
- EPA (2012): OAR, Climate Change Division: Summary Report - Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions Projections 2012.
- Gebert, J. (2012): Mikrobielle Methanoxidation im Biofilter zur Behandlung von Rest-Emissionen bei der passiven Deponieentgasung. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop*, Bd. 55.
- Gebert, J.; Gröngröft, A. (2012a): Systeme zur Methanoxidation - Materialanforderungen. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle*

Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 79–87.

Gebert, J.; Groengroeft, A.; Pfeiffer, E.-M. (2011a): Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. In: *Soil Biology and Biochemistry* 43 (9), S. 1759–1767. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.07.004.

Gebert, J.; Pfeiffer, E.-M. (2012b): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten: Das Projekt MiMethox. -gefördert durch das BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme klimazwei-. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop*, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 43–53.

Gebert, J.; Röwer, I. U.; Scharff, H.; Roncato, C. D.L.; Cabral, A. R. (2011b): Can soil gas profiles be used to assess microbial CH₄ oxidation in landfill covers? In: *Waste Management* 31 (5), S. 987–994. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.008.

Giani, L.; Bredenkamp, J.; Eden, I. (2002): Temporal and spatial variability of the CH₄ dynamics of landfill cover soils. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 2002, S. 205–210.

Geck, C. (2011): Räumliche und zeitliche Variabilität von Methangehalten in der Abdeckschicht einer Altdeponie. Diplomarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Institut für Geographie.

Geck, C.; Gebert, J.; Scharff, H.; Pfeiffer, E.-M. (2012): Räumliche und zeitliche Variabilität der Bodengasphase in einer Abdeckschicht zur Methanoxidation. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop*, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 177–189.

Gröngröft, A.; Gebert, J. (2012): Heterogenität von Gasflüssen durch heterogene Bodeneigenschaften. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop*, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 67–78.

IFAS (2012); Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. R. Stegmann und Partner: Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanisch-biologische behandelten Abfällen. Vorhaben Z 6 - 30533/3, FKZ 360 16 036. im Auftrag des Umweltbundesamtes.

IPCC (2013): History. Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml#Uk2gVxDeKQI, zuletzt geprüft am 03.10.2013.

- Janson, O. (1988): Measurement and evaluation of hazardous compounds in landfill gas from municipal and industrial waste - an application of trace analysis (48), S. 333–339.
- Jarass, H. D.; Pieroth, B. (2011): Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Kommentar. 11. Aufl. München: Beck.
- Kappas, M. (2009): Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften.
- Kröckel, F. (2011): Testfeld zur Methanoxidation in Deponieabdeckschichten: Räumliche Variabilität der Bodengaskonzentrationen. Bachelorarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Institut für Bodenkunde.
- LAGA (2010); Ad-hoc-AG "Deponietechnik": Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-6 Kapillarsperren in Deponieoberflächenabdichtungssystemen. Online verfügbar unter http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/Bundeseinheitlicher_Qualitaetsstandard_5-6_Kapillarsperren_in_Deponieoberflaechenabdichtungssystemen_vom_09112010.pdf?command=downloadContent&filename=Bundeseinheitlicher_Qualitaetsstandard_5-6_Kapillarsperren_in_Deponieoberflaechenabdichtungssystemen_vom_09112010.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2013.
- Meteorologisch Instituut Koninklijk Nederlands (2012a): Factsheet KNMI waarschuwingen regen. Factsheet.
- Meteorologisch Instituut Koninklijk Nederlands (2012b): KNMI waarschuwingen temperatuur. Factsheet.
- Moldrup, P.; Olesen, T.; Schjøning, P.; Yamaguchi, T.; Rolston, D. E. (2000): Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Undisturbed Soil from Soil Water Characteristics. In: *Soil Science Society of America Journal* 64 (1), S. 94. DOI: 10.2136/sssaj2000.64194x.
- Müller, W. (2008): Mechanische Grundoperationen und ihre Gesetzmäßigkeiten. München: Oldenbourg.
- M + W Ingenieurgesellschaft (2009a): Deponie Wieringermeer Detaillageplan. Planung Versuchsfelder Oberflächenabdichtung. 02_A-L-02_01.dwg.
- M + W Ingenieurgesellschaft (2009b): Deponie Wieringermeer Schnitt C-C. Planung Versuchsfelder Oberflächenabdichtung. A-S-01_03.dwg.
- Olaya, V. (Rev. 2004): A gentle introduction to SAGA GIS (Edition 1.1). Online verfügbar unter <http://www.saga-gis.org>, zuletzt geprüft am 09.11.2013.
- ÖVA Arbeitsgruppe (2008): Methanoxidationsschichten. Leitfaden April 2008.
- Poulsen, T. G.; Christophersen, M.; Moldrup, P.; Kjeldsen, P. (2003): Relation landfill gas emissions to atmospheric pressure using numerical modelling and state-space analysis. In: *Waste Management*, Bd. 21, S. 356–366.

Rachor, I.; Gebert, J. (2009): Spatial and temporal variability of gas emissions from old landfills. In: Sardinia 2009, 12th International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings. CISA, Cagliari.

Rachor, I.; Gebert, J.; Pfeiffer, E.-M. (2012): Emissionsverhalten von Altdeponien. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 105–112.

Rachor, I.; Streese-Kleeberg, J.; Gebert, J. (2010): Zeitliche und räumliche Variabilität von Emissionen aus Altdeponien. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten, Bd. 63. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (63), S. 117–128.

Rettenberger, G.; Mezger, H.; Ingenieurgruppe RUK; Dipl.-Ing. S. Urban-Kiss & Partner (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen. Leitfaden Deponiegas.

Röwer, I. U.; Geck, C.; Gebert, J.; Pfeiffer, E.-M. (2010): Räumliche Variabilität der Bodengaskonzentrationen und der Methanoxidationskapazität einer Deponie-Abdeckschicht. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten, Bd. 63. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (63), S. 129–142.

Röwer, I. U.; Gebert, J.; Gröngröft, A.; Pfeiffer, E.-M. (2012): Sanierung von Hotspots der Methanemission auf einer Altdeponie: Ergebnisse. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 125–145.

Ruxton, Graeme D.; Colegrave, Nick (2006): Experimental design for the life sciences. 2nd ed. Oxford, New York: Oxford University Press.

Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.-P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Heidelberg, Berlin: Spektrum, Akad. Verl. (Spektrum Lehrbuch).

Scheutz, C.; Kjeldsen, P.; Bogner, J. E.; Visscher, A. de; Gebert, J.; Hilger, H. A. et al. (2009): Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. In: *Waste Management & Research* 27 (5), S. 409–455. DOI: 10.1177/0734242X09339325.

Spokas, K.; Graff, C.; Morcet, M.; Aran, C. (2003): Implications of the spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses. In: *Waste Management* 23 (7), S. 599–607. DOI: 10.1016/S0956-053X(03)00102-8.

Stegmann, R.; Heyer, K.; Hupe, K.; Willand, A. (2006): Deponienachsorge. Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlastung aus der Nachsorge. Abschlussbericht UFOPLAN 204 34 327.

Steinert, B.; Rolle, G.; Grabowsky, K.; Melchior, S. (2012): Aufbau der Testfelder auf der Deponie Wieringermeer. In: Eva-Maria Pfeiffer (Hg.): Hamburger Bodenkundliche Arbeiten: Mikrobielle Methanoxidation in Deponie-Abdeckschichten Abschluss-Workshop, Bd. 68. Unter Mitarbeit von Julia Gebert. Hamburg: Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg (68), S. 161–176.

VDI Richtlinie 3790

Anhang

Anhang I: Ergänzende Materialien zum Ergebnisteil

Tabelle 5-4: Legende; Übersicht für Gaskonzentrationen aller Rasterlanzen aller Skalenebenen für Abbildungen 5-8 bis 5-11

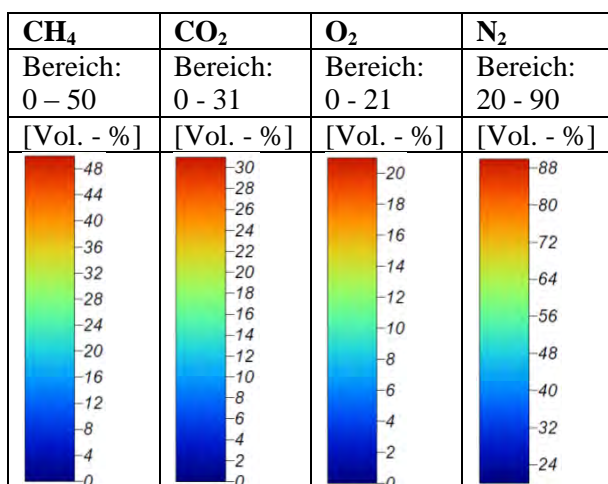


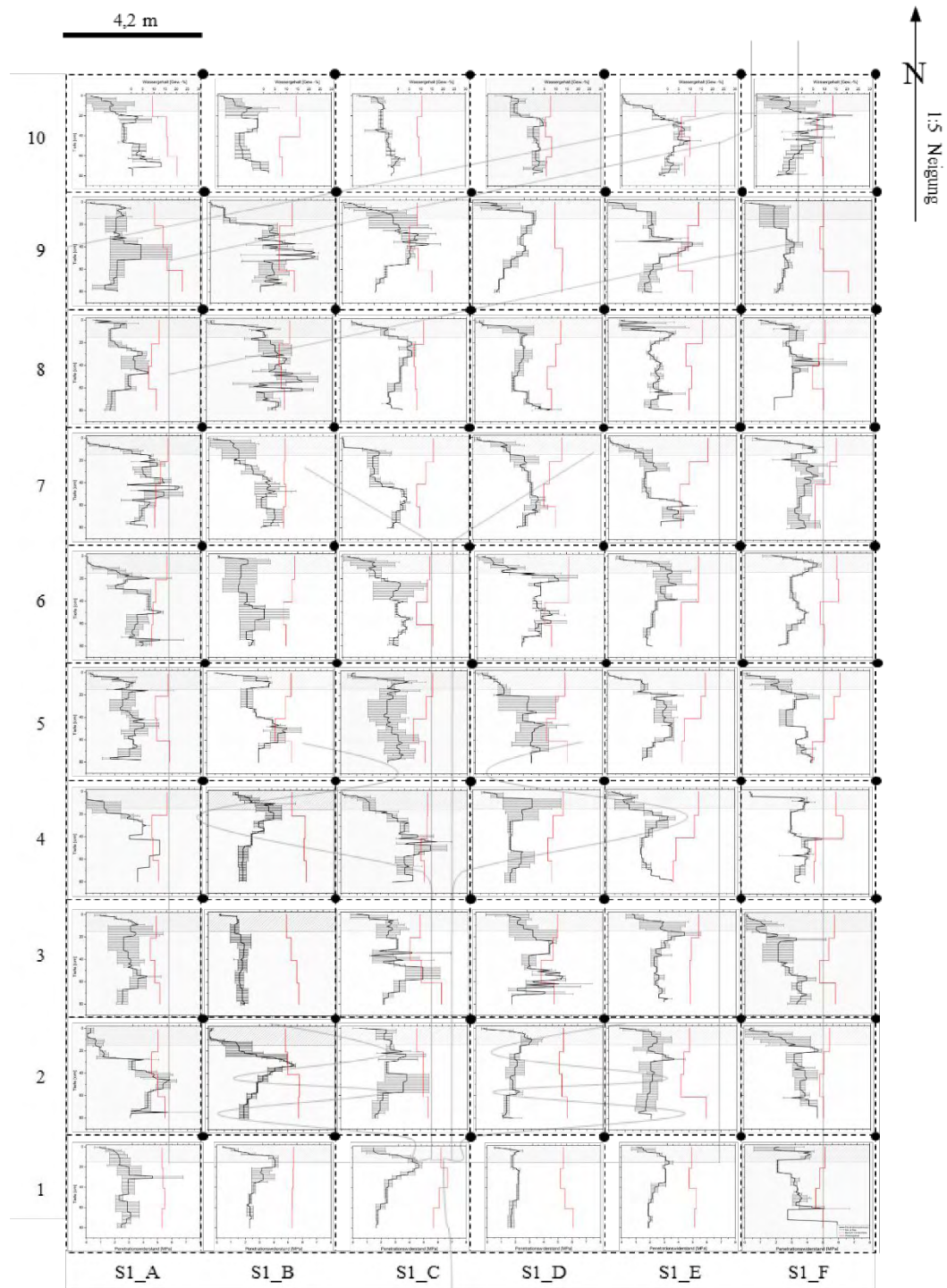
Tabelle 5-9: Legenden für Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17: Methanfracht, -emission, -oxidationseffizienz und Kohlendioxidemission

		Skalenebene S1	Skalenebene S2
CH₄-Fracht [g m ⁻² d ⁻¹]		70 < 84	3,33 < 4
		56 < 70	2,67 < 3,33
		42 < 56	2 < 2,67
		28 < 42	1,33 < 2
		14 < 28	0,67 < 1,33
		0 < 14	0 < 0,67
CH₄-Emission [g m ⁻² d ⁻¹]		20 < 24	1,25 < 1,5
		16 < 20	1 < 1,25
		12 < 16	0,75 < 1
		8 < 12	0,5 < 0,75
		4 < 8	0,25 < 0,5
		0 < 4	0 < 0,25
CO₂-Emission [g m ⁻² d ⁻¹]		275 < 330	10 < 12
		220 < 275	8 < 10
		165 < 220	6 < 8
		110 < 165	4 < 6
		55 < 110	2 < 4
		0 < 55	0 < 2
CH₄-Oxidationseffizienz [%]		80 < 100	
		60 < 80	
		40 < 60	
		20 < 40	
		0 < 20	

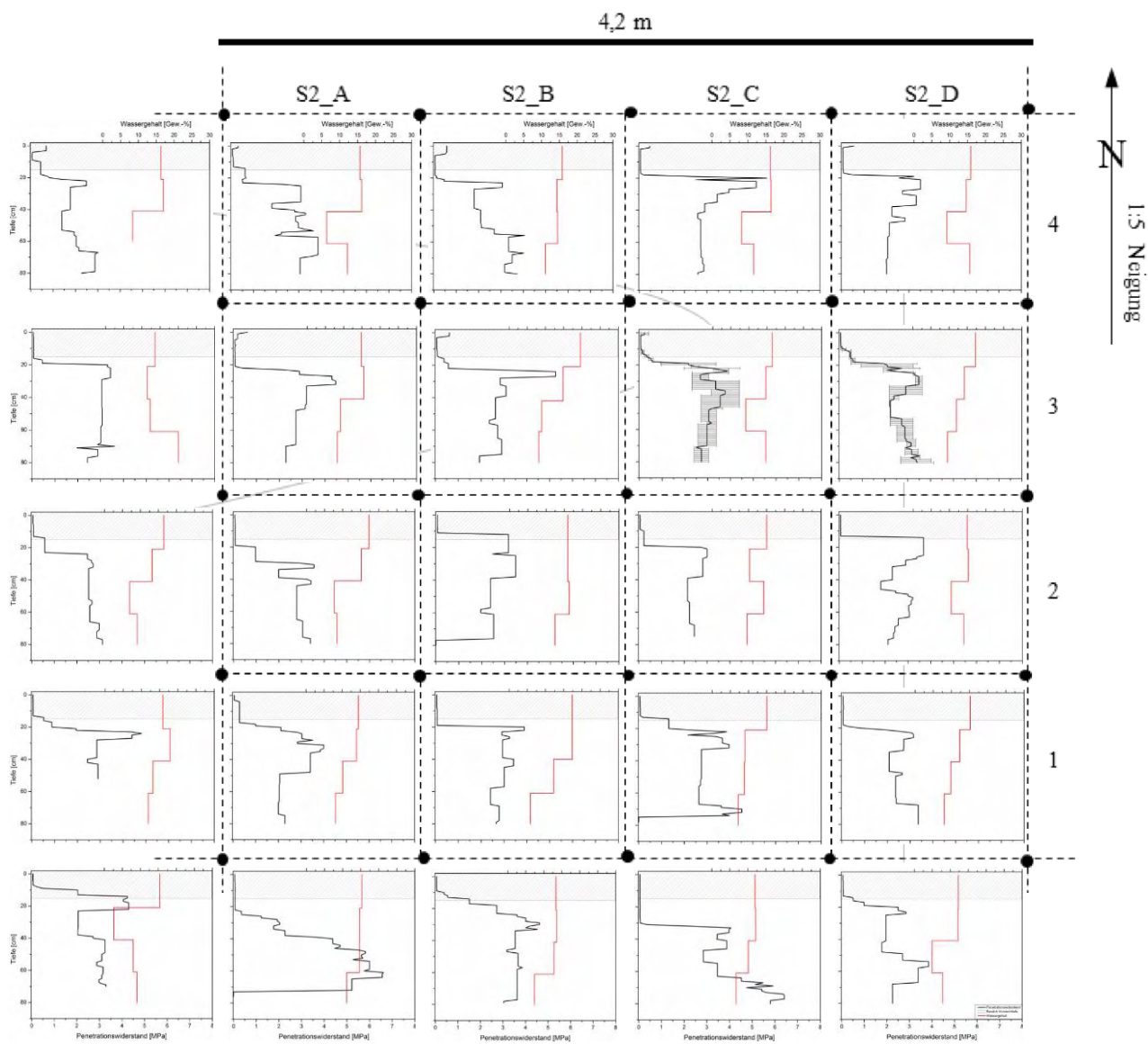
Anhang II: Ergänzende Abbildungen zum Ergebnisteil

- Penetrodaten mit Wassergehalten der Skalenebene S1 Seite 75
- Penetrodaten mit Wassergehalten der Skalenebene S2 Seite 77
- Penetrodaten mit Wassergehalten der Skalenebene S3 Seite 78

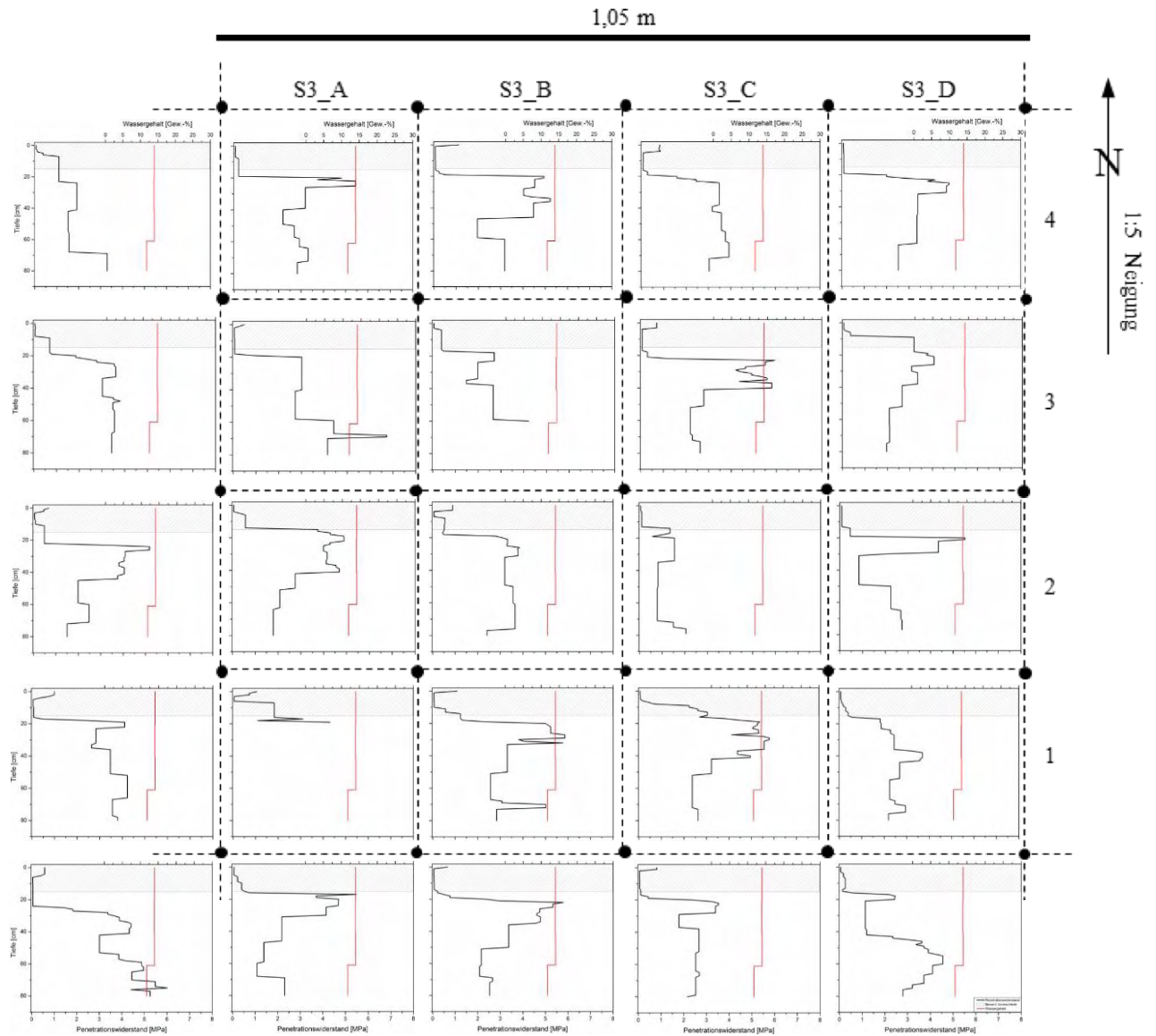
Ergänzende Abbildungen zum Ergebnisteil: Penetrodaten (schwarze Linie) mit Wassergehalten (rote Linie) der Skalenebene S1



Ergänzende Abbildungen zum Ergebnisteil: Penetrodaten (schwarze Linie) mit Wassergehalten (rote Linie) der Skalenebene S2



Ergänzende Abbildungen zum Ergebnisteil: Penetrodaten (schwarze Linie) mit Wassergehalten (rote Linie) der Skalenebene S3



Anhang III: Auswertung der flächenbezogenen Daten mit SAGA-GIS

SAGA ist ein freies („open Source“) geographisches Informations System (GIS) mit der Unterstützung für Vektor und speziell Rasterdaten. Für Benutzer die nicht alltäglich mit solchen Programmen in Berührung kommen bietet die Möglichkeit der Ausführung von einem portablen Speicher wie einem USB-Stick einen großen Vorteil, da das Programm weder gekauft noch extra installiert werden muss. Das Handeln geographischer Daten vieler verschiedener Quellen ermöglicht eine gute Darstellung und Vergleichbarkeit der Daten. Sofern man etwas tiefer bereits in die C++ Programmierung eingestiegen ist, können auch Module nach den eigenen Wünschen angepasst oder erstellt werden, worauf allerdings in diesem Fall verzichtet wurde. Hauptsächlich an der Entwicklung beteiligt sind die Universitäten Göttingen und Hamburg (Olaya 2004).

Nach erfolgreichem Starten des Programmes müssen die zu bearbeitenden bzw. darzustellenden Daten z.B. in Form von .txt Dateien dem Programm zur Verfügung gestellt werden: „File → Table → Load Table“. Werden mehrere Dateien hochgeladen die jeweils Informationen enthalten, aber zusammen benötigt werden, müssen diese Dateien über „Modules → Table → Tools → Join Attributes From a Table“ verbunden werden. Anschließend kann die weitere Vorgehensweise in die folgenden Punkte unterteilt werden.

Erstellung und Belegung der interpolierten Rasterflächen

Interpolierte Rasterflächen ermöglichen eine gute Darstellung von Gaskonzentrationen, interpoliert aus den vorhandenen Rasterlanzen. So kann der Verlauf zwischen den Punkten angenähert und besser abgeschätzt werden. Zur Erstellung müssen die in der Tabelle vorliegenden Daten der Rasterlanzenstandorte in Punkte konvertiert werden: „Modules → Shapes → Conversion → Convert a Table to Points“. Anschließend werden die Daten mit den erstellten Datenpunkte verknüpft: „Modules → Shapes → Table → Join Attributes From a Table“; leere Zellen werden dabei nicht zu „0“ gesetzt. Nach Wahl der anzuzeigenden Werte (beispielsweise der Methankonzentrationen) werden diese über „Modules → Grid → Gridding → Spline Interpolation → Thin Plate Spline (Global)“ über interpolierte Flächen dargestellt. Für die Interpolation wurden folgende Parametereinstellungen verwendet:

Tabelle 0-1: Rahmenbedingungen für die Interpolation mit SAGA GIS

	Skalenebene S1	Skalenebene S2	Skalenebene S3
Cellsize	0,1	0,01	
Regularisation	0,0001		
Feldgrenze „links“	0	15,9375	16,734375
Feldgrenze „rechts“	29,75	22,3125	18,328125
Feldgrenze „unten“	0	11,6875	12,484375
Feldgrenze „oben“	42,5	18,0625	14,078125
Divisor	4,25	1,0625	0,265625

Zur Erstellung der interpolierten Flächen wurde nach Geck (2011) die Variante „Gridding“ mit der „Thin Plate Spline (Global)“ verwendet. Die Skalentiefe („Range“) der jeweiligen Gase wurden vom kleinsten bis zum größten vorkommenden Wert zusätzlich einem kleinen

Sicherheitsbereich festgesetzt. In dem Fall von Methan ergibt sich ein Bereich von 0 – 50 %, Kohlendioxid von 0 – 31 %, Sauerstoff von 0 – 21 % und Stickstoff von 20 – 90 %.

Erstellung und Belegung der quadratischen Rasterflächen (Graticule)

Um beispielsweise Emissionen darzustellen, müssen die Daten ganzen Rasterflächen auf dem Testfeld zugeordnet werden. Zur Darstellung des gesamten Testfeldes wird ein in 60 Teile geteiltes Quadrat (in SAGA GIS „Graticule“) erstellt. Die Abmessungen sollten proportional zueinander zu den interpolierten Rasterflächen sein und wurden in diesem Fall für die Skalenebene S1 mit 25,5 Punkte x 42,5 Punkte gewählt. Die Unterteilung in 60 Felder wird durch die Wahl des Divisors auf 4,25 erreicht. Die Abmessungen der Skalenebene S2 würden dann entsprechend den Maßen der S1 4,25 Punkte x 4,25 Punkte mit dem Divisor 1,0625 sein.

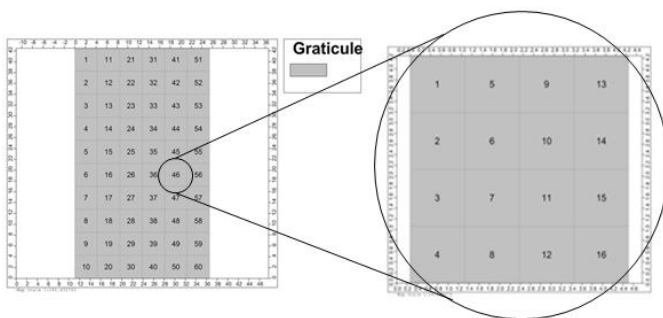


Abbildung 0-1: Graticule in SAGA GIS der Skalenebenen S1 und S2

Analog wird ein Rasterfeld der Skalenebene S2 weiter zur Skalenebene S3 unterteilt.

Die Daten werden den einzelnen Bereichen des Graticules durch „Shapes → Table → Join Attributes from a Table (Shapes)“ zugeordnet. Durch die Darstellungsvariante „Diskrete Farben“ werden scharfe Abgrenzungen verschiedener Bereiche möglich. Vergleichbare Abbildungen werden zudem durch gleiche Farbtafeln je Darstellungsart (z.B. Methan-, Kohlendioxidemission oder Methanfracht) mit den gleichen Minima und Maxima ermöglicht.

Anhang IV: Elektronische Daten

Der Arbeit wird eine CD-ROM mit folgenden Inhalten beigelegt:

- pdf.-Datei der vorliegenden Arbeit
- Photos (Auswahl)