

Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

Alterung von MBA-Material bei Verwendung als Rekultivierungssubstrat

Feldversuche, Analytik und statistische Auswertung

eingereicht von

Rupert Angermeier

Stud. Kennz.: H910 / Matr. Nr.: 0240248

Wien, Februar 2010

Betreut durch

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Lechner

und

Dipl.-Ing. Johannes Tintner

Kurzfassung

Deponien, auf denen Abfälle nach einer mechanisch-biologischen Behandlung (MBA) abgelagert werden, können gemäß der gültigen Deponieverordnung (DVO) während des Nachsorzeitraumes mit einer, gegenüber der DVO, alternativen Oberflächenabdeckung ausgestattet werden. Gerade bei Deponien, denen eine MBA Anlage angeschlossen ist, liegt die Idee nahe, MBA Material direkt als Abdeckmaterial zu verwenden.

Um Einblick in das Verhalten dieser Materialien zu erlangen, wurden auf zwei MBA-Deponien Versuche durchgeführt. Dazu wurden im Frühjahr 2008 Versuchsflächen eingerichtet, auf denen Material aus der Aufbereitung abgelagert wurde. Diese Flächen wurden in Felder unterteilt, auf welchen getrennt Gras, Raps sowie Weiden und Pappeln angepflanzt wurden. Außerdem wurde ein Teil der Flächen unbepflanzt belassen, um das Aufkommen von Spontanvegetation zu beobachten. Für diese vier Varianten wurden auf beiden Deponien jeweils 16 Testparzellen angelegt um die Ergebnisse statistisch auswerten zu können.

Des weiteren wurde auf beiden Versuchsflächen bei Versuchseinrichtung und nach der ersten Vegetationsperiode im Herbst 2008 von den Feldern Proben genommen, welche im Labor auf die Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammonium- und Nitrat-Stickstoff, pflanzenverfügbarer Phosphor, Glühverlust, Atmungsaktivität und Huminstoffgehalt untersucht wurden.

Bei der Variante Gras zeigte sich bereits in der ersten Vegetationsperiode eine gute Entwicklung der Pflanzendecke, bei den Varianten Raps und Spontanvegetation hatte sich noch keine dichte Vegetation ausgebildet. Von den Weiden und Pappeln konnten sich nur einige wenige Individuen etablieren.

Die Felder wurden nach Bewuchs, Probenahmezeitpunkt und -tiefe gruppiert und die Analyseergebnisse dieser Gruppen wurden mittels Varianzanalyse und t-Test miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass auf den Flächen mit guter Pflanzendeckung die Mineralisierung von organischen Bestandteilen des Materials schneller voran ging, hier jedoch auch signifikant mehr Kohlenstoff in Huminstoffen gebunden wurde. Insgesamt waren Auswaschungsvorgänge die dominierenden Prozesse in dem untersuchten Halbjahr.

Die Verwendung von MBA-Material als Substrat einer Methanoxidationsschicht bzw. Rekultivierungsschicht hatte einen positiven Effekt auf die Kohlenstoff-Stabilität des Materials, der durch eine Bepflanzung verstärkt wurde.

Abstract

Due to changes in the austrian landfill ordinance 2008, the cover of landfills for mechanically-biologically treated (MBT) waste can be made from MBT waste itself while the landfill is in its aftercare phase. For landfills which are adjacent to a MBT plant, it seems obvious to take advantage of this.

To gain insight into the changes of the properties of MBT waste under open field condition and vegetation, experiments were conducted on two landfills in the spring of 2008. On each study site fresh MBT material was applied on the surface and planted in with grass, rape, and a mix of willows and poplars. Furthermore some plots were left fallow to study the development of a spontaneous vegetation. This also served as a reference. To perform a statistical analysis with the results, for each of these four variants 16 plots were established.

Samples were taken from the plots at the beginning of the study and in the autumn of 2008. The samples were analysed in the laboratory for the parameters pH, electrical conductivity, ammonium, nitrate, plant available phosphor, loss of ignition, respiration activity and humic acids to assess the processes of leaching, mineralization and humification.

The grass grew well in this half year, the plots with rape and spontaneous vegetation didn't develop a dense cover of vegetation. Only very few willows and no poplars were able to establish.

Samples were grouped by vegetation, date and depth of sampling. The values of the various parameters for these groups were compared by an analysis of variance and t-tests. The results showed, that the vegetation intensified mineralization of organic substances of the material. However at the plots with vegetation more carbon was fixated in humic substances. Leaching was the dominant process in the first half year.

Exposure of MBT-output material to open field conditions has a positive effect on the stabilization of carbon, which is boosted by vegetation.

Danksagung

Vielen Dank an Peter Lechner und das ABF-Team, dass es mir ermöglicht wurde, diese Arbeit am Institut für Abfallwirtschaft zu schreiben.

Insbesondere möchte ich mich bei Johannes Tintner für die vielen hilfreichen Ratschläge und die konstruktive Kritik bedanken, ohne die diese Diplomarbeit nicht zu Stande gekommen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Material und Methodik	3
2.1	Material	3
2.2	Methodik	4
2.2.1	Versuchseinrichtung	4
2.2.2	Probengewinnung	4
2.2.3	Vegetationsaufnahme	8
2.3	Analytik	10
2.4	Versuchsplanung und statistische Auswertung	13
3	Ergebnisse	16
3.1	Vegetation	16
3.2	Auswertung Analytik	18
3.2.1	Leitfähigkeit	18
3.2.2	pH-Wert	22
3.2.3	Ammonium	23
3.2.4	Nitrat	27
3.2.5	Pflanzenverfügbare Phosphor	30
3.2.6	Glühverluste	33
3.2.7	Atmungsaktivität	35
3.2.8	Huminstoffe	40
4	Diskussion	42
4.1	Auswaschung	42
4.1.1	Leitfähigkeit	42
4.1.2	pH	42
4.1.3	Ammonium- und Nitratstickstoff	43
4.1.4	pflanzenverfügbare Phosphor	44
4.2	Mineralisierung	45
4.2.1	Glühverlust	45
4.2.2	Atmungsaktivität	46
4.3	Humifizierung	46
5	Zusammenfassung	48
	Literaturverzeichnis	50

A	Ergebnisse	A-1
B	Quellcodes	B-1
C	Abkürzungen und Probenbezeichnungen	C-1

Tabellenverzeichnis

1.1	Wurzelverhalten dominanter und spezieller Pflanzenarten auf einer Deponie, nach Linert (1997)	2
2.1	Gasmessungen – CO ₂ -Konzentration (% _{v/v}), Mittelwerte von jeweils 12 Messungen in ca. 40 cm Tiefe	7
2.2	Übersicht der Varianten mit Stichprobenanzahl, Probenahmedatum und -tiefe sowie den beprobten Feldern	9
2.3	Mindestgenauigkeitsschranke <i>d</i> der untersuchten Parameter	14
3.1	Zusammenstellung Mittelwerte und Standardabweichung	19
3.2	Leitfähigkeit – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mS · cm ⁻¹	20
3.3	Leitfähigkeit – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	20
3.4	Leitfähigkeit – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$	21
3.5	pH-Wert – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ)	22
3.6	pH-Wert – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	23
3.7	pH-Wert – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,3$	24
3.8	Ammonium NH ₄ -N – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg · kg ⁻¹ TS	24
3.9	Ammonium – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	25
3.10	Ammonium-Stickstoff – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ TS}$	26
3.11	Nitrat NO ₃ -N – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg · kg ⁻¹ TS	28
3.12	Nitrat – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	28
3.13	Nitrat-Stickstoff – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ TS}$	29
3.14	pflanzenverfügbare Phosphor P_{CAL} – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg · kg ⁻¹ TS	31
3.15	pflanzenverfügbare Phosphor – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	31
3.16	pflanzenverfügbare Phosphor – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ TS}$	32
3.17	Glühverlust – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in % TS	33
3.18	Glühverlust – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	34
3.19	Glühverlust – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 2,5 \text{ \% TS}$	34

3.20	Atmungsaktivität bezogen auf Trockensubstanz – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg O ₂ /g TS	35
3.21	Atmungsaktivität bezogen auf organische Trockensubstanz – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg O ₂ /g oTS	36
3.22	Atmungsaktivität (TS) – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	37
3.23	Atmungsaktivität (org. TS) – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$	38
3.24	Atmungsaktivität (TS) – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,5$ mg O ₂ /g TS	39
3.25	Atmungsaktivität (org. TS) – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 3$ mg O ₂ /g oTS	39
3.26	Huminsäuren – Mittelwerte und Standardabweichung in % oTS	41
3.27	Huminsäuren – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,6$	41
A.1	Messergebnisse aller Proben für alle untersuchten Parameter	A-1

Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsfläche St. Pölten, Einrichtung der Versuchsfläche und erste Probenahme, 14. April 2008	5
2.2	Anordnung der Versuchflächen auf den Deponien St.Pölten (links) und Allerheiligen (rechts), × markiert Probenahmestellen, Bemaßung in m	6
3.1	Versuchsfläche Allerheiligen, vor der zweiten Probenahme, 20. Oktober 2008. Auf den Flächen mit Gras ist eine gute Pflanzendecke gegeben, die anderen Flächen sind größtenteils kahl.	16
3.2	Versuchsfläche St. Pölten, vor der zweiten Probenahme, 26. Oktober 2008. Gute Pflanzendecke auf den Grasflächen, einige imposante Stauden der Spontanvegetation.	17
3.3	Boxplots Leitfähigkeit	18
3.4	Boxplots pH-Wert	22
3.5	Boxplots Ammonium	25
3.6	Boxplots Nitrat	27
3.7	Boxplots pflanzenverfügbarer Phosphor	30
3.8	Boxplots Glühverluste	33
3.9	Boxplots Atmungsaktivität (bezogen auf Trockenmasse)	36
3.10	Boxplots Atmungsaktivität (bezogen auf organische Trockenmasse)	37
3.11	Boxplots Huminsäuren St. Pölten	40

1 Einleitung

Zielsetzung Ziel dieser Arbeit ist es, die Veränderung von Output-Material aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) zu untersuchen, welches an der Oberfläche in Form einer Verwendung als Rekultivierungsschicht gelagert wird. Neben Alterungs- und Auswaschungsprozessen wird der Einfluss verschiedener Bepflanzungsvarianten auf das Material anhand mehrerer Parameter untersucht.

Problematik Nach §29 der Deponieverordnung (DVO, BMfLFUW, 2008) ist die Verwendung von Abfällen als Oberflächenabdeckung einer Massenabfalldeponie nicht zulässig. Dieses Verbot ist unabhängig von den Eigenschaften des Materials, gilt also auch bei aufbereiteten und entsprechend unreaktiven und minder belasteten Abfällen.

Da durch die DVO 2008 der rechtliche Rahmen geschaffen wurde, bei der Abdeckung einer Massenabfalldeponie im Nachsorgezeitraum auf die Dichtung und Entwässerung zu verzichten und stattdessen eine Methanoxidationsschicht anzulegen, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Pflanzenwurzeln mit den vorbehandelten Abfällen in Berührung geraten. Auch ist es möglich, für eine solche alternative Oberflächenabdeckung MBA-Material zu verwenden. Die vorliegende Arbeit ist Teil von Untersuchungen, die solche Fälle zum Inhalt haben. Um daraus resultierende Effekte direkt studieren zu können, wurde im Versuch MBA-Material oberflächlich gelagert und bepflanzt. Tabelle 1.1 zeigt, dass diese Fragestellung auch bei einer mächtigen Abdeckung mit Nicht-MBA-Material des Deponiekörpers Relevanz besitzt. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Veränderung der Materialeigenschaften der abgelagerten vorbehandelten Abfälle.

Die Überlegung den Schüttkörper einer MBA-Deponie nicht abzudichten basiert auf folgenden Erkenntnissen:

- Durch Interzeption und Transpiration der Vegetation wird der Eintritt von Niederschlagswasser in den Deponiekörper begrenzt, der Sickerwasseranfall minimiert. (Gomiscek, 1999)
- Die mikrobiellen Abbauprozesse bleiben erhalten, die Prozesse der Mineralisierung und Humifizierung des Materials werden nicht unterbunden. Dadurch kommt es zu einer Überführung der organischen Substanz in stabile Verbindungen. (Lechner, 2004)
- Die anfallenden Mengen an Deponiegas sind bei MBA-Material gering. Durch Optimierung der mikrobiellen Methanoxidation in der offen ausgeführten Deponieabdeckung erfolgt eine Umwandlung von Methan in Kohlendioxid. Dadurch ist eine Reduktion des Austritts an klimarelevanten Gase aus dem Deponiekörper gegeben. (Huber-Humer, 2004)

Ausserdem könnten durch eventuelle Erträge aus der Bewirtschaftung der Fläche die Nachsorgekosten der Deponie zumindest zu einem Teil gedeckt werden.

Pflanzenart	max. Wurzeltief im Testfeld in cm	Geotextildurch- dringung in 1 m Tiefe ^a	Wurzelnester in min. Abdichtung pro m ²	Deckungsgrad der Deponie in %
Geruchlose Kamille	70	-	0	11
Weiß-Klee	60	-	0	2
Hopfen-Schneckenklee	70	-	0	3
Wiesen-Klee	50	-	0	1
Roter Schwingel	80	-	0	5
Rotes Straußgras	70	-	0	2
Acker-Kratzdistel	150	+++	3 - 4	25
Glatthafer	110	+	1	6
Krauser Ampfer	130	++	2 - 3	7
Mehlige Königskerze	150	++	3 - 4	2

^a (-) keine Durchdringung, (+) seltene Durchdringung, (++) mäßig häufige Durchdringung, (+++) sehr häufige Durchdringung

Tabelle 1.1: Wurzelverhalten dominanter und spezieller Pflanzenarten auf einer Deponie, nach Linert (1997)

Vorgehensweise Um tieferen Einblick in das Verhalten und die Alterung von MBA-Material bei offener Lagerung und unterschiedlicher Bepflanzung zu erhalten, wurden auf zwei Deponien Versuchsflächen mit drei Bepflanzungsvarianten und einer Nullvariante ohne aktive Bepflanzung eingerichtet. Für diese vier Varianten wurden auf beiden Versuchsstandorten je 16 Felder eingerichtet. Das Material auf beiden Standorten wurde zu Versuchsbeginn und nach einem halben Jahr beprobt und im Labor analysiert. Vor der zweiten Probenahme wurde auch das Pflanzenwachstum auf den Versuchsflächen erfasst. Um die Effekte der Auswaschung sowie der Mineralisierung und der Humifizierung zu beobachten, wurden die Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert, Ammonium- und Nitratstickstoff, pflanzenverfügbare Phosphor, Glühverlust, Atmungsaktivität und Huminstoffgehalt ermittelt. Die Werte dieser Parameter wurden für die verschiedenen Varianten statistisch ausgewertet.

2 Material und Methodik

2.1 Material

Der Versuch wurde auf den MBA-Deponien St. Pölten und Allerheiligen parallel durchgeführt. Neben praktischen Faktoren waren vergleichbare klimatische Bedingungen um ähnliche Rahmenbedingungen für das Vegetationswachstum zu gewährleisten das Hauptauswahlkriterium für die beiden Standorte.

Deponie St. Pölten, Niederösterreich Die MBA St. Pölten ist seit 2004 in Betrieb, die zugehörige Deponie existiert bereits länger. In der Anlage werden jährlich 42 000 t häusliche Abfälle behandelt (Stand 2005). Die mechanische Aufbereitung besteht aus einer Zerkleinerung und Absiebung auf < 160 mm. Die Intensivrottephase dauert zweimal 2 Wochen mit zwischenzeitlichem Umsetzen in geschlossenen Rottekammern. Anschließend wird das Material auf < 10 mm gesiebt und 4 Wochen in Boxen und 3 Wochen in offenen Mieten zur Extensivrotte gelagert. (Neubauer und Öhlinger, 2006)

St. Pölten hat im Zeitraum 1971 bis 2000 einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 659,0 mm aufgewiesen. Das Minimum der mittleren Monatssummen liegt mit 29,5 mm im Januar, das Maximum von 88,1 mm im Juli. Das Tagesmittel der Lufttemperatur schwankt im Jahresgang zwischen $-1,0^{\circ}\text{C}$ und $19,1^{\circ}\text{C}$. (ZAMG, 2000)

Deponie Allerheiligen, Steiermark Die Anlage Allerheiligen ist seit dem Jahr 1979 in Betrieb, im Jahre 1996 wurde sie durch Errichtung der Intensivrottetunnel erweitert. Die MBA hat eine Kapazität von 17 100 t/a. Das Input-Material besteht zu knapp 70 % aus Siedlungsabfällen, die restliche Masse ist Klärschlamm mit einem Trockenmasseanteil von 30 %. Die angelieferten Abfälle werden in einer Prallmühle zerkleinert, Eisenanteile werden abgeschieden. Das Material wird auf < 110 mm abgesiebt, in einer Mischtrommel mit Klärschlamm vermischt und gelangt anschließend für zwei Wochen in geschlossene Tunnels zur Intensivrotte. Anschließend wird es für vier bis fünf Wochen in eingehaust auf einer Rottefläche gelagert. Nach dieser Nachrotte wird das Material auf < 24 mm abgesiebt und der Siebdurchgang wird auf der angeschlossenen Deponie abgelagert. Der Überstand wird gemeinsam mit den Nichteisenanteilen, die in der mechanischen Behandlung abgeschieden werden, zur thermischen Verwertung an einen externen Entsorger übergeben. (Neubauer und Öhlinger, 2006)

Allerheiligen befindet sich im Mürztal, etwa 15 km nord-östlich von Bruck an der Mur. Für Bruck a.d.M. gibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2000) einen durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 795,2 mm an. Das Maximum liegt dabei mit 110,5 mm im Juli, das Minimum der durchschnittlichen Monatsmittel der Beobachtungen 1971 bis 2000 mit

32,3 mm im Februar. Die mittlere Temperatur über ein Jahr wird mit 8,1 °C angegeben, wärmster Monat ist der Juli mit 17,8 °C im Tagesmittel, kältester der Januar mit –2,3 °C.

2.2 Methodik

2.2.1 Versuchseinrichtung

Auf den Deponien St. Pölten und Allerheiligen wurden jeweils Versuchsflächen für folgende vier Varianten eingerichtet:

- Spontanvegetation (S) – keine aktive Bepflanzung
- Grasmischung (G) – Saatgutmischung mit großem Anteil von Deutschem und Welschem Weidelgras, Rotschwengel und Knaulgras (*Lolium perenne*, *Lolium multiflorum*, *Festuca rubra* und *Dactylis glomerata*)
- Raps (R) – *Brassica napus ssp. napus*
- Weiden und Pappeln (W) – es wurden ca. 20 cm lange Stechkölzer von je fünf verschiedenen Weidenarten und Pappelsorten verwendet

Jede Variante wurde in 16-facher Wiederholung durchgeführt. Dabei wurden die einzelnen Versuchsflächen für Raps, Gras und Spontanvegetation, die eine Größe von 2 m × 2 m aufweisen, in drei größeren Plots zusammengefasst und so angeordnet, dass niemals zwei Flächen der selben Variante aneinander grenzen. Die Versuchsflächen der Weiden und Pappeln wurden davon getrennt auf einem eigenen Plot angelegt um eine negative Beeinflussung der niederwüchsigeren Pflanzen der anderen Varianten durch Beschattung zu vermeiden. Auf der Deponie St. Pölten weisen diese Versuchsflächen eine Größe von 3 m × 3 m auf, in Allerheiligen wurden sie als 1 m-Streifen mit einer Länge von 9 m ausgeführt. Die Stechkölzer wurden im Abstand von ca. 1 m gesteckt. Das Saatgut der Grasmischung bzw. vom Raps wurde von Hand ausgesät

Die Anordnung der Versuchsflächen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Buchstaben S, G, R und W in den einzelnen Flächen bezeichnen die Varianten, die mit × markierten Felder wurden bei der Einrichtung der Versuchsflächen beprobt.

2.2.2 Probengewinnung

Probenahme Die Probenahme für die Ausgangswerte erfolgte in St. Pölten am 14. April 2008 (Abbildung 2.1). Auf der Deponie Allerheiligen wurde die erste Probenahme auf den Versuchsflächen für Weiden und Pappeln am 30. April, für die restlichen Flächen am 9. Juni 2008 durchgeführt. Dieser zeitliche Abstand war in erster Linie durch ungünstige Witterung bedingt, die das Ausbringen und Befahren des MBA-Materials mit schwerem Gerät unmöglich machte. Bei der ersten Probenahme wurden auf jeder Deponie 24 der 64 Versuchsflächen in einer Tiefe von ca. 5 cm bis 30 cm beprobt. Da davon ausgegangen wurde, das Material sei homogen, beschränkte sich die Ausgangsprobenahme auf diesen einen Horizont. Die beprobten Flächen sind in Abbildung 2.2 mit einem × gekennzeichnet.



Abbildung 2.1: Versuchsfläche St. Pölten, Einrichtung der Versuchsfläche und erste Probenahme, 14. April 2008

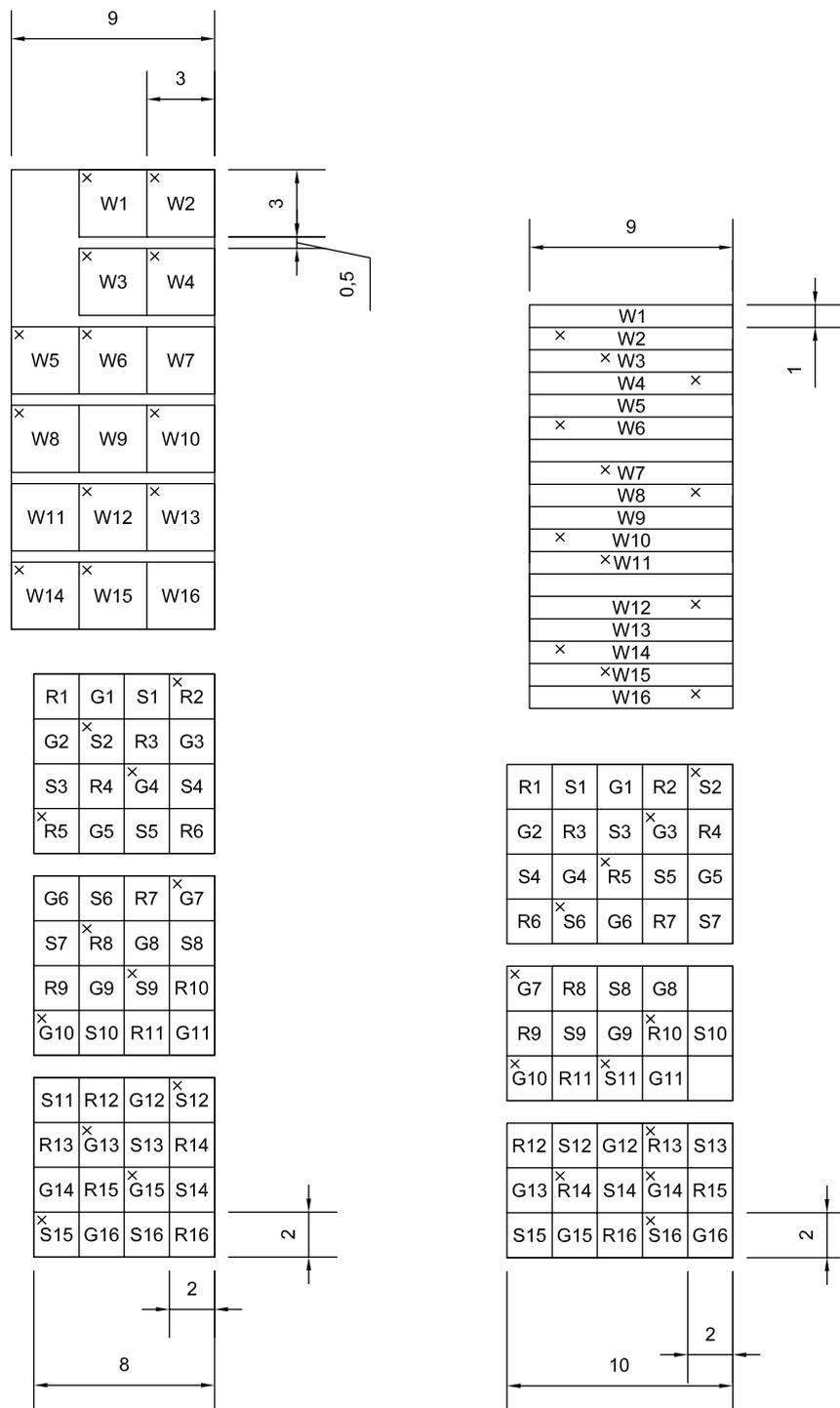


Abbildung 2.2: Anordnung der Versuchflächen auf den Deponien St.Pölten (links) und Allerheiligen (rechts), × markiert Probenahmestellen, Bemaßung in m

Die Endproben auf den Versuchsflächen der Deponie St. Pölten wurden am 9. und 10. (Raps- und Spontanvegetationsfelder), am 21. (Grasfelder) sowie am 23. Oktober 2008 (Weidenfelder) genommen. In Allerheiligen ging die Endprobenahme am 20. (Raps, Spontanvegetation und Gras) und 24. Oktober 2008 (Weiden) von statten. Bei der zweiten Probenahme wurden bei den Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation alle, bei den Weiden je 12 der 16 Felder in zwei Tiefen beprobt. Dazu wurde zuerst die trockene Oberfläche des Bodens mit einem Spaten entfernt. Aus der darunter liegenden aeroben Schicht wurde die erste Probe genommen, welche den Index *a* erhielt. Dann wurde mit einem einfachen Erdbohrer ein möglichst kompaktes Loch gebohrt bis auf anaerobes Material gestoßen wurde, von welchem die zweite Probe, mit Index *b*, genommen wurde. Es wurde jeweils ein 5 l-Kunststoffkübel mit Material gefüllt, beschriftet und verschlossen.

Gasmessung Es wurde zwischen den beiden Probenahmen und bei der Endprobenahme mehrmals Gasmessungen auf den Versuchsflächen durchgeführt. Es wurde ein Gasmessgerät *Gas Data LMSx*© verwendet. Die Messungen wurden in einer Tiefe von etwa 40 cm durchgeführt. Während in St. Pölten die CO₂-Konzentration im Mittel bei etwa 10 % oder darunter lag, schwankte der Mittelwert in Allerheiligen zwischen 20 % und 35 % (Tabelle 2.1). Es wird daher davon ausgegangen, dass im tiefen Probenahmehorizont auf der Versuchsfläche Allerheiligen strikt anaerobe Bedingungen vorherrschten.

	Allerheiligen	St. Pölten
Juni	7,0±1,2	25,1±3,2
August	0,1±0,1	36,9±6,5
September	9,8±7,5	25,2±6,6
Oktober	11,5±18,6	19,7±2,5

Tabelle 2.1: Gasmessungen – CO₂-Konzentration (%_{v/v}), Mittelwerte von jeweils 12 Messungen in ca. 40 cm Tiefe

Probenbezeichnung Die Bezeichnung der Proben beinhaltet die Information auf welcher Deponie zu welchem Zeitpunkt von welcher Fläche welcher Variante aus welcher Tiefe eine bestimmte Probe genommen wurde. So kann beispielsweise die Bezeichnung der Probe *1E/W5a* wie folgt aufgegliedert werden:

1E Deponie und Probenahmezeitpunkt

1 ... St. Pölten

2 ... Allerheiligen

A ... Ausgangsprobenahme

E ... Endprobenahme

W5a Variante, Versuchsfläche, Probenahmetiefe

W ... Weiden und Pappeln

- R ... Raps
- S ... Spontanvegetation
- G ... Grasmischung
- 1 bis 16 ... fortlaufende Nummer der Versuchsflächen
- a ... oberflächennaher Bereich, Tiefe ca. 5 cm bis 15 cm, aerob
- b ... tiefer Bereich, Tiefe ca. 40 cm bis 50 cm, tendenziell anaerob

Wird nicht eine einzelne Versuchsfläche bzw. eine Probe einer solchen betrachtet, sondern eine gesamte Variante wird die Nummer der Versuchsfläche weg gelassen. So bezeichnet z.B. *2EWb* alle in Allerheiligen genommenen Endproben, die von den Weidenflächen aus dem tieferen Bereich stammen. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über alle Testsets, den Stichprobenumfang und die Probenahme.

Die Ausgangswerte von Raps, Spontanvegetation und Gras (RSG) der Deponie St. Pölten wurden bei der statistischen Auswertung als eine Variante betrachtet. Da auf den Versuchsflächen der Deponie Allerheiligen anhand des schwachen Pflanzenwachstum eine Unterteilung der Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation nicht sinnvoll erschien, wurden bei den Endproben diese Varianten zusammengefasst und in Felder mit und ohne nennenswerter Pflanzendeckung unterteilt. Die Bezeichnung dieser Mittelwerte ist *2Eauv* bzw. *2Ebu* für die Flächen mit fehlender oder sehr geringer Vegetation und *2Eav* bzw. *2Ebv* für Versuchsflächen mit Bewuchs.

Probenaufbereitung Nach dem Transport nach Wien wurden die Proben noch am Tag der Probenahme auf < 20 mm geschreddert und wie folgt aufgeteilt:

- Herstellung eines wässrigen Eluats, $L/S = 1 : 10$
- Ermittlung des Wassergehalts bei 105 °C
- Herstellung einer lufttrockenen Probe: Ein Teil der Probe wurde bis zur Gewichtskonstanz bei Raumtemperatur gelagert. Die Probe wurde dann mittels Scheibenschwingmühle gemahlen und auf < 0,63 mm abgeseibt. Der Siebüberstand wurde abermals gemahlen und gesiebt. Der gesamte Siebdurchgang wurde durchmischt, abgewogen und in beschriftete Kunststoffbehälter gefüllt. Der Siebüberstand wurde ebenfalls verwogen und in Kunststoffsäckchen aufbewahrt.
- Tiefkühlung für die spätere Ermittlung der Atmungsaktivität bei ausgewählten Proben

2.2.3 Vegetationsaufnahme

Vor der zweiten Probenahme erfolgte eine Aufnahme der Vegetationsentwicklung. Bei den Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation wurde der Deckungsgrad auf den einzelnen Flächen erfasst. Anschließend wurden von sechs Pflanzen jedes Feldes die Wurzeltiefe und Wuchshöhe aufgenommen. Auf den Spontanvegetationsfeldern wurden weiters alle vertretenen Taxa erfasst. Schließlich wurden die Felder gemäht und die Biomasse gewogen. Von einigen Feldern wurde das Mähgut zur Trockenmassebestimmung ins Labor gebracht, das der übrigen wurde zerkleinert und auf die Versuchsfläche gemulcht.

Bei Weiden und Pappeln wurden die einzelnen Individuen erfasst.

Allerheiligen					St. Pölten				
2A	12	12. Mai 2008,	Tiefe		1ARSG	12	14. April 2008,	Tiefe	
		5 cm bis 30 cm, Raps, Gras, Spontanvegetation					5 cm bis 30 cm, Raps, Gras, Spontanvegetation		
2AW	12	30. April 2008,	Tiefe		1AW	12	14. April 2008,	Tiefe	
		5 cm bis 30 cm, Weiden					5 cm bis 30 cm, Weiden		
2Eauv	8	20. Oktober 2008,	Tiefe		1EGa	16	21. Oktober 2008,	Tiefe	
		5 cm bis 15 cm, unbewachsen					5 cm bis 15 cm, Gras		
2Eav	10	20. Oktober 2008,	Tiefe		1EGb	16	21. Oktober 2008,	Tiefe	
		5 cm bis 15 cm, bewachsen					40 cm bis 50 cm, Gras		
2EbuV	8	20. Oktober 2008,	Tiefe		1ERa	16	9. Oktober 2008,	Tiefe	
		40 cm bis 50 cm, unbewachsen					5 cm bis 15 cm, Raps		
2Ebv	10	20. Oktober 2008,	Tiefe		1ERb	16	9. Oktober 2008,	Tiefe	
		40 cm bis 50 cm, bewachsen					40 cm bis 50 cm, Raps		
2EWa	12	24. Oktober 2008,	Tiefe		1ESa	16	10. Oktober 2008,	Tiefe	
		5 cm bis 15 cm, Weiden					5 cm bis 15 cm, Spontanvegetation		
2EWb	12	24. Oktober 2008,	Tiefe		1ESb	16	10. Oktober 2008,	Tiefe	
		40 cm bis 50 cm, Weiden					40 cm bis 50 cm, Spontanvegetation		
					1EWa	12	23. Oktober 2008,	Tiefe	
							5 cm bis 15 cm, Weiden		
					1EWb	12	23. Oktober 2008,	Tiefe	
							40 cm bis 50 cm, Weiden		

Tabelle 2.2: Übersicht der Varianten mit Stichprobenanzahl, Probenahmedatum und -tiefe sowie den beprobten Feldern

2.3 Analytik

An den Proben wurden im Labor die Parameter Leitfähigkeit, pH-Wert, Ammonium- und Nitrat-Stickstoff, pflanzenverfügbare Phosphor, Glühverlust, Atmungsaktivität sowie Huminstoffe ermittelt. Im Folgenden wird die Vorgangsweise bei den verschiedenen Analysen beschrieben.

Wassergehalt Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte nach Kompostverordnung (KVO). Dazu werden ca. 500 g der frischen Probe, auf 0,1 g genau gewogen, in Alutassen, deren Masse ebenfalls zuvor ermittelt wird, verteilt und im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Tassen werden noch im warmen Zustand neuerlich gewogen und aus der Massendifferenz der feuchten und der trockenen Probe wird der Wassergehalt berechnet und in Prozent angegeben. Die Ermittlung des Wassergehalts erfolgt in zweifacher Wiederholung. (BMfLFUW, 2001)

pH-Wert Der pH-Wert des untersuchten Materials gibt Auskunft über den Fortschritt des Abbaus organischer Substanzen zu organischen Säuren durch Mikroorganismen. (Yu und Huang, 2008)

Die Messung des pH-Wertes erfolgte an einem wässrigen Eluat. Es wurden 100 g der frischen Probe mit 1 l deionisiertem Wasser versetzt und 2 h am Überkopfschüttler durchgemischt. Anschließend erfolgte die Messung des pH-Wertes mit dem Meßgerät *WTW pH 531*.

Leitfähigkeit Die Leitfähigkeit ist ein Maß für den Salzgehalt des untersuchten Substrates. Sie gibt Auskunft über den Fortschritt der Auswaschung des Materials. Ein hoher Salzgehalt kann negative Auswirkungen auf die Vegetation haben. (Krogmann und Woyczehowski, 2000)

Die Messung der Leitfähigkeit erfolgte nach KVO. Ein Eluat 1 : 10 der luftgetrockneten, gemahlten Probe mit deionisiertem Wasser wird 3 h geschüttelt. Anschließend wird mit einer Leitfähigkeitsmesszelle der elektrische Leitfähigkeit bestimmt. (BMfLFUW, 2001) Es wurde das Messgerät *WTW LF 95* verwendet.

Stickstoff Beim Abbau von Organik durch mikrobielle Prozesse wird Zellstickstoff freigesetzt (Schlegel, 1992). Die Form und Konzentration in der sich Stickstoff in dem untersuchten Material vorfindet, lässt Schlüsse auf die Zersetzung und Stabilisierung organischer Verbindungen zu (Mattingly, 1956; Haug, 1993). Stickstoff ist einerseits ein wichtiger Nährstoff für Pflanzen, andererseits führt eine Auswaschung zur Eutrophierung des Grundwassers (Erhart u. a., 2007).

Die Analyse des Gehalts an Ammonium und Nitrat erfolgte photometrisch an einem Eluat der frischen Laborprobe. Dazu werden 100 g der erdfeuchten Probe mit 1 l deionisiertem Wasser vermengt, eine Stunde am Überkopfschüttler geschüttelt und mit Faltenfiltern abfiltriert. Das so gewonnene Eluat kann in der Tiefkühltruhe gelagert werden.

Ammonium Der NH_4 -Gehalt lässt auf den Fortschritt des Abbaus der organischen Substanzen des untersuchten Materials schließen. (Haug, 1993; Schlegel, 1992)

Für die NH_4 -Bestimmung wird das mit deionisiertem Wasser verdünnte Eluat zuerst mit einer Salicylat-Citrat-Lösung gemischt. Anschließend wird eine NaOH-Reagenz zugegeben. Nach 1 bis 3 Stunden wird gegen Deionat als Nullwert im Photometer die optische Dichte bei 655 nm gemessen. Um aus dieser optischen Dichte den tatsächlichen Ammonium-Gehalt zu errechnen muss zuvor eine Kalibration durchgeführt werden.

Nitrat Der Gehalt an Nitrat liefert, insbesondere bei gemeinsamer Betrachtung mit dem Ammonium-Gehalt, Information über den mikrobiellen Abbau der Organik sowie über Auswaschungsvorgänge. (Schlegel, 1992; Erhart u. a., 2007).

Die Bestimmung des NO_3 -Gehalts erfolgt für jede Probe im Doppelansatz. Der eluierten Probe wird eine sehr kleine Menge Amidoschwefelsäure zugegeben, welche das NO_2 zerstört. Sodann wird eine Schwefel- und Phosphorsäuremischung zugegeben. Für den Blindwert wird nun in dem einen Ansatz Deionat, für den Messwert in dem anderen Dimethylphenollösung zugegeben. Nach 10 min werden der Blind- und der Messansatz im Spektralphotometer bei 324 nm in Quarzglasküvetten gemessen. Der Nullwert wird dabei mit der Säuremischung eingestellt.

pflanzenverfügbare Phosphor - P_{cal} Phosphor ist ein essentieller Pflanzennährstoff (Gisi, 1997). Hohe Gehalte in Kompost oder MBA-Material lassen auf eine Klärschlammzugabe schließen. Die Ermittlung des Gehalts an pflanzenverfügbarem Phosphor erfolgt an einem Calcium-Acetat-Lactat-Eluat (CAL), welches die Extraktionsleistung der Wurzeln nachahmen soll. (Gomiscek, 1999) Eine Überversorgung von Böden mit Phosphor führt zu einer Auswaschung desselben und damit zu einer Eutrophierung des Grundwassers. (Celardin, 2003; Delgado und Scalenghe, 2008)

Die Analyse erfolgte nach OENORMS2023 (1993) photometrisch. Zur Herstellung des Eluats wurden 5 g luftgetrocknete Probe mit 100 ml CAL-Lösung (1 : 5 verdünnt) 2 Stunden geschüttelt und anschließend abfiltriert. Dieses Eluat wird mit deionisiertem Wasser verdünnt, mit 1 ml Ascorbinsäurelösung angesäuert und schließlich mit einer Molybdat-Reagenzlösung versetzt. Durch die Reaktion der Molybdat-Lösung mit dem Phosphor wird eine Blaufärbung hervorgerufen. Nach 10 min bis 20 min wird im Spektralphotometer die optische Dichte bei 660 nm gegen Deionat als Nullwert gemessen. Aus einer zuvor durchgeführten Kalibration mit K_2HPO_4 kann aus der Extinktion der Gehalt an PO_4 -P berechnet werden. Dieser wird mittels Gleichung 2.1 in P_2O_5 umgerechnet.

$$P_2O_5(\% \text{ TS}) = \frac{c \cdot V_d \cdot 2,2914}{E_w \cdot (100 - WG)} \quad (2.1)$$

c PO_4 -Konzentration der Probe

V_d Verdünnung

E_w Einwaage Probe in g

WG Wassergehalt

Glühverlust Der Glühverlust gibt den Anteil organischer Substanz der Probe an und gibt somit Auskunft über den Fortschritt der Mineralisierung.

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte nach KVO. Dazu werden ca. 10 g der luftgetrockneten Probe in Porzellanschalen eingewogen, für 3 Stunden im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet, abermals gewogen und anschließend im Muffelofen über Nacht bei 550 °C verglüht. Nach dem Abkühlen im Exsikkator wird die Probe ausgewogen. Dieser Vorgang wird für jede Probe in zweifacher Wiederholung ausgeführt. (BMfLFUW, 2001)

Aus dem Gewichtsverlust bis 105 °C errechnet sich die Restfeuchte der lufttrockenen Probe, die von Relevanz ist, da Parameter, die aus der lufttrockenen Probe ermittelt werden, als Masseanteil an der Trockensubstanz angegeben werden. Die Gewichtsänderung von 105 °C auf 550 °C in Prozent ausgedrückt ist schließlich der Glühverlust.

Atmungsaktivität AT₄ Die Atmungsaktivität ist ein Maß für die Reaktivität von Abfällen. Sie ist ein aussagekräftiger Parameter zur Beurteilung des Zustandes der organischen Substanz in dem untersuchten Substrat. (Binner und Zach, 1999)

Die Atmungsaktivität über 4 Tage (AT₄) wurde nach OENORMS2027-1 (2004) analysiert. Die Bestimmung erfolgte im Sapromat. Dazu wird die tiefgefrorene Probe behutsam aufgetaut und bis zu einem für Mikroorganismen günstigen Wassergehalt befeuchtet. Von diesem Material werden im Doppelansatz 30 g bis 45 g in die Reaktionsgefäße des Sapromat eingebaut. Durch mikrobielle Stoffwechselfvorgänge wird die Probe abgebaut. Das dabei entstehende CO₂ wird mit NaOH-Plättchen gebunden und der dadurch entstehende Unterdruck durch eine gesteuerte O₂-Zugabe in das System ausgeglichen. (Binner und Zach, 1999)

Die Atmungsaktivität wird als Summe des zugeführten Sauerstoffs pro Zeiteinheit angegeben. Je niedriger die AT₄ ist, desto besser ausgereift ist ein Kompost bzw. der Output aus der MBA. Sie wird üblicherweise in mg O₂/g Trockensubstanz (TS) angegeben. In dieser Arbeit erfolgt zusätzlich eine Auswertung in welcher der Sauerstoffverbrauch auf die organische Trockensubstanz (oTS) bezogen wird. Dies hat den Vorteil, dass die Reaktivität von Materialien mit unterschiedlichem Gehalt an Organik besser miteinander verglichen werden können.

Huminstoffanalyse: modifizierte Methode nach Danneberg Der Huminstoffgehalt gibt Auskunft über den Umbau organischer Substanzen. Die Bezeichnung "Huminstoffe" beschreibt die stabile Fraktion der organischen Substanzen im Boden, es ist nicht möglich für sie eine exakte Strukturformel anzugeben. Huminstoffe sind ein wichtiger Faktor für die Fruchtbarkeit von Böden, sie stellen einen wichtigen Wasserspeicher und Ionentauscher dar und haben großen Einfluss auf den Nährstoffhaushalt. (Gisi, 1997; Ayuso u. a., 1996)

Die Analyse des Huminstoffgehaltes der Proben erfolgte nach Gerzabek u. a. (1993) durch Extraktion und Fraktionierung der Humin- und Fulvosäuren. Huminsäuren sind Huminstoffe, die im basischen Milieu löslich sind, Fulvosäuren sind auch im sauren Milieu gut löslich. Diese Methode ist eine abgekürzten und modifizierten Form der Methode nach Danneberg und Schaffer (1974).

Dabei werden 10 g der luftgetrockneten und gemahlten Probe in Kunststoffbehältern im Überschuss (ca. 50 ml) mit 0,1 mol Natriumpyrophosphat (NaPP, Na₄P₂O₇) aufgegossen und über Nacht geschüttelt. Anschließend wird die Probe 15 min bei 5000 U · min⁻¹ zentrifugiert,

dekantiert und nochmals für 15 min bei $13\,500\text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ zentrifugiert. Dieser unfraktionierte Extrakt wird nun in einem Messkolben mit deionisiertem Wasser auf 100 ml aufgefüllt. Man erhält so das Ausgangsextrakt. Der Satz in den Zentrifugenbechern wird mit 50 ml NaPP aufgerührt und wieder über Nacht auf den Überkopfschüttler gehängt.

Von dem unfraktionierten Extrakt werden nun die Fulvosäuren getrennt. Dazu werden 25 ml Probe entnommen und mit 500 μl HCl 37 % abgesäuert und nach 15 min Wirkzeit werden bei $7500\text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$ für 5 min die ausgefallten Anteile abzentrifugiert. Die Lösung wird mit 600 μl 40 %iger NaOH neutralisiert und mit einem Glycin-NaOH-Puffer wird der pH-Wert auf 10 eingestellt. Die optische Dichten der Fulvosäuren-Messlösung und der Lösung mit den unfraktionierten Extrakten werden nun in entsprechender Verdünnung bei 400 nm im Spektralphotometer gemessen. Als Nullwert dient dabei deionisiertes Wasser.

Der hier beschriebene Vorgang wird mit der jeweils wieder aufgefüllten Probe an vier aufeinander folgenden Tagen wiederholt. Der Anteil der Huminsäuren der Probe wird aus der Summe der Differenz der beiden optischen Dichten errechnet. Das Ergebnis wird schließlich in Prozent der organischen Trockenmasse angegeben.

Die Dannebergsche Methode unterscheidet sich in zwei Punkten wesentlich von dem hier beschriebene Verfahren. Zum einen wird die optische Dichte bei 400 nm und 600 nm gemessen. Ausserdem erfolgt bei der Dannebergschen Methode neben der Trennung in Huminsäuren und Fulvosäuren auch noch eine Fraktionierung der Braun- und Grauhuminsäuren (Danneberg und Schaffer, 1974). Die Vereinfachung der Methode wird deshalb angewendet, da sich die Auftrennung in die unterschiedlichen Huminsäuren als irrelevant für die gegebene Fragestellung erwiesen hat. (Tan, 2003)

Da es bei den Proben aus Allerheiligen zu einer Trübung des Extraktes kam, wurde hier schließlich auf die Messung verzichtet, da die Trübung die photometrische Messung beeinflusst. Dieser Effekt trat fallweise auch bei den Proben aus tiefer Schicht aus St. Pölten auf. Hier wurden die betroffenen Extrakte gefiltert. Durch die Filtration werden allerdings auch braune Farbstoffe zurückgehalten. Es ist daher davon auszugehen, dass auch durch die Filtration das Messergebnis verfälscht wird. Die Größe dieser Beeinflussung ist bislang nicht näher untersucht worden. Die Differenz der optischen Dichte vor und nach der Filtration belief sich bei den durchgeführten Messungen auf etwa 5 %.

2.4 Versuchsplanung und statistische Auswertung

Die Planung des Stichprobenumfangs wurde mit dem Softwareprogramm CADEMO© (Rasch u. a., 2007) durchgeführt. Die Tests wurden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ durchgeführt, die Güte wurde mit $1 - \beta = 0,80$ festgelegt. Um bei diesen Werten die in Tabelle 2.3 angegebenen Mindestgenauigkeitsschranke d einzuhalten, wurden für die Ausgangsprobenahme 12 und für die Endprobenahme 16 Stichproben je Variante genommen. Bei den betrachteten Parametern handelt es sich um Glühverlust, pH-Wert, Leitfähigkeit, Ammonium, Nitrat, pflanzenverfügbaren Phosphor, Huminsäuren sowie Atmungaktivität.

Parameter	Mindestgenauigkeitsschranke d
Leitfähigkeit (Lf)	0,5 mS/cm
pH	0,3
Ammonium (NH ₄ -N)	50 mg/kg TS
Nitrat (NO ₃ -N)	150 mg/kg TS
pflanzenverfügbare Phosphor (P _{cal})	200 mg/kg TS
Glühverlust (GV)	2,5 % TS
Atmungsaktivität (AT ₄ bezogen auf TS)	0,5 mg O ₂ /g TS
Atmungsaktivität (AT ₄ bezogen auf oTS)	3 mg O ₂ /g oTS
Huminsäuren (HS)	0,6 % oTS

Tabelle 2.3: Mindestgenauigkeitsschranke d der untersuchten Parameter

Zuerst wurde mittels einer Varianzanalyse getestet, ob zwischen den Ausgangswerten für diese Parameter der beiden Deponien signifikante Unterschiede bestehen. Das Ergebnis dieses Tests hat keinen Einfluss auf die weiteren Schritte der Auswertung.

Um zu testen ob es signifikante Unterschiede der Mittelwerte zwischen Ausgangs- und Endwerten bzw. zwischen den verschiedenen Varianten in St. Pölten bzw. Allerheiligen gibt, wurden die Werte ebenfalls mittels einer Varianzanalyse als Omnibus-Test auf gleiche Mittelwerte getestet (Faraway, 2002). Bei diesem Test wurde parameterweise alle Varianten der beiden Deponien jeweils gemeinsam getestet. Das Ergebnis gibt lediglich an, ob zwischen den Varianten signifikante Unterschiede bestehen. Welche Varianten sich jedoch voneinander unterscheiden lassen und bei welchen Paarungen die Mittelwerte als gleich angesehen werden können, kann mit der Varianzanalyse nicht ermittelt werden. Weiters wird für diese Tests das tatsächliche β berechnet und als Güte angegeben. Das β gibt die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 2. Art an, d.h. die fälschliche Beibehaltung der Nullhypothese H_0 . (Sachs und Hedderich, 2009)

Im nächsten Schritt wird mittels t-Tests ermittelt, zwischen welchen Variantenpaarung signifikante Unterschiede bestehen. Die Stichprobenpaarungen werden nicht auf Varianzhomogenität vorgetestet, es wird die nach Welch modifizierte Variante des t-Tests verwendet. (Rasch u. a., 2009; R Development Core Team, 2009) Um das globale Signifikanzniveau einzuhalten wird eine Korrektur der p-Werte nach der Methode von Bonferroni-Holm durchgeführt (Rice, 1989).

Die Bonferroni-Holm-Methode ist ein sogenanntes *step up*-Verfahren, bei welchem die p-Werte der Tests die gemeinsam betrachtet werden sollen nach aufsteigender Größe geordnet werden. Solange gilt $\alpha > p(i) \cdot (n + 1 - i)$ wird der Test abgelehnt und die Alternativhypothese gilt. Wird das α -Niveau einmal von einem transformierten p-Wert überschritten, wird auch für alle weiteren Tests die Nullhypothese angenommen. Diese Methode gibt große Sicherheit bei der Vermeidung Fehler erster Art. (Holm, 1979)

Wird die Nullhypothese angenommen, gilt bei jenen Tests, bei denen der Stichprobenumfang aus der Versuchsplanung zur Verfügung steht, die festgelegte Güte von $1 - \beta = 0,8$.

Da bei der Endprobenahme in Allerheiligen die Versuchsanordnung geändert wurde und sich dadurch der Stichprobenumfang auf acht bzw. zehn Proben für die neuen Varianten reduzierte, wurde die Güte nachträglich neu berechnet. Nur bei den Parametern pH-Wert und Leitfähigkeit

konnte durch die geringe Streuung der Werte die Güte von $1 - \beta = 0,80$ eingehalten werden. Daher kann für die anderen Parameter der Proben aus Allerheiligen nur eine Ablehnung der Nullhypothese als gesichert angenommen werden, bei einer Annahme von H_0 wird die eingangs festgelegte akzeptierte Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 2. Art überschritten und darf nicht interpretiert werden.

Als Ergebnis der Varianzanalyse werden der p-Wert und die Güte angegeben. Wird die Nullhypothese angenommen, wird der p-Wert mit einem \checkmark gekennzeichnet, gilt die Alternativhypothese mit einem \times . Für die t-Tests werden die nach Bonferroni-Holm transformierten p-Werte angegeben und gleichermaßen wie die der Varianzanalyse markiert. Zusätzlich wird die Differenz der Mittelwerte für alle Variantenpaarungen ausgegeben. Unterschreitet diese die Mindestgenauigkeitsschranke d für den jeweiligen Parameter (siehe Tabelle 2.3), wird sie kursiv gesetzt. In diesen Fällen gelten die Werte der getesteten Varianten als gleich, auch wenn der p-Wert geringer als das Signifikanzniveau α ist.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket R, Version 2.9. (R Development Core Team, 2009) Im Anhang B findet sich neben dem Code des R-Scripts (Listing B.1), mit welchem die Varianzanalyse durchgeführt wurden auch die R-Funktion, mit welcher die Power für die gewichtete Varianzanalyse durchgeführt wurde (Listing B.2). Die Bonferroni-Holm-Sequenz wurde eigens implementiert, da die in R enthaltene Funktion `pairwise.t.test()` keine Selektion zulässt, welche Paarungen aus einer Gruppe von Varianten getestet werden soll. Da bei der gegebenen Versuchsanordnung hierdurch viele irrelevante Paarungen getestet würden, wären die Tests durch ein erhöhtes n und daraus folgend einem stärker gemindertem p-Wert zunehmend konservativer. Daraus ergibt sich jedoch, dass die Ergebnisse von Varianzanalyse und t-Test nicht in allen Fällen, zu dem gleichen Ergebnis kommen. Daher wurden die t-Tests auch in jenen Fällen gerechnet, in denen die Varianzanalyse auf keine Unterschiede zwischen den Varianten schließen lässt. Die gewählte Implementierung findet sich in Listing B.3. R rechnet den t-Test in der nach Welch modifizierten Variante, sofern nicht explizit angegeben wird, dass Varianzhomogenität vorliegt.

Eine graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgt mittels Box-and-Whiskers-Plots. Die Diagramme wurden mit dem R-Paket `ggplot2` erstellt. (Wickham, 2009)

3 Ergebnisse

3.1 Vegetation

Auf den Versuchsflächen der Deponie Allerheiligen, wo zu Versuchsende im Substrat noch klar anaerobe Bedingungen gegeben waren, war das Pflanzenwachstum in der beobachteten ersten Vegetationsperiode schwach. Nur 8 der 16 Versuchsflächen auf welchen Gras ausgesät wurde, zeigten im Herbst eine gute Pflanzendecke. Bloß zwei der Flächen mit Raps wiesen eine nennenswerte Vegetationsdecke auf. Spontanvegetation war mit wenigen Ausnahmen zu Ende des Versuchs nicht aufgekommen. Von den Weiden und Pappeln konnte sich kein einziges Individuum etablieren. Abbildung 3.1 zeigt den stark schwankenden Deckungsgrad der Pflanzendecke



Abbildung 3.1: Versuchsfläche Allerheiligen, vor der zweiten Probenahme, 20. Oktober 2008. Auf den Flächen mit Gras ist eine gute Pflanzendecke gegeben, die anderen Flächen sind größtenteils kahl.



Abbildung 3.2: Versuchsfläche St. Pölten, vor der zweiten Probenahme, 26. Oktober 2008. Gute Pflanzendecke auf den Grasflächen, einige imposante Stauden der Spontanvegetation.

nach einer Vegetationsperiode auf den verschiedenen Feldern. Aufgrund dieser geringen Wuchsleistung wurde bei der statistischen Auswertung auf eine Unterteilung der einzelnen Varianten verzichtet und es folgte eine Neueinteilung in Flächen mit und ohne Bewuchs. Da die Fläche auf welcher die Weiden und Pappeln gepflanzt früher als die restliche Fläche geschüttet wurde und das Material vermutlich aus einer anderen Charge stammt, wurden die Endproben von den Weidenflächen trotz des fehlenden Aufwuchses als eigene Variante belassen.

In St. Pölten zeigten die Grasflächen ein sehr starkes Wachstum, die Deckung betrug bei fast allen Feldern 100 %, die Wurzeltiefe erreichte bis zu 30 cm. Die Wuchsleistung auf den Versuchsflächen mit Raps war weniger zufriedenstellend, nicht alle Flächen wiesen eine deckende Vegetationsschicht auf. Die maximale Wurzeltiefe betrug hier 8 cm bis 10 cm. Auch in St. Pölten kam in der ersten Vegetationsperiode kaum Spontanvegetation auf. Die beobachteten Arten waren *Atriplex prostrata*, *Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium strictum*, *Amaranthus retroflexus*, *Sonchus asper*, *Festuca rubra*, *Lolium sp.*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium repens*, *Dactylis glomerata*, *Zea mays*, *Brassica napus* und *Sonchus oleraceus*. Von den Weiden und Pappeln konnten sich nur einige wenige Individuen etablieren.

Die Anaerobie im tiefen Probenahmehorizont war deutlich weniger ausgeprägt als auf der Versuchsfläche Allerheiligen (Tabelle 2.1). Abbildung 3.2 zeigt die Versuchsfläche vor der Probenahme.

3.2 Auswertung Analytik

Die Ergebnisse aller Analysen finden sich im Anhang in der Tabelle A.1. Eine Zusammenstellung der Mittelwerte der einzelnen Varianten für alle Parameter findet sich in Tabelle 3.1. Im Folgenden werden die Ergebnisse nach Parameter gegliedert dargestellt.

3.2.1 Leitfähigkeit

Für die Leitfähigkeit liegt der komplette Datensatz vor. Mittelwerte und Standardabweichung der Varianten werden in Tabelle 3.2 aufgelistet, in Abbildung 3.3 wird die Verteilung der Werte mittels Boxplots dargestellt.

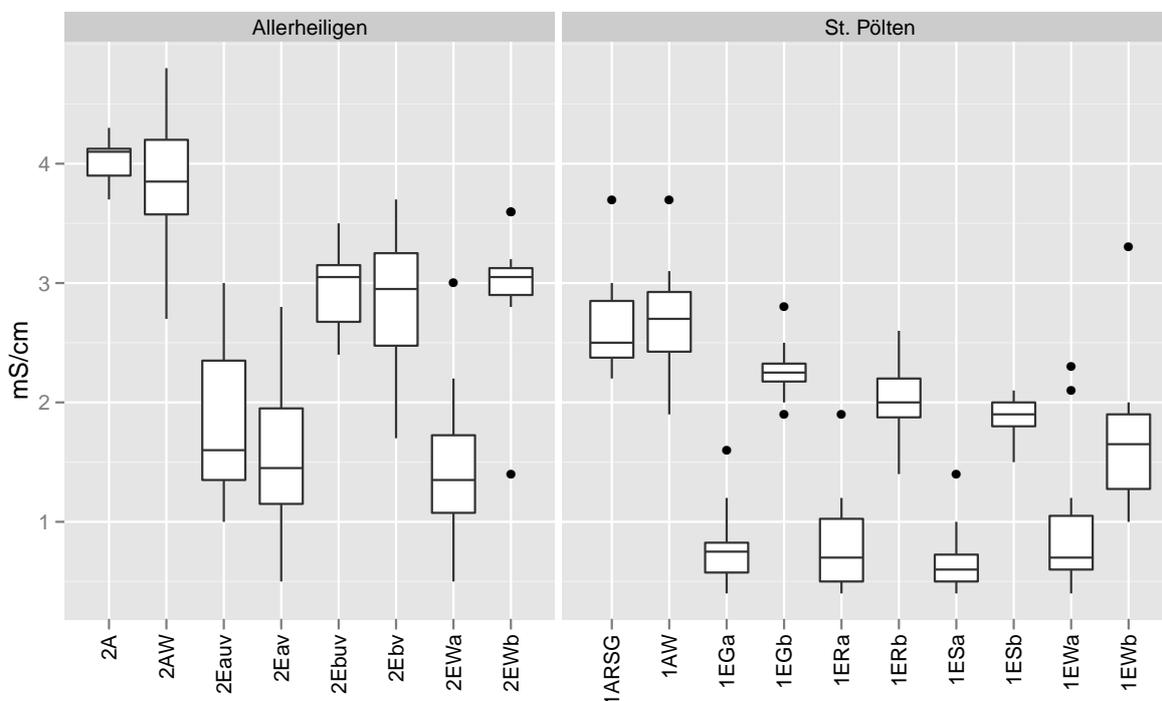


Abbildung 3.3: Boxplots Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der Ausgangsproben der beiden Deponie sind voneinander signifikant unterschiedlich (Tabelle 3.3). Jedoch zeigt sich im t-Test (Tabelle 3.4), dass sowohl in St. Pölten als auch in Allerheiligen die Anfangswerte der Weiden- und der durchmischten Versuchsflächen im Mittel gleich sind ($4,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ und $3,8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bzw. $2,6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ und $2,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Variante	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	GV % TS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$	HS % oTS
2A	4,0±0,2	8,1±0,2	1921±477	16±13	1458±185	35,9±2,4	16,7±6,9	47,1±22,2	8,3±0,9
2AW	3,8±0,6	8,2±0,1	3404±370	3±9	2566±226	37,5±1,6	15,6±2,9	38,9±7,3	8,7±1,4
2Eauv	1,9±0,7	7,5±0,3	67±73	250±212	1851±241	32,1±2,3	2,1±0,8	6,6±2,4	
2Eav	1,5±0,7	7,6±0,5	112±228	190±166	1804±290	29,8±1,9	1,5±0,8	4,9±2,2	
2EbuV	3,0±0,4	8,2±0,4	1421±280	33±27	1915±185	31,0±1,9	4,7±2,2	15,0±7,3	
2Ebv	2,8±0,6	8,0±0,4	824±525	171±225	1968±182	29,5±3,4	3,9±2,6	12,8±7,6	
2EWa	1,5±0,7	7,7±0,3	19±4	86±98	1949±210	29,6±1,6			
2EWb	3,0±0,6	8,8±0,1	2096±490	5±13	2449±312	32,2±2,6			
1ARSG	2,6±0,4	8,3±0,3	1002±298	37±54	832±254	26,1±3,2	3,2±1,3	11,4±4,6	6,1±0,5
1AW	2,7±0,5	8,2±0,3	815±266	40±43	1034±202	24,3±2,3	3,2±0,9	11,8±3,2	7,7±0,9
1EGa	0,8±0,3	7,6±0,2	7±5	16±19	678±87	18,4±2,1	1,7±0,3	9,1±1,6	7,8±0,9
1EGb	2,3±0,2	8,7±0,2	331±95	21±23	571±77	22,3±1,2	3,2±0,4	14,4±1,9	6,5±0,6
1ERa	0,8±0,4	7,7±0,2	13±4	38±58	711±94	20,0±2,1	1,8±0,4	9,0±1,8	6,8±0,7
1ERb	2,0±0,3	8,7±0,2	326±114	41±71	631±149	20,2±1,5			6,5±0,4
1ESa	0,7±0,3	7,7±0,2	11±2	11±12	668±132	19,6±1,3	1,5±0,2	7,6±1,2	6,6±0,5
1ESb	1,9±0,2	8,7±0,2	422±138	10±12	650±76	21,8±1,5	3,0±0,4	13,8±1,5	7,4±0,5
1EWa	1,0±0,6	7,2±0,4	5±5	21±21	713±140	18,8±1,7	1,3±0,2	7,2±1,3	8,5±0,6
1EWb	1,7±0,6	8,3±0,4	143±83	76±127	841±199	19,3±2,8			

Tabelle 3.1: Zusammenstellung Mittelwerte und Standardabweichung

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	$4,0 \pm 0,2$	1ARSG	12	$2,6 \pm 0,4$
2AW	12	$3,8 \pm 0,6$	1AW	12	$2,7 \pm 0,5$
2Eauv	7	$1,9 \pm 0,7$	1EGa	16	$0,8 \pm 0,3$
2Eav	10	$1,5 \pm 0,7$	1EGb	16	$2,3 \pm 0,2$
2EbuV	8	$3,0 \pm 0,4$	1ERa	16	$0,8 \pm 0,4$
2Ebv	10	$2,8 \pm 0,6$	1ERb	16	$2,0 \pm 0,3$
2EWa	12	$1,5 \pm 0,7$	1ESa	16	$0,7 \pm 0,3$
2EWb	12	$3,0 \pm 0,6$	1ESb	16	$1,9 \pm 0,2$
			1EWa	12	$1,0 \pm 0,6$
			1EWb	12	$1,7 \pm 0,6$

Tabelle 3.2: Leitfähigkeit – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2EbuV	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.3: Leitfähigkeit – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Die Endwerte der Proben von der Deponie Allerheiligen sind durchwegs signifikant niedriger als die der Ausgangswerte. Die Abnahme war im oberflächennahen Bereich ($1,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $1,9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) signifikant größer als in der tiefen Schicht ($2,8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $3,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$). Die Unterschiede zwischen den Flächen mit nennenswerter Pflanzendecke und den Flächen ohne sind jedoch in beiden Tiefen nicht statistisch signifikant.

In St. Pölten zeigt sich ein ähnliches Bild: Die Endwerte sind signifikant niedriger als die Ausgangswerte, die Abnahme war im tiefen Bereich ($1,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $2,3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) signifikant geringer als im oberflächennahen Horizont ($0,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $1,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$). Eine Ausnahme stellt dabei der Wert der Grasflächen aus dem anaeroben Bereich da ($2,3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), dessen Abnahme gegenüber dem Ausgangswert von $2,6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ nicht signifikant ist und der noch signifikant aber nicht relevant höher ist, als die der vergleichbaren Proben aus den Varianten Raps und Spontanvegetation. Der Unterschied zwischen den beiden Probenahmetiefen ist bei den Weidenflächen nicht signifikant ($1,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ und $1,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,758 ✓	0,2	1AW	1ARSG	0,862 ✓	0,0
2A	2Eav	0,000 ×	2,5	1ARSG	1ERa	0,000 ×	1,8
2A	2Ebv	0,001 ×	1,2	1ARSG	1ERb	0,002 ×	0,7
2A	2Eauv	0,001 ×	2,2	1ARSG	1ESa	0,000 ×	2,0
2A	2Ebu v	0,000 ×	1,1	1ARSG	1ESb	0,001 ×	0,8
2Eav	2Ebv	0,002 ×	1,3	1ARSG	1EGa	0,000 ×	1,9
2Eauv	2Ebu v	0,027 ×	1,1	1ARSG	1EGb	0,081 ✓	0,4
2Eav	2Eauv	0,781 ✓	0,3	1ERa	1ERb	0,000 ×	1,1
2Ebv	2Ebu v	0,573 ✓	0,1	1ESa	1ESb	0,000 ×	1,2
2AW	2EWb	0,005 ×	0,9	1EGa	1EGb	0,000 ×	1,5
2AW	2EWa	0,000 ×	2,4	1EGa	1ESa	1,000 ✓	0,1
2EWa	2EWb	0,000 ×	1,5	1EGa	1ERa	1,000 ✓	0,1
				1ESa	1ERa	1,000 ✓	0,1
				1EGb	1ESb	0,000 ×	0,4
				1EGb	1ERb	0,042 ×	0,3
				1ESb	1ERb	1,000 ✓	0,1
				1AW	1EWb	0,002 ×	1,0
				1AW	1EWa	0,000 ×	1,7
				1EWa	1EWb	0,056 ✓	0,7

Tabelle 3.4: Leitfähigkeit – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$

3.2.2 pH-Wert

Mittelwerte und Standardabweichung des pH-Werts der Proben werden in Tabelle 3.5 aufgelistet, in Abbildung 3.4 wird die Verteilung der Stichproben mittels Boxplots dargestellt.

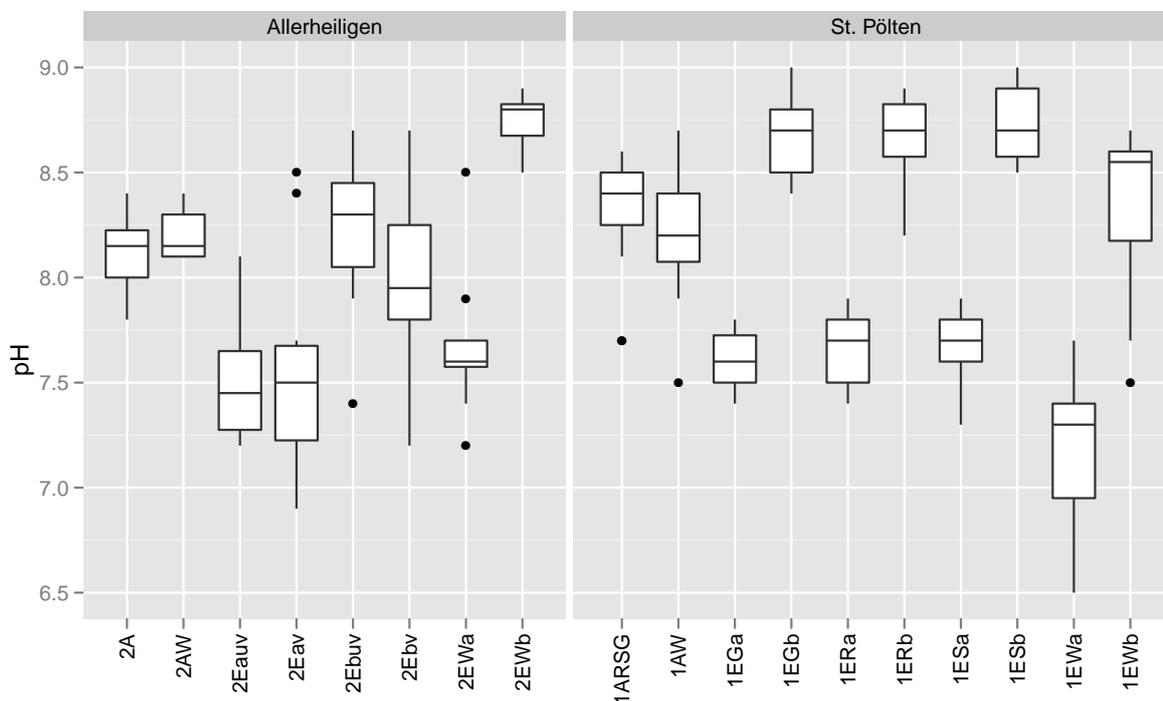


Abbildung 3.4: Boxplots pH-Wert

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	$8,1 \pm 0,2$	1ARSG	12	$8,3 \pm 0,3$
2AW	12	$8,2 \pm 0,1$	1AW	12	$8,2 \pm 0,3$
2Eauv	8	$7,5 \pm 0,3$	1EGa	16	$7,6 \pm 0,2$
2Eav	10	$7,6 \pm 0,5$	1EGb	16	$8,7 \pm 0,2$
2EbuV	8	$8,2 \pm 0,4$	1ERa	16	$7,7 \pm 0,2$
2Ebv	10	$8,0 \pm 0,4$	1ERb	16	$8,7 \pm 0,2$
2EWa	12	$7,7 \pm 0,3$	1ESa	16	$7,7 \pm 0,2$
2EWb	12	$8,8 \pm 0,1$	1ESb	16	$8,7 \pm 0,2$
			1EWa	12	$7,2 \pm 0,4$
			1EWb	12	$8,3 \pm 0,4$

Tabelle 3.5: pH-Wert – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ)

Die pH-Werte der Ausgangsproben von beiden Deponien werden in der Varianzanalyse als gleich angenommen (pH 8,1 bis 8,3). Im Vergleich aller Varianten im Ausgangs- und Endwert zeigen sich auf beiden Deponien signifikante Unterschiede (siehe Tabelle 3.6).

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,495 ✓	0,21
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2Ebu	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.6: pH-Wert – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Bei der Auswertung der Daten aus Allerheiligen zeigt sich, dass es in der oberflächennahen Schicht bei allen Varianten zu einer Abnahme des pH-Werts auf 7,5 bis 7,7 kam, der allerdings nur bei den Flächen ohne Pflanzendecke und bei den Weiden signifikant ist. Bei den Proben aus den tiefen Schichten ist keine Abnahme gegenüber der Ausgangsprobenahme zu beobachten, bei den Weiden kommt es hier sogar zu einem signifikanten Anstieg des pH-Werts auf 8,8. Die Werte der Flächen mit und ohne Bewuchs unterscheiden sich im direkten Vergleich zueinander nicht wesentlich. Die Werte der Flächen ohne Bewuchs (pH 7,5 und 8,2) und die der Weiden (pH 7,7 und 8,8) sind anhand der Probenahmetiefe signifikant zu unterscheiden.

In St. Pölten zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei den Endwerten kommt es bei den Proben aus oberflächennaher Schicht zu einer signifikanten Abnahme des pH-Wertes (pH 7,2 bis 7,7), bei den Proben aus tiefer Schicht (bei R, S und G pH 8,7), mit Ausnahme der Weiden (pH 8,3), zu einem ebensolchen Anstieg. Die Unterschiede zwischen oben und unten sind demzufolge ebenfalls signifikant. Die Werte der Proben der unterschiedlichen Varianten aus gleicher Probenahmetiefe können hingegen als gleich angesehen werden. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tabelle 3.7 dargestellt.

3.2.3 Ammonium

Auch für den Parameter Ammonium liegen komplette Datensätze für alle Varianten vor (Tabelle 3.8). Der Wert von $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ der Probe 2E/S16b, welche der Gruppe 2Ebu an gehört, wurde vor der statistischen Auswertung entfernt, da ein solcher Ausreißer - das Mittel dieser Gruppe liegt ohne jener Probe bei 1421 ± 280 - das Ergebnis der Tests verzerren würde.

Die Ausgangswerte ($1921 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $3404 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bzw. $1002 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $815 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) der beiden Deponien unterscheiden sich voneinander signifikant. Ebenso verhalten sich die Varianten auf den beiden Versuchsstandorten untereinander, wie aus Tabelle 3.9 zu entnehmen ist.

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	1,000 ✓	0,1	1AW	1ARSG	1,000 ✓	0,1
2A	2Eav	0,056 ✓	0,6	1ARSG	1ERa	0,000 ×	0,6
2A	2Ebv	1,000 ✓	0,2	1ARSG	1ERb	0,009 ×	0,4
2A	2Eauv	0,004 ×	0,6	1ARSG	1ESa	0,000 ×	0,6
2A	2Ebu	1,000 ✓	0,1	1ARSG	1ESb	0,004 ×	0,4
2Eav	2Ebv	0,463 ✓	0,4	1ARSG	1EGa	0,000 ×	0,7
2Eauv	2Ebu	0,018 ×	0,7	1ARSG	1EGb	0,010 ×	0,4
2Eav	2Eauv	0,817 ✓	0,0	1ERa	1ERb	0,000 ×	1,0
2Ebv	2Ebu	1,000 ✓	0,2	1ESa	1ESb	0,000 ×	1,0
2AW	2EWb	0,000 ×	0,6	1EGa	1EGb	0,000 ×	1,1
2AW	2EWa	0,001 ×	0,5	1EGa	1ESa	1,000 ✓	0,1
2EWa	2EWb	0,000 ×	1,1	1EGa	1ERa	1,000 ✓	0,1
				1ESa	1ERa	1,000 ✓	0,0
				1EGb	1ESb	1,000 ✓	0,1
				1EGb	1ERb	0,857 ✓	0,0
				1ESb	1ERb	1,000 ✓	0,0
				1AW	1EWb	1,000 ✓	0,2
				1AW	1EWa	0,000 ×	1,0
				1EWa	1EWb	0,000 ×	1,2

Tabelle 3.7: pH-Wert – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,3$

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	1921±477	1ARSG	12	1002±298
2AW	12	3404±370	1AW	12	815±266
2Eauv	8	67±73	1EGa	16	7±5
2Eav	10	112±228	1EGb	16	331±95
2Ebu	7	1421±280	1ERa	16	13±4
2Ebv	10	824±525	1ERb	16	326±114
2EWa	12	19±4	1ESa	16	11±2
2EWb	12	2096±490	1ESb	16	422±138
			1EWa	12	5±5
			1EWb	11	143±83

Tabelle 3.8: Ammonium $\text{NH}_4\text{-N}$ – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS

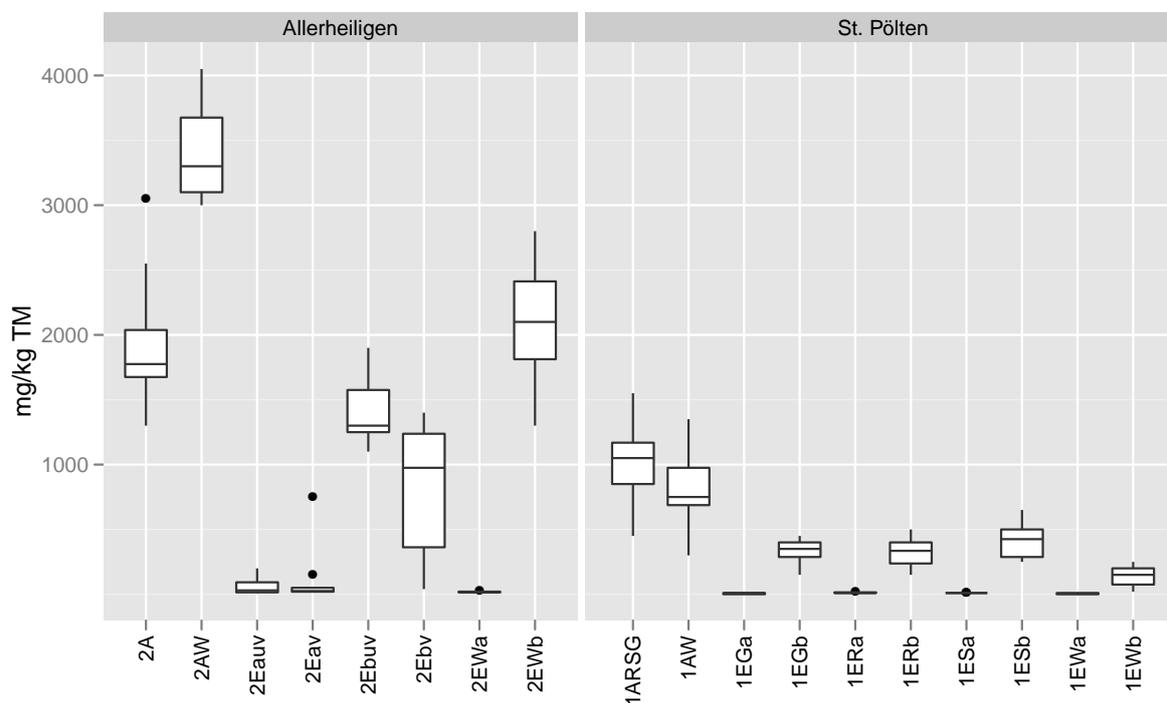


Abbildung 3.5: Boxplots Ammonium

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2EbuV	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.9: Ammonium – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Beim t-Test der Werte des Ammonium-Stickstoffs der Proben aus Allerheiligen wird in allen Fällen eine signifikante Abnahme, bzw. ein signifikanter Unterschied zwischen oberflächennaher ($19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $112 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) und der tieferen Schicht ($824 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $2096 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) bestätigt. Eine Unterscheidung der Varianten mit bzw. ohne Bewuchs anhand des Ammoniumgehalts ist nur bei den Proben aus der tieferen Schicht zulässig ($824 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $1421 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Bei den Proben aus St. Pölten ergibt sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen Anfangs- und Endproben. Der Ammoniumgehalt ist bei den Proben mit geringer Probenahmetiefe ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) signifikant niedriger als bei jenen, aus tiefer Schicht ($143 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $422 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Beim Vergleich der Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation sind die Werte innerhalb der Probenahmetiefen gleich. Bei den Proben aus dem oberflächennahen Bereich liegen alle Werte, und damit auch deren Differenzen, unter der Mindestgenauigkeitsschranke von $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Die Ergebnisse der t-Tests sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,000 ×	1483	1AW	1ARSG	0,238 ✓	187
2A	2Eav	0,000 ×	1808	1ARSG	1ERa	0,000 ×	989
2A	2Ebv	0,000 ×	1097	1ARSG	1ERb	0,000 ×	676
2A	2Eauv	0,000 ×	1854	1ARSG	1ESa	0,000 ×	991
2A	2EbuV	0,021 ×	499	1ARSG	1ESb	0,000 ×	580
2Eav	2Ebv	0,008 ×	712	1ARSG	1EGa	0,000 ×	995
2Eauv	2EbuV	0,000 ×	1355	1ARSG	1EGb	0,000 ×	671
2Eav	2Eauv	0,562 ✓	46	1ERa	1ERb	0,000 ×	313
2Ebv	2EbuV	0,026 ×	597	1ESa	1ESb	0,000 ×	411
2AW	2EWb	0,000 ×	1308	1EGa	1EGb	0,000 ×	325
2AW	2EWa	0,000 ×	3385	1EGa	1ESa	0,062 ✓	4
2EWa	2EWb	0,000 ×	2077	1EGa	1ERa	0,009 ×	6
				1ESa	1ERa	0,247 ✓	2
				1EGb	1ESb	0,196 ✓	91
				1EGb	1ERb	0,893 ✓	5
				1ESb	1ERb	0,164 ✓	96
				1AW	1EWb	0,000 ×	672
				1AW	1EWa	0,000 ×	810
				1EWa	1EWb	0,002 ×	137

Tabelle 3.10: Ammonium-Stickstoff – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS

3.2.4 Nitrat

Die Werte für Nitrat liegen für alle Proben aller Varianten vor. Aus Abbildung 3.6 und Tabelle 3.11 ist eine starke Streuung der Werte ersichtlich. Der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt der Probe der Versuchsfläche 2E/S16b ist mit $1800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ komplementär hoch zu dem geringen Ammonium-Wert dieser Probe und wird daher ebenfalls bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Der Mittelwert der anderen Proben der Variante 2EbuV, welcher die betroffene Probe zugehört, liegt bei $33 \pm 27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Aufgrund von wiederholter Bestimmung kann ein Analysefehler bei den Stickstoffwerten dieser Probe weitgehend ausgeschlossen werden.

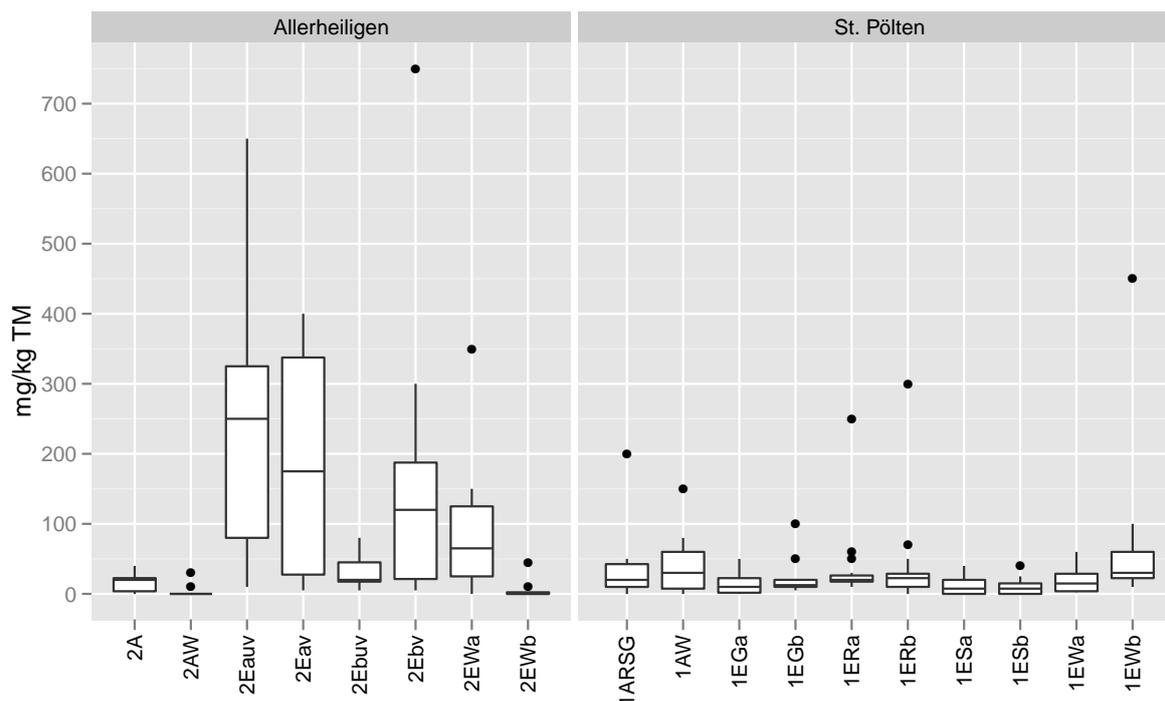


Abbildung 3.6: Boxplots Nitrat

Die Varianzanalyse (Tabelle 3.12) liefert ein signifikantes Ergebnis für den Vergleich der Ausgangsproben der beiden Deponien ($16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bzw. $37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) miteinander. Auch der Vergleich der Ausgangs- und Endproben in Allerheiligen bestätigt signifikante Unterschiede. Für St. Pölten wird in diesem Test die Nullhypothese gleicher Mittelwerte angenommen.

Beim t-Test (Tabelle 3.13) erhält man für die Werte aus Allerheiligen ein Ergebnis welches widersprüchlich zu dem der Varianzanalyse erscheint: Bei allen Tests wird die Nullhypothese angenommen, es bestehen keine Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Varianten. Zu erklären ist dies einerseits durch die Bonferroni-Holm-Sequenz und andererseits durch die Tatsache, dass im t-Test nicht alle möglichen Paarungen getestet werden, bei der Varianzanalyse allerdings alle

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	16±13	1ARSG	12	37±54
2AW	12	3±9	1AW	12	40±43
2Eauv	8	250±212	1EGa	16	16±19
2Eav	10	190±166	1EGb	16	21±23
2EbuV	7	33±27	1ERa	16	38±58
2Ebv	10	171±225	1ERb	16	41±71
2EWa	12	86±98	1ESa	16	11±12
2EWb	12	5±13	1ESb	16	10±12
			1EWa	12	21±21
			1EWb	11	76±127

Tabelle 3.11: Nitrat $\text{NO}_3\text{-N}$ – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,044 ×	0,66
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2EbuV	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,064 ✓	0,80

Tabelle 3.12: Nitrat – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,127 ✓	13	1AW	1ARSG	1,000 ✓	3
2A	2Eav	0,112 ✓	173	1ARSG	1ERa	0,997 ✓	0
2A	2Ebv	0,346 ✓	155	1ARSG	1ERb	1,000 ✓	3
2A	2Eauv	0,134 ✓	234	1ARSG	1ESa	1,000 ✓	26
2A	2EbuV	0,673 ✓	17	1ARSG	1ESb	1,000 ✓	27
2Eav	2Ebv	0,837 ✓	18	1ARSG	1EGa	1,000 ✓	21
2Eauv	2EbuV	0,160 ✓	217	1ARSG	1EGb	1,000 ✓	16
2Eav	2Eauv	1,000 ✓	60	1ERa	1ERb	1,000 ✓	3
2Ebv	2EbuV	0,427 ✓	138	1ESa	1ESb	1,000 ✓	1
2AW	2EWb	1,000 ✓	2	1EGa	1EGb	1,000 ✓	5
2AW	2EWa	0,142 ✓	82	1EGa	1ESa	1,000 ✓	5
2EWa	2EWb	0,143 ✓	81	1EGa	1ERa	1,000 ✓	21
				1ESa	1ERa	1,000 ✓	27
				1EGb	1ESb	1,000 ✓	11
				1EGb	1ERb	1,000 ✓	20
				1ESb	1ERb	1,000 ✓	31
				1AW	1EWb	1,000 ✓	36
				1AW	1EWa	1,000 ✓	19
				1EWa	1EWb	1,000 ✓	55

Tabelle 3.13: Nitrat-Stickstoff – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ TS}$

Ergebnisse gemeinsam in das Ergebnis eingehen. So werden bei den t-Tests z.B. nicht der hohe Endwert der Variante mit Bewuchs, oberflächennahe Probenahme ($190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), mit den niedrigen Ausgangswerten der Weidenflächen ($3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) verglichen.

Die t-Tests für St. Pölten bestätigen das Ergebnis der Varianzanalyse. Es sind keine signifikanten oder relevanten Unterschiede zwischen den Nitratgehalten aller untersuchten Varianten vorhanden. Der höchste Mittelwert einer Variante vom Versuchsstandort St. Pölten (1EWb mit $76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) erreicht nicht die Mindestgenauigkeitsschranke von $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3.2.5 Pflanzenverfügbare Phosphor

Der Gehalt von pflanzenverfügbarem Phosphor wurde für alle Varianten bestimmt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 3.14 aufgelistet, in Abbildung 3.7 findet sich die grafische Darstellung der Ergebnisse als Boxplot.

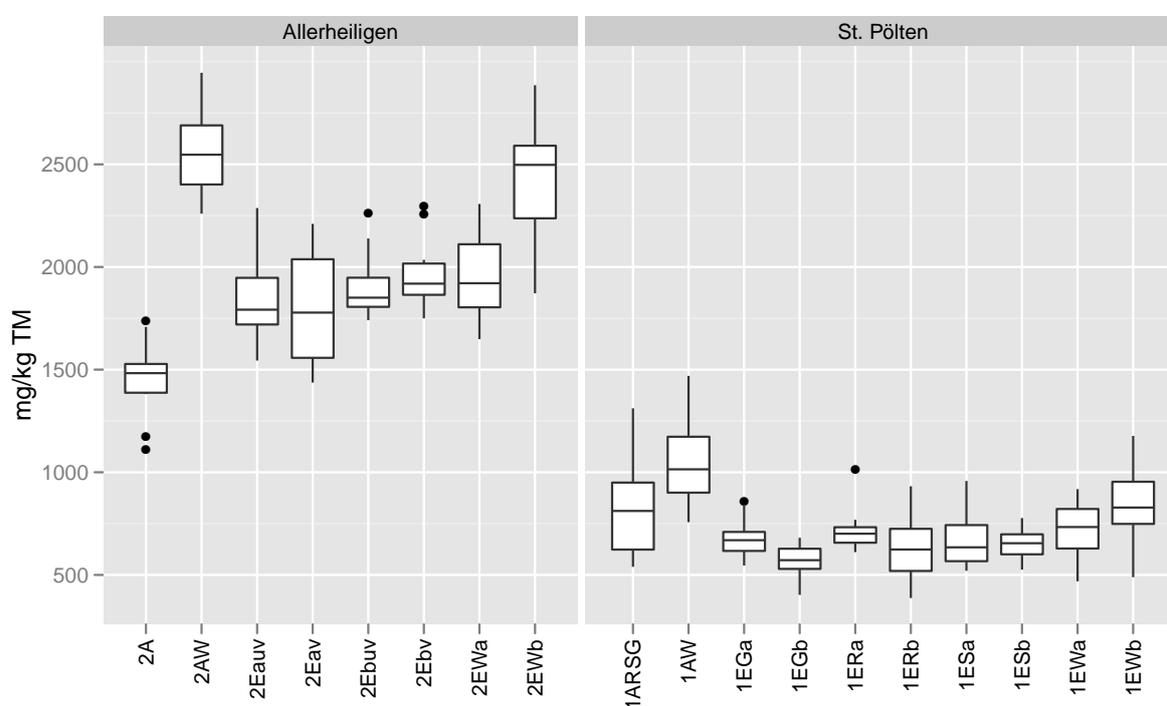


Abbildung 3.7: Boxplots pflanzenverfügbare Phosphor

Die Varianzanalyse (Tabelle 3.15) liefert einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Ausgangswerte der beiden Deponien ($1458 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $2566 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bzw. $832 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $1034 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Auch für alle Allerheiligen und St. Pöltener Varianten kann jeweils nicht von einem gleichen Mittelwert ausgegangen werden.

Die beiden Anfangswerte aus Allerheiligen unterscheiden sich, im t-Test (Tabelle 3.16) wird der P_{cal} -Gehalt der Weidenflächen als signifikant höher ausgewiesen. Bei den Varianten mit

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	1458±185	1ARSG	12	832±254
2AW	12	2566±226	1AW	12	1034±202
2Eauv	7	1851±241	1EGa	16	678±87
2Eav	10	1804±290	1EGb	16	571±77
2Ebu	8	1915±185	1ERa	16	711±94
2Ebv	10	1968±182	1ERb	16	631±149
2EWa	12	1949±210	1ESa	16	668±132
2EWb	12	2449±312	1ESb	16	650±76
			1EWa	12	713±140
			1EWb	12	841±199

Tabelle 3.14: pflanzenverfügbare Phosphor P_{CAL} – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2Ebu	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.15: pflanzenverfügbare Phosphor – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

(1804 mg · kg⁻¹ und 1968 mg · kg⁻¹) und ohne Bewuchs (1851 mg · kg⁻¹ und 1915 mg · kg⁻¹) kommt es bei der Endprobenahme in beiden untersuchten Tiefen zu einem signifikanten Anstieg von pflanzenverfügbarem Phosphor von anfänglich 1458 mg · kg⁻¹. Im direkten Vergleich besteht zwischen Bewuchs und Nicht-Bewuchs sowie zwischen den unterschiedlichen Probenahmetiefen kein signifikanter Unterschied. Bei den Weidenfeldern kam es im oberflächennahen Bereich zu einer signifikanten Abnahme des P_{cal}-Gehalts von 2566 mg · kg⁻¹ auf 1949 mg · kg⁻¹. In der tiefen Schicht ist keine Änderung nachweisbar (2449 mg · kg⁻¹).

In St. Pölten ist der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor bei allen Varianten in beiden Probenahmetiefen im Verlauf des Versuchs zurückgegangen. Im t-Test signifikant ist dieser Rückgang allerdings nur bei den Weiden von 1034 mg · kg⁻¹ auf 713 mg · kg⁻¹ im oberflächennahen Bereich. Beim Vergleich der Endproben wird die Mindestgenauigkeitsgrenze von (200 mg · kg⁻¹) bei keiner der untersuchten Paarungen erreicht.

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,000 ×	1108	1AW	1ARSG	0,518 ✓	202
2A	2Eav	0,032 ×	346	1ARSG	1ERa	0,967 ✓	121
2A	2Ebv	0,000 ×	510	1ARSG	1ERb	0,388 ✓	201
2A	2Eauv	0,027 ×	393	1ARSG	1ESa	0,638 ✓	165
2A	2EbuV	0,001 ×	457	1ARSG	1ESb	0,416 ✓	183
2Eav	2Ebv	0,749 ✓	164	1ARSG	1EGa	0,651 ✓	154
2Eauv	2EbuV	1,000 ✓	64	1ARSG	1EGb	0,076 ✓	262
2Eav	2Eauv	0,721 ✓	47	1ERa	1ERb	0,738 ✓	80
2Ebv	2EbuV	1,000 ✓	53	1ESa	1ESb	1,000 ✓	18
2AW	2EWb	1,000 ✓	118	1EGa	1EGb	0,015 ×	108
2AW	2EWa	0,000 ×	617	1EGa	1ESa	0,792 ✓	11
2EWa	2EWb	0,002 ×	499	1EGa	1ERa	1,000 ✓	33
				1ESa	1ERa	1,000 ✓	43
				1EGb	1ESb	0,105 ✓	79
				1EGb	1ERb	0,980 ✓	61
				1ESb	1ERb	1,000 ✓	18
				1AW	1EWb	0,387 ✓	194
				1AW	1EWa	0,004 ×	321
				1EWa	1EWb	0,683 ✓	127

Tabelle 3.16: pflanzenverfügbarer Phosphor – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ TS

3.2.6 Glühverluste

Die Glühverluste liegen für alle Proben vor, wie aus Tabelle 3.17 ersichtlich ist. Die Verteilung der Stichproben der einzelnen Variante wird in Abbildung 3.8 dargestellt.

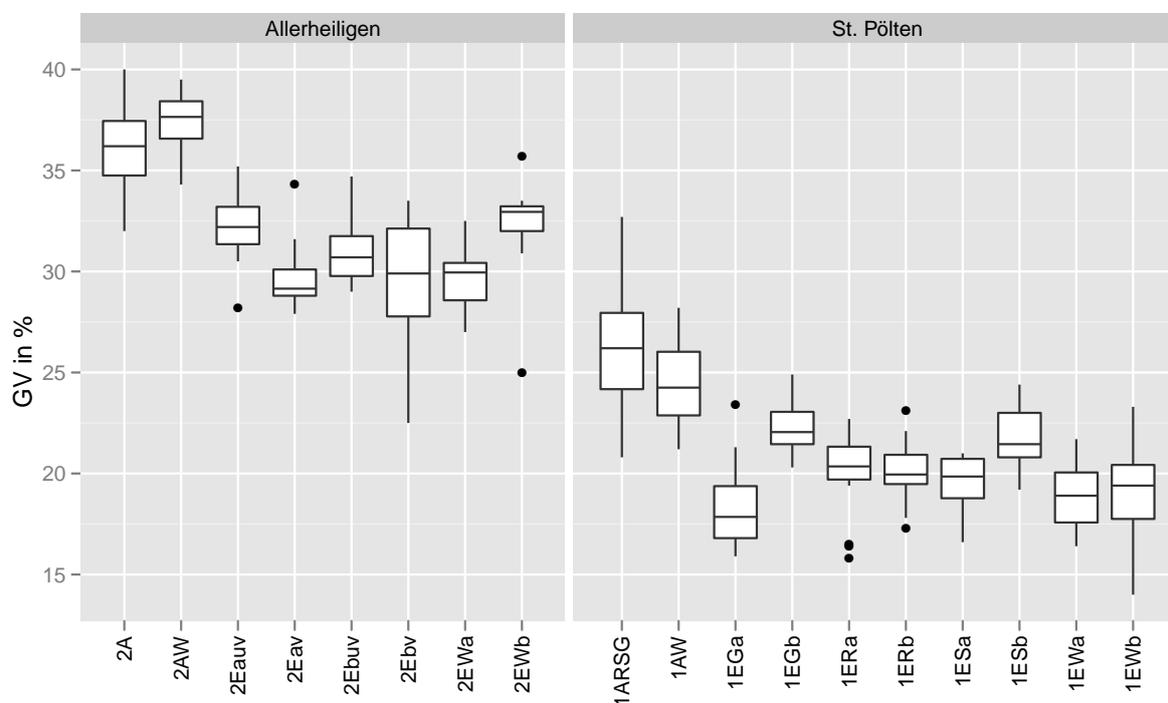


Abbildung 3.8: Boxplots Glühverluste

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	$35,9 \pm 2,4$	1ARSG	12	$26,1 \pm 3,2$
2AW	12	$37,5 \pm 1,6$	1AW	12	$24,3 \pm 2,3$
2Eauv	7	$32,1 \pm 2,3$	1EGa	16	$18,4 \pm 2,1$
2Eav	10	$29,8 \pm 1,9$	1EGb	16	$22,3 \pm 1,2$
2EbuV	8	$31,0 \pm 1,9$	1ERa	16	$20,0 \pm 2,1$
2Ebv	10	$29,5 \pm 3,4$	1ERb	16	$20,2 \pm 1,5$
2EWa	12	$29,6 \pm 1,6$	1ESa	16	$19,6 \pm 1,3$
2EWb	12	$32,2 \pm 2,6$	1ESb	16	$21,8 \pm 1,5$
			1EWa	12	$18,8 \pm 1,7$
			1EWb	12	$19,3 \pm 2,8$

Tabelle 3.17: Glühverlust – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in % TS

Die Anfangswerte der Deponien Allerheiligen (35,9 % und 37,5 %) und St. Pölten (26,1 % und 24,1 %) unterscheiden sich signifikant (Tabelle 3.18). Im t-Test zeigt sich, dass die Anfangswerte der RSG- und Weidenflächen auf beiden Deponien keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2Ebu	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.18: Glühverlust – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,290 ✓	1,6	1AW	1ARSG	0,638 ✓	1,8
2A	2Eav	0,000 ×	6,1	1ARSG	1ERa	0,000 ×	6,1
2A	2Ebv	0,001 ×	6,4	1ARSG	1ERb	0,000 ×	5,9
2A	2Eauv	0,029 ×	3,8	1ARSG	1ESa	0,000 ×	6,5
2A	2Ebu	0,001 ×	4,9	1ARSG	1ESb	0,006 ×	4,3
2Eav	2Ebv	0,850 ✓	0,2	1ARSG	1EGa	0,000 ×	7,7
2Eauv	2Ebu	0,683 ✓	1,1	1ARSG	1EGb	0,017 ×	3,8
2Eav	2Eauv	0,232 ✓	2,3	1ERa	1ERb	0,797 ✓	0,2
2Ebv	2Ebu	0,781 ✓	1,5	1ESa	1ESb	0,002 ×	2,1
2AW	2EWb	0,000 ×	5,2	1EGa	1EGb	0,000 ×	4,0
2AW	2EWa	0,000 ×	7,8	1EGa	1ESa	0,296 ✓	1,2
2EWa	2EWb	0,043 ×	2,6	1EGa	1ERa	0,239 ✓	1,6
				1ESa	1ERa	1,000 ✓	0,4
				1EGb	1ESb	1,000 ✓	0,6
				1EGb	1ERb	0,002 ×	2,2
				1ESb	1ERb	0,047 ×	1,6
				1AW	1EWb	0,001 ×	5,0
				1AW	1EWa	0,000 ×	5,5
				1EWa	1EWb	1,000 ✓	0,5

Tabelle 3.19: Glühverlust – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 2,5$ % TS

Die Endwerte der Versuchsflächen aus Allerheiligen sind im t-Test von den Ausgangswerten zu unterscheiden. Es zeigt sich allerdings kein signifikanter Unterschiede in den beiden Probenahmetiefen zwischen bewachsenen (29,8 % bzw. 29,5 %) und unbewachsenen Flächen (32,1 % bzw. 31,0 %). Eine Unterscheidung anhand der Tiefe ist nur bei den Weidenflächen möglich (29,6 % und 32,2 %).

Bei den St. Pöltener Versuchsflächen unterscheiden sich die Anfangswerte ebenfalls signifikant von den Endwerten aller Varianten in beiden Tiefen. Bei der Variante Gras ist der Glühverlust der Endproben des tiefen Horizonts (22,3 %) signifikant größer als jener der oberflächennahe genommenen Proben (22,3 %). Bei Raps, Spontanvegetation und den Weiden ist eine Unterscheidung aufgrund der Probenahmetiefe nicht relevant, da die Differenz der Mittelwerte geringer ist als die Mindestgenauigkeitsschranke von 2,5 % TS. Die Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation wiesen bei der Endprobenahme im oberen Bereich Glühverluste auf, die im t-Test als gleich angenommen werden, im tiefen Bereich bleibt die Differenz der Mittelwerte unter d .

Die Ergebnisse von Varianzanalyse und t-Test sind den Tabellen 3.18 und 3.19 zu entnehmen.

3.2.7 Atmungsaktivität

Die AT_4 der Proben wurden aufgrund begrenzter Ressourcen nicht für alle Varianten bestimmt. In Allerheiligen liegen keine Werte für die Endproben von den Weidenfeldern vor, in St. Pölten ist die AT_4 der Proben aus der tieferen Schicht von den Varianten Raps und Weiden nicht, von den Spontanvegetationsfeldern nur teilweise bestimmt worden. Die Ergebnisse der Analyse wurden einmal auf die gesamte Trockensubstanz (TS) und einmal auf die organische Trockensubstanz (oTS) bezogen ausgewertet. Die statistischen Tests wurden für diese beiden Auswertungen separat durchgeführt. Die Mittelwerte mit Standardabweichung und die Anzahl der durchgeführten Analysen je Variante sind in Tabelle 3.20 und 3.21 zusammengestellt.

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	16,7±6,9	1ARSG	12	3,2±1,3
2AW	12	15,6±2,9	1AW	12	3,2±0,9
2Eauv	8	2,1±0,8	1EGa	16	1,7±0,3
2Eav	10	1,5±0,8	1EGb	16	3,2±0,4
2EbuV	8	4,7±2,2	1ERa	16	1,8±0,4
2Ebv	10	3,9±2,6	1ERb	0	
2EWa	0		1ESa	16	1,5±0,2
2EWb	0		1ESb	9	3,0±0,4
			1EWa	12	1,3±0,2
			1EWb	0	

Tabelle 3.20: Atmungsaktivität bezogen auf Trockensubstanz – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg O₂/g TS

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	47,1±22,2	1ARSG	12	11,4±4,6
2AW	12	38,9±7,3	1AW	12	11,8±3,2
2Eauv	7	6,6±2,4	1EGa	16	9,1±1,6
2Eav	10	4,9±2,2	1EGb	16	14,4±1,9
2EbuV	8	15,0±7,3	1ERa	16	9,0±1,8
2Ebv	10	12,8±7,6	1ERb	0	
2EWa	0		1ESa	16	7,6±1,2
2EWb	0		1ESb	9	13,8±1,5
			1EWa	12	7,2±1,3
			1EWb	0	

Tabelle 3.21: Atmungsaktivität bezogen auf organische Trockensubstanz – Mittelwerte (μ) und Standardabweichung (σ) in mg O₂/g oTS

Bei der graphischen Darstellung, welche ebenfalls getrennt für die Werte bezogen auf TS (Tabelle 3.9) und oTS (Tabelle 3.10) erfolgt, wurden die y-Achsen für die beiden Deponien getrennt skaliert um die Unterschiede zwischen den St. Pöltener Varianten sichtbar zu machen.

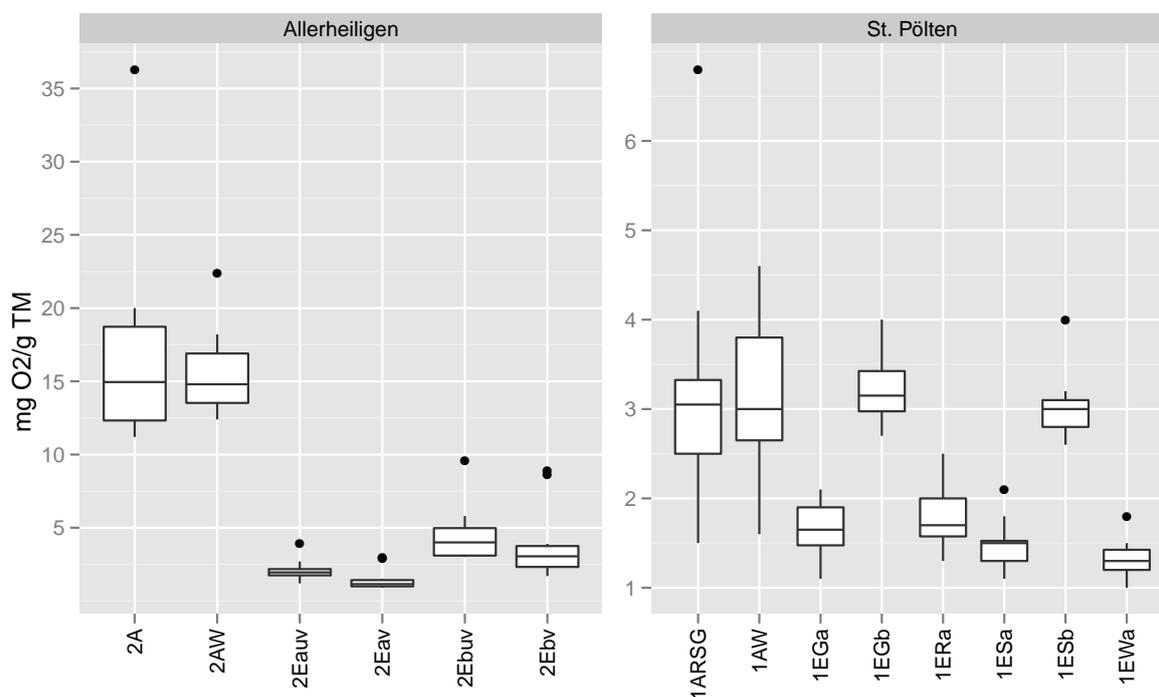


Abbildung 3.9: Boxplots Atmungsaktivität (bezogen auf Trockenmasse)

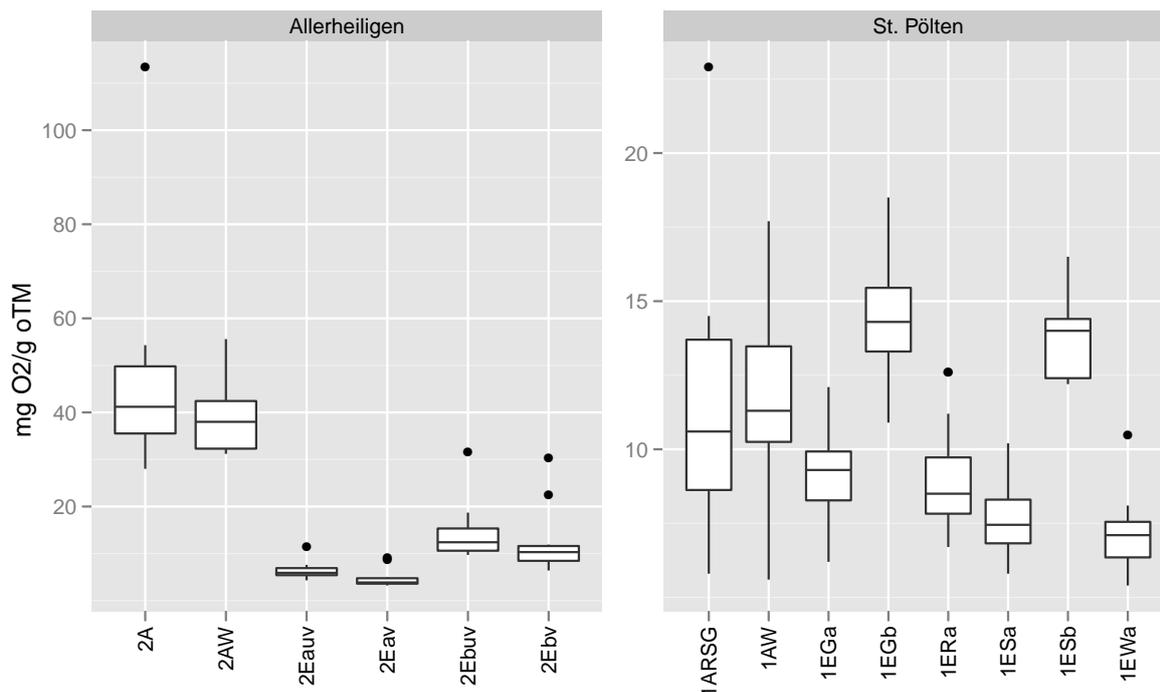


Abbildung 3.10: Boxplots Atmungsaktivität (bezogen auf organische Trockenmasse)

Die Varianzanalyse liefert für die Atmungsaktivität bezogen auf gesamte und organische Trockensubstanz (Tabelle 3.22 und 3.23) die gleichen Resultate. Die Werte der Ausgangsprobenahme von den beiden Deponien sind signifikant unterschiedlich (3,2 mg O₂/g TS bis 16,7 mg O₂/g TS bzw. 11,4 mg O₂/g oTS bis 47,1 mg O₂/g oTS). Beim Vergleich aller Varianten einer Deponie unterschreitet der p-Wert in allen Fällen das α von 0,05, die Hypothese gleicher Mittelwerte wird daher abgelehnt.

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2EbV-2Eauv-2EbuV	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.22: Atmungsaktivität (TS) – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

	Pr(>F)	Güte
St. Pölten vs. Allerheiligen		
1AW-1ARSG-2AW-2A	0,000 ×	1,00
Allerheiligen		
2AW-2A-2EWa-2EWb-2Eav-2Ebv-2Eauv-2Ebu	0,000 ×	1,00
St. Pölten		
1AW-1ARSG-1EWa-1EWb-1ERa-1ERb-1ESa-1ESb-1EGa-1EGb	0,000 ×	1,00

Tabelle 3.23: Atmungsaktivität (org. TS) – Ergebnisse der Varianzanalyse und zugehörige Güte, $\alpha = 0,05$

Beim t-Test der Werte bezogen auf die gesamte Trockensubstanz (Tabelle 3.24) werden die Ausgangswerte in Allerheiligen als gleich angenommen (16,7 mg O₂/g TS und 16,7 mg O₂/g TS). Die AT₄ ist bei allen untersuchten Varianten bei Versuchsende signifikant niedriger als zu Beginn. Die Werte der Endprobenahme aus der oberen Schicht (2,1 mg O₂/g TS und 1,5 mg O₂/g TS) sind nicht signifikant niedriger als jene aus dem tiefen Bereich (4,7 mg O₂/g TS und 3,9 mg O₂/g TS). Auch anhand der Pflanzendeckung ist keine signifikante Trennung der Proben aus Allerheiligen zulässig.

In St. Pölten ist die Abnahme der Atmungsaktivität von anfänglich 3,2 mg O₂/g TS auf 1,3 mg O₂/g TS bis 1,8 mg O₂/g TS im oberflächennahen Bereich bei allen Varianten signifikant. Im tiefen Bereich kommt es bei den beiden analysierten Varianten Spontanvegetation (3,0 mg O₂/g TS) und Gras (3,2 mg O₂/g TS) zu keiner Veränderung der AT₄. Die Endwerte aus den beiden Probenahmetiefen unterscheiden sich bei allen untersuchten Varianten. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind zwar relativ gering, jedoch im Vergleich Raps (1,8 mg O₂/g TS) gegen Spontanvegetation (1,5 mg O₂/g TS) im oberflächennahen Bereich dennoch signifikant. Gras (1,7 mg O₂/g TS) lässt sich hier von den beiden anderen Varianten nicht trennen.

Wird der Sauerstoffverbrauch der Proben auf die organische Trockenmasse bezogen, zeigt sich in Allerheiligen ein ähnliches Ergebnis im t-Test (Tabelle 3.25). Der einzige Unterschied gegenüber der Auswertung bezogen auf die gesamte Trockensubstanz ist, dass bei den Endproben mit Bewuchs ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Probenahmehorizonten besteht (4,9 mg O₂/g TS und 12,8 mg O₂/g TS).

Bei den St. Pöltener Proben ergibt sich ein etwas anderes Bild. Bezieht man die Atmungsaktivität auf die oTS sind die Unterschiede zwischen Ausgangs- und Endprobenahme nur mehr bei den Weidenflächen signifikant (von 11,8 mg O₂/g TS auf 7,2 mg O₂/g TS). Die Endproben aus den unterschiedlichen Tiefen von Spontanvegetation (7,6 mg O₂/g TS und 13,8 mg O₂/g TS) und Gras (9,1 mg O₂/g TS und 14,4 mg O₂/g TS) sind noch immer signifikant unterschiedlich, zwischen den verschiedenen Vegetationen kann jedoch in keiner der getesteten Paarungen mehr zuverlässig unterschieden werden.

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,634 ✓	1,1	1AW	1ARSG	0,986 ✓	0,0
2A	2Eav	0,000 ×	15,2	1ARSG	1ERa	0,037 ×	1,4
2A	2Ebv	0,000 ×	12,7	1ARSG	1ESa	0,011 ×	1,7
2A	2Eauv	0,000 ×	14,5	1ARSG	1ESb	1,000 ✓	0,1
2A	2EbuV	0,000 ×	12,0	1ARSG	1EGa	0,023 ×	1,5
2Eav	2Ebv	0,065 ✓	2,5	1ARSG	1EGb	1,000 ✓	0,0
2Eauv	2EbuV	0,076 ✓	2,5	1ESa	1ESb	0,000 ×	1,6
2Eav	2Eauv	0,327 ✓	0,7	1EGa	1EGb	0,000 ×	1,5
2Ebv	2EbuV	1,000 ✓	0,7	1EGa	1ESa	0,329 ✓	0,2
				1EGa	1ERa	1,000 ✓	0,1
				1ESa	1ERa	0,048 ×	0,3
				1EGb	1ESb	1,000 ✓	0,2
				1AW	1EWa	0,000 ×	1,9

Tabelle 3.24: Atmungaktivität (TS) – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,5 \text{ mg O}_2/\text{g TS}$

Allerheiligen				St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz	Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
2A	2AW	0,495 ✓	8,2	1AW	1ARSG	1,000 ✓	0,3
2A	2Eav	0,000 ×	42,2	1ARSG	1ERa	0,632 ✓	2,4
2A	2Ebv	0,001 ×	34,3	1ARSG	1ESa	0,132 ✓	3,9
2A	2Eauv	0,000 ×	40,5	1ARSG	1ESb	0,499 ✓	2,3
2A	2EbuV	0,002 ×	32,1	1ARSG	1EGa	0,565 ✓	2,3
2Eav	2Ebv	0,048 ×	7,9	1ARSG	1EGb	0,361 ✓	3,0
2Eauv	2EbuV	0,057 ✓	8,4	1ESa	1ESb	0,000 ×	6,2
2Eav	2Eauv	0,452 ✓	1,8	1EGa	1EGb	0,000 ×	5,3
2Ebv	2EbuV	0,532 ✓	2,3	1EGa	1ESa	0,051 ✓	1,5
				1EGa	1ERa	0,894 ✓	0,1
				1ESa	1ERa	0,118 ✓	1,4
				1EGb	1ESb	0,960 ✓	0,7
				1AW	1EWa	0,004 ×	4,6

Tabelle 3.25: Atmungaktivität (org. TS) – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 3 \text{ mg O}_2/\text{g oTS}$

3.2.8 Huminstoffe

Der Huminsäuregehalt wurde nur für einen Teil der Proben bestimmt, da es teilweise zu einer Trübung des Extraktes bei der Analyse kam. Daher kann für die Varianten 1ESb und 1EWb und alle Proben aus Allerheiligen kein Huminsäuregehalt angegeben werden. Für die Varianten 1ESb, 2A und 2AW wurde zwar ein Großteil der Proben analysiert, die Werte sind allerdings mit großer Unsicherheit behaftet und gehen daher nicht in die statistische Analyse ein. Die vorhandenen Mittelwerte und Standardabweichungen können aus Tabelle 3.26 entnommen werden, Werte, die nicht in die Auswertung eingehen, sind kursiv gesetzt. Die graphische Darstellung der St. Pöltener Werte erfolgt in Abbildung 3.11.

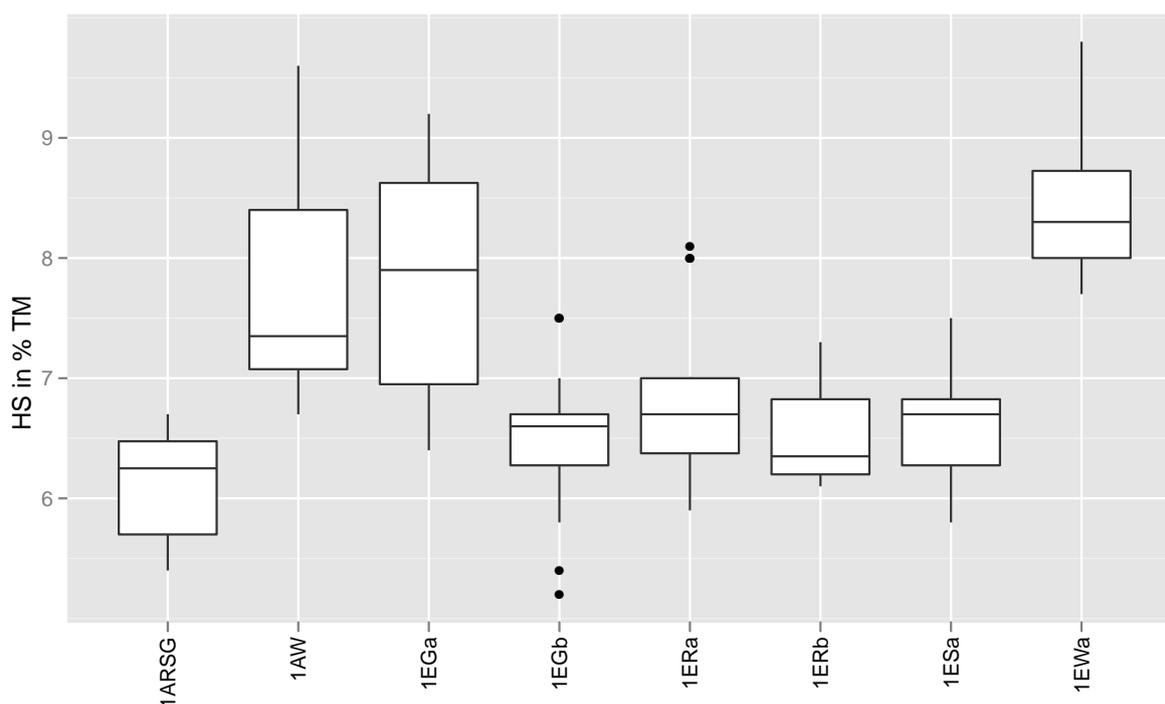


Abbildung 3.11: Boxplots Huminsäuren St. Pölten

Die Varianzanalyse gibt für die Varianten aus St. Pölten einen signifikanten Unterschied aus. Der p-Wert der Varianzanalyse ist 0,00, die Güte des Tests 1,00.

Im t-Test zeigt sich ein sehr differenziertes Verhalten der unterschiedlichen Varianten und Probenahmetiefen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 3.27 zusammengefasst. Bereits die Ausgangswerte von Weiden (7,7 % oTS) und den anfänglich gemeinsam beprobten Varianten Raps, Gras und Spontanvegetation (6,1 % oTS) unterscheiden sich signifikant. Der Huminsäuregehalt der oberflächennahen Endproben von den Feldern Raps (6,8 % oTS) und Gras (7,8 % oTS) unterscheidet sich signifikant vom Ausgangswert, jener der Varianten Spontanvegetation (6,6 % oTS) und Weiden (8,5 % oTS) nicht. In der tiefen Schicht kommt es bei Raps und Gras (jeweils 6,5 % oTS) zu keinem signifikanten Anstieg, für die beiden anderen Varianten liegen hier keine Werte vor. Bei der Variante Gras besteht bei den Endproben ein signifikanter Unterschied zwischen den bei-

Allerheiligen			St. Pölten		
Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$	Variante	Werte	$\mu \pm \sigma$
2A	12	$8,3 \pm 0,9$	1ARSG	12	$6,1 \pm 0,5$
2AW	12	$8,7 \pm 1,4$	1AW	12	$7,7 \pm 0,9$
2Eauv	0		1EGa	16	$7,8 \pm 0,9$
2Eav	0		1EGb	16	$6,5 \pm 0,6$
2EbuV	0		1ERa	16	$6,8 \pm 0,7$
2Ebv	0		1ERb	16	$6,5 \pm 0,4$
2EWa	0		1ESa	16	$6,6 \pm 0,5$
2EWb	0		1ESb	15	$7,4 \pm 0,5$
			1EWa	12	$8,5 \pm 0,6$
			1EWb	0	

Tabelle 3.26: Huminsäuren – Mittelwerte und Standardabweichung in % oTS

den Probenahmetiefen, bei Raps nicht. Der Huminsäuregehalt der Endprobe Gras ist im oberflächennahen Bereich signifikant höher, als jener von Raps oder Spontanvegetation, welche sich voneinander nicht unterscheiden. Im tiefen Bereich weisen die Endwerte von Gras und Raps keinen signifikant unterschiedlichen Huminsäuregehalt auf.

St. Pölten			
Variante 1	Variante 2	p-Wert	Differenz
1AW	1ARSG	0,001 ×	1,6
1ARSG	1ERa	0,028 ×	0,7
1ARSG	1ERb	0,199 ✓	0,4
1ARSG	1ESa	0,122 ✓	0,5
1ARSG	1EGa	0,000 ×	1,6
1ARSG	1EGb	0,369 ✓	0,3
1ERa	1ERb	0,467 ✓	0,3
1EGa	1EGb	0,001 ×	1,3
1EGa	1ESa	0,002 ×	1,2
1EGa	1ERa	0,030 ×	0,9
1ESa	1ERa	0,500 ✓	0,2
1EGb	1ERb	0,818 ✓	0,0
1AW	1EWa	0,202 ✓	0,7

Tabelle 3.27: Huminsäuren – p-Werte aus t-Test (Welch), modifiziert nach Bonferroni-Holm, $\alpha = 0,05$ und Differenz der Mittelwerte, $d = 0,6$

4 Diskussion

Die Ergebnisse der Versuche können durch die drei Hauptprozesse Auswaschung, Mineralisierung und Humifizierung erklärt werden. Die Unterschiede zwischen den Werten der beiden Probenahemtiefen ergeben sich durch Anaerobie in der tiefen Schicht (40 cm bis 50 cm) und den Transport von löslichen Stoffen durch eindringendes Niederschlagswasser.

4.1 Auswaschung

Auswaschung beschreibt einen vertikalen Transport löslicher Stoffe durch Flüssigkeitseintrag in das betrachtete Material. Gelangt Niederschlagswasser in den Boden so wird jener Anteil der nicht in Bodenporen zwischengespeichert oder von den Pflanzenwurzeln aufgenommen wird unter Wirkung der Schwerkraft in eine tiefere Schicht sickern, bis ein wassergesättigter Bereich oder eine undurchlässige Schicht erreicht wird. Auf diesem Sickerweg können Stoffe aus dem Substrat gelöst werden und so in tiefere Schichten transportiert werden. (Gisi, 1997)

4.1.1 Leitfähigkeit

Der Effekt der Auswaschung zeigt sich deutlich am Salzgehalt, welcher, gemessen durch die elektrische Leitfähigkeit, über den Versuchszeitraum in den Substraten der beiden Versuchsflächen signifikant abgenommen hat. Die einzige Ausnahme stellen dabei die Proben aus der tiefen Schicht der St. Pöltener Grasflächen ($2,3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) dar, bei welchen die Abnahme des Salzgehalts statistisch noch nicht als abgesichert angesehen werden kann. Zu erklären ist dies durch die dichte Vegetationsdecke, welche auf diesen Flächen durch Transpiration und Interzeption einen geringeren Eintrag von Niederschlagswasser bedingte.

Die Leitfähigkeit ist zu Versuchsende in der oberflächennahen Schicht (Allerheiligen $1,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $1,9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, St. Pölten $0,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $1,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) deutlich niedriger als im tiefen Bereich ($2,8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $3,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ und $1,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $2,3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$). Dies legt nahe, dass der Abtransport der Salze in den tieferen Bereichen langsamer von statten geht.

4.1.2 pH

Durch die Auswaschungsvorgänge kommt es auch zu einer Abnahme des pH-Wertes, welcher sich auf einen Wert etwas über 7 einstellt. Auf den Versuchsflächen sank der pH-Wert im oberflächennahen Bereich im Untersuchungszeitraum von etwas über 8 auf Werte zwischen 7 und 8. In der tieferen Schicht blieb der pH-Wert bei manchen Varianten unverändert, bei anderen kam es im Mittel zu einem Anstieg auf bis zu pH 8,8.

Zu erklären wäre dies durch den Transport von Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ aus dem oberen in den unteren Probenahmehorizont und eine Mobilisierung von Natriumcarbonat Na_2CO_3 , was zu einem Anstieg des pH-Wertes führen kann. Dieser Prozess wurde an unbehandelt deponierten Siedlungsabfällen beobachtet. (Mpenyana u. a., 2008)

Eine weitere Erklärung für die höheren pH-Werte in der tieferen Schicht, ist der höhere Gehalt an Ammoniak und Ammonium in diesem Bereich. Diese beiden Stickstoffverbindungen sind gebräuchliche Puffer für einen Bereich von etwa pH 9. NH_3 ist ein H^+ -Ionen-Fänger, NH_4 ein OH^- -Ionen-Fänger (Hoinkis und Lindner, 2007). So weisen die Proben aus dem anaeroben Bereich von den Weidenfeldern in Allerheiligen zu Versuchsende einen pH-Wert von 8,8 und ein Ammoniumgehalt von $2077 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ auf.

Eine gute Versorgung mit Phosphat führt in Böden zu einer Pufferung im Bereich pH 5 bis pH 8 (Kuntze u. a., 1994). Da bei den untersuchten Proben gerade in den tieferen Schichten der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor hoch bis sehr hoch ist (Allerheiligen 1804 mg/kg TS bis 2449 mg/kg TS , St. Pölten 571 mg/kg TS bis 841 mg/kg TS), sich jedoch ein pH-Wert deutlich über 8 einstellt, scheint dieser Prozess hier nicht ausschlaggebend zu sein.

4.1.3 Ammonium- und Nitratstickstoff

Der Ammoniumgehalt des Materials war zu Beginn der Untersuchungen bei beiden Materialien hoch (Allerheiligen $1921 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $3404 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, St. Pölten $815 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $1002 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), wobei die Werte stark streuten. Die höheren NH_4 -Werte in Allerheiligen sind durch die den Abfällen beigemengten Klärschlämme zu erklären (Neubauer und Öhlinger, 2006). Die Abnahme an Ammonium ist nicht nur durch Auswaschung, sondern auch durch den Prozess der Nitrifikation, der bakteriellen Oxidation von NH_4 zu Nitrat zu erklären (Gisi, 1997). Dieser Vorgang war in Allerheiligen bei den oberflächennahen Proben gut zu beobachten, wo es zu einem starken Rückgang von NH_4 ($19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $112 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) und einem deutlichen Anstieg des NO_3 -Gehalts von $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ auf $86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ kam. Bei den Proben aus der tieferen, anaeroben Schicht war die Reduktion des Ammoniumstickstoffes weniger deutlich (Endwerte $824 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $2096 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) und auch die Zunahme an Nitrat (auf $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) war weniger ausgeprägt oder auch gar nicht nachweisbar.

In St. Pölten war zu Ende des Versuchs bei vielen Proben aus der oberen Schicht der Gehalt an Ammonium bereits an oder unter der Nachweisgrenze ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Bei diesen Proben war auch der Nitratgehalt ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) sehr gering. Dies legt nahe, dass der anfänglich vorhandene Stickstoff größtenteils bereits ausgewaschen, denitrifiziert oder durch Pflanzen aufgenommen wurde (Schlegel, 1992). Erhart u. a. (2007) konnten bei Düngerversuchen über elf Jahre zeigen, dass die Aufbringung von Komposten zu keiner signifikanten Änderung des Nitratgehalts in tieferen Bodenschichten (150 cm) führt.

Insgesamt zeigten die Proben ein für Stickstoffparameter typisches heterogenes Bild (Lashermes u. a., 2010), was die statistische Auswertung bei der gegebenen Stichprobenanzahl erschwerete. Dies äußert sich in einer großen Standardabweichung und damit einhergehend niederen Güte der Tests. Bei den Werten aus Allerheiligen kam es durch den verminderten Stichprobenumfang zusätzlich zu einer Verminderung der Aussagekraft der Auswertungsergebnisse. Um gesicherte Aussagen über Parameter zu treffen, die eine derartige Streuung aufweisen, wäre ein größerer

Stichprobenumfang vorzusehen. Um etwa mit den tatsächlichen Werten der Varianten 2EbuV ($33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) und 2Ebv ($171 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), das sind die Proben aus den beiden Tiefen der Flächen ohne Bewuchs aus Allerheiligen, beim t-Test eine Güte von 0,8 einzuhalten, wären bei der gegebenen Differenz der Mittelwerte und der Standardabweichung 43 Stichproben je Variante notwendig (Berechnung in R):

```
> power.t.test(delta=171-33, sd=225, sig.level=.05, power=.8)
```

```
Two-sample t test power calculation
```

```

      n = 42.71156
  delta = 138
      sd = 225
sig.level = 0.05
  power = 0.8
alternative = two.sided
```

NOTE: n is number in *each* group

4.1.4 pflanzenverfügbare Phosphor

Ein interessantes Ergebnis zeigt sich beim pflanzenverfügbaren Phosphor. In Allerheiligen nimmt dieser im Verlauf des Versuches zu, in St. Pölten kommt es zu einer Abnahme. Hier dürfte es neben der Auslaugung durch Umwandlung und Mineralisierung der organischen Anteile des Materials durch mikrobielle Aktivität zu einem Anstieg des für Pflanzen verfügbaren Phosphor kommen.

Die signifikant höheren Ausgangswerte in Allerheiligen ($1458 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ und $2566 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) sind durch den Klärschlammanteil des Materials zu erklären. In St. Pölten kam es im tiefen Bereich ($571 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) zu einer stärkeren Abnahme als im oberflächennahen Bereich ($668 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $711 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Allerdings ist der Rückgang in beiden Fällen nicht statistisch signifikant. Ein ähnliches Verhalten wurde von Gomiscek (1999) beobachtet. Der Anstieg des P_{cal} in Allerheiligen ist in beiden Probenahmetiefen signifikant, wobei die Änderung der Werte der Proben aus der tieferen Schicht ($1915 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $2449 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) noch deutlicher ist.

Da der Gesamtgehalt an Phosphor nicht bestimmt wurde, können keine Aussagen darüber getroffen werden, welcher Anteil des gesamten Phosphors durch den CAL-Aufschluss erfasst wird und ob sich dieser Anteil im Laufe des Versuchs verändert hat. Eichler-Löbermann u. a. (2007) konnten in Düngeversuchen nur einen geringen Zusammenhang zwischen Phosphorversorgung des Bodens und Pflanzenerträgen nachweisen, da die Mechanismen der Pflanzenwurzeln zur Aufnahme von Phosphor durch Extraktionsverfahren im Labor nur unbefriedigend wiedergespiegelt werden.

Die Verfügbarkeit von Phosphor für Pflanzen hängt in großem Maße von pH-Wert, löslichem Aluminium, Eisen und Calcium ab. Sie ist bei einem pH-Wert zwischen 5,5 und 7 am größten (Engelstad und Terman, 1980). Durch Auswaschung aus dem oberflächennahen Bereich könnte

es zu einem Anstieg von Calciumhydrogencarbonat in den tieferen Bereichen der Versuchsflächen kommen. Ca^{2+} -Ionen begünstigen die Ausfällung von Phosphor als Apatit, welcher nur schwer löslich ist (Finck, 1976; Iyamuremye u. a., 1996). Dies könnte erklären, weshalb bei den Endproben aus der tieferen Schicht ($571 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) der Versuchsfläche St. Pölten weniger Phosphor im CAL-Aufschluss gefunden wurde, als bei den Proben aus dem oberflächennahen Bereich ($668 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ bis $711 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Da der Rückgang der Leitfähigkeit auf Flächen mit dichter Vegetation ($2,3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) geringer ist als auf jenen ohne ($1,7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ bis $2,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), liegt es nahe, dass bei Bewuchs durch stärkere Interzeption und Transpiration weniger Niederschlagswasser in die tieferen Schichten des geschütteten Materials gelangt und somit die Auswaschung des Materials verlangsamt wird. Auch wenn es schwierig ist, bei dem gegebenen Stichprobenumfang statistisch gesicherte Aussagen über die Veränderung der Stickstoffparameter zu treffen, entspricht das beobachtete Verhalten den bekannten Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation (Schlegel, 1992). Zur Klärung der Ursachen für die abweichende Verfügbarkeit von Phosphor in den beiden Probennehorizonten wären weitere Untersuchungen hilfreich.

4.2 Mineralisierung

Die Mineralisierung ist einer der drei Prozesse, welche die Umsetzung organischer Ausgangsstoffe im Boden beschreibt. Die beiden anderen Prozesse sind der Aufbau von Biomasse und die Humifizierung, auf welche im folgenden noch eingegangen wird. Die Mineralisierung beschreibt den Abbau von Organik durch Mikroorganismen zu anorganischen Produkten. Ihre Intensität variiert über die Bodensäule und nimmt mit zunehmender Tiefe ab (Gisi, 1997). Mineralisierung wird durch eine Abnahme des Glühverlustes gekennzeichnet, die Atmungsaktivität zeigt die mikrobielle Aktivität zum Zeitpunkt der Probenahme. Die beiden Parameter sind Indikatoren für den Fortschritt des Abbaus von organischen Substanzen in Böden. (Binner und Zach, 1999; Tambone u. a., 2007; Adani u. a., 2009)

4.2.1 Glühverlust

Der Anteil der Organik nahm auf beiden Versuchsflächen bei allen Varianten signifikant ab. In St. Pölten ist diese Abnahme bei den dicht bewachsenen Versuchsfeldern mit Gras von anfänglich 26,1 % TS auf 18,4 % TS am deutlichsten. Hier ist auch die unterschiedliche Mineralisierungsrate der gut durchwurzelten oberen Probenahmeschicht (18,4 % TS) und der tieferen anaeroben Schicht (22,3 % TS) signifikant. Dies zeigt, dass es bei Bewuchs und Durchwurzelung des Materials zu einer schnelleren Umsetzung der organischen Anteile kommt. Gomiscek (1999) beobachtete bei Pflanzversuchen auf zwei Biokompost-Erde-Mischungen ebenfalls einen stärkeren Rückgang des Glühverlustes des Substrates bei Varianten mit Bewuchs als bei der Kontrollvariante Brache.

Bei den Flächen in Allerheiligen lassen sich anhand des Bewuchses keine Unterschiede erkennen. Auch anhand der Tiefe ist keine signifikante Änderung des organischen Anteils des Materials zu erkennen. Es ist zu berücksichtigen, dass bei diesem Material die Mineralisierung

insgesamt noch weniger weit fortgeschritten ist, als auf der Versuchsfläche St. Pölten. Die Glühverluste der Proben aus Allerheiligen (bei Versuchsende 29,5 % TS bis 32,2 % TS) sind deutlich höher, als jener aus St. Pölten (18,4 % TS bis 22,3 % TS).

4.2.2 Atmungsaktivität

Bei der Betrachtung der Atmungsaktivität über 4 Tage (AT_4) erscheint es sinnvoll, den verbrauchten Sauerstoff nicht auf die gesamte Trockensubstanz (TS), sondern nur auf die organische Trockensubstanz (oTS) zu beziehen. Es wird so vermieden, dass sich die Bezugsgröße in ihrer für den betrachteten Parameter entscheidenden Charakteristik, nämlich dem Verhältnis organischer und mineralischer Anteile, durch die untersuchte Größe während des Versuches verändert. Wird die Atmungsaktivität auf die oTS bezogen, ist auch ein Vergleich zwischen den beiden Versuchsstandorten aussagekräftiger, da eine Beeinflussung der Werte durch die stark voneinander abweichenden Glühverluste vermieden wird. Eine stärkere Mineralisierung, ersichtlich an der Abnahme des Glühverlustes, bewirkt einen Rückgang der Atmungsaktivität.

Wie auch am Glühverlust ist an der AT_4 ersichtlich, dass das Material in St. Pölten bereits zu Beginn des Versuches weiter mineralisiert war (11,4 % oTS), als jenes auf den Feldern in Allerheiligen (47,1 % oTS). Auf der Versuchsfläche St. Pölten kommt es im oberflächennahen Bereich zu einer geringfügigen Abnahme der Atmungsaktivität (7,2 % oTS bis 9,1 % oTS), im anaeroben Bereich nimmt der mikrobielle Sauerstoffbedarf leicht zu (13,8 % oTS bis 14,4 % oTS). Diese Werte der beiden Probenahmetiefen unterscheiden sich zu Ende des Versuches signifikant voneinander, jedoch nicht von dem Ausgangswert von 11,4 % oTS. Die Atmungsaktivität in der oberflächennahen Schicht bewegt sich zu Versuchsende auf der Versuchsfläche St. Pölten in einer für aktive Böden gewöhnlichen Größenordnung. (Gisi, 1997) Wenngleich die Unterschiede nicht statistisch signifikant sind, sollte angemerkt werden, dass die Proben der Grasflächen in beiden Tiefen höhere Atmungsaktivität zeigten (9,1 % oTS und 14,4 % oTS), als die schlechter bewachsenen Varianten (7,6 % oTS bis 9,0 % oTS und 13,8 % oTS).

Auf der Versuchsfläche Allerheiligen kommt es zu einem starken Rückgang der Atmungsaktivität über den Versuchszeitraum. Sind die Ausgangswerte (47,1 % oTS) noch ein Vielfaches jener aus St. Pölten (11,4 % oTS), sind die Endwerte in der oberflächennahen Schicht bereits geringer (6,6 % oTS und 4,9 % oTS), im anaeroben Bereich auf gleichem Niveau (15,0 % oTS und 12,8 % oTS). Bei den Feldern mit Bewuchs ist der Sauerstoffverbrauch im oberen Bereich (4,9 % oTS) signifikant niedriger als bei den Proben aus dem tieferen Horizont (12,8 % oTS).

4.3 Humifizierung

Humifizierung ist die Umwandlung organischer Verbindungen in eine stabilere Form. Die so entstehenden Huminstoffe haben im Wasserhaushalt des Bodens eine tragende Rolle, sind ein wichtiger Strukturgeber und speichern Nährstoffe und machen diese für Pflanzen verfügbar. (Gisi, 1997)

Die stärkste Zunahme an Huminsäuren, es erfolgte nur eine Bestimmung dieser Huminstofffraktion, ist bei den dicht bewachsenen und gut durchwurzelten Grasflächen im oberflächennahen Bereich auf 7,8 % oTS von anfänglich 6,1 % oTS zu beobachten. Der Endwert ist signifi-

kant höher als jener der Proben von den Feldern mit Raps (6,8 % oTS) und Spontanvegetation (6,6 % oTS). Auf den Versuchsfeldern mit Gras ist der Gehalt an Huminsäuren im oberflächennahen Bereich signifikant höher als im darunter liegenden anaeroben Bereich (6,5 % oTS), bei Raps (6,5 % oTS) ist dieser Unterschied nicht signifikant. Ein Anstieg des Huminsäuregehalts in Böden durch Aufbringung von Müllkompost bzw. MBA-Material wurde von Montemurro und Maiorana (2007) und van Praagh u. a. (2009) beobachtet.

Die Ergebnisse der Versuche legen nahe, dass ein Bewuchs des Materials die Mineralisierung desselben intensiviert und gleichzeitig die Humifizierung günstig beeinflusst indem die mikrobielle Aktivität angeregt wird. Das heißt es kommt einerseits zu einem schnelleren Abbau der organischen Anteile, andererseits wird durch das Vorhandensein von Vegetation scheinbar auch mehr Kohlenstoff in stabilen organischen Verbindungen gebunden.

5 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, die Alterung von MBA-Material bei flächiger Lagerung und unterschiedlichen Bepflanzungen zu untersuchen. Diese Untersuchungen sollen weitere Erkenntnisse im Hinblick auf die Verwendung von MBA-Material als Rekultivierungssubstrat liefern.

Dazu wurden auf den Deponien Allerheiligen und St. Pölten zu Beginn einer Vegetationsperiode Versuchsflächen eingerichtet, auf denen frisches MBA-Material aufgebracht und beprobt wurde. Auf diesen Flächen wurden Felder mit Weiden und Pappel, Raps und einer handelsüblichen Grasmischung in 16-facher Wiederholung angelegt, sowie Flächen zur Beobachtung des Aufkommens von Spontanvegetation belassen. Von diesen Feldern wurden nach der ersten Vegetationsperiode abermals Proben genommen und das Pflanzenwachstum erhoben. Dieses war in St. Pölten auf den Feldern mit Gras gut, bei Raps und der Spontanvegetation mäßig. In Allerheiligen musste die ursprüngliche Versuchsanordnung aufgegeben werden und es wurde nur noch in Felder mit und ohne Bewuchs unterschieden. Weiden und Pappeln konnten sich auf beiden Deponien nur in sehr geringem Ausmaß etablieren. Bei dieser zweiten Probenahme wurde von allen Feldern zwei Probe genommen: eine aus dem oberflächennahen, aeroben Bereich und eine aus dem tieferen, anaeroben Bereich. Die Proben wurden im Labor aufbereitet und auf die Parameter Glühverlust, Leitfähigkeit, pH-Wert, Ammonium- und Nitrat-Stickstoff, pflanzenverfügbarer Phosphor, Atmungsaktivität und Huminstoffe analysiert.

Die Ergebnisse dieser Analysen wurden statistisch ausgewertet, indem die Proben nach Versuchsstandort, Probenahmezeitpunkt, Bewuchs und Probenahmetiefe gruppiert wurden. Aus dieser Einteilung ergaben sich für Allerheiligen acht und für St. Pölten zehn Varianten, deren Mittelwerte für die zuvor genannten Parameter mittels Varianzanalyse und t-Test auf Gleichheit getestet wurden. Es wurde der nach Welch modifizierte t-Test gerechnet (Rasch u. a., 2009) und es erfolgte eine Anpassung der p-Werte nach der Methode von Bonferroni-Holm (Holm, 1979).

Betrachtet man die Ergebnisse der Auswertung nach den Effekten die damit in dem untersuchten MBA-Material beschrieben werden können, zeigt sich, dass der dominierende Prozess die Auswaschung des Materials war und die Bepflanzung Einfluss auf jene Parameter hatte, die Mineralisierung und Humifizierung zeigen.

Bei den Parametern Leitfähigkeit und Ammonium-Stickstoff kam es über den Versuchszeitraum auf beiden Deponien zu einer signifikanten Abnahme, die im oberflächennahen Bereich ausgeprägter war. Dies ist durch die Auswaschung von Salzen durch Sickerwasser bzw. Nitrifikation zu erklären. In logischer Übereinstimmung damit wurde auf den Feldern in Allerheiligen ein Anstieg der Nitratwerte beobachtet, in St. Pölten wurden nur bei einzelnen Endproben erhöhte NO_3 -Gehalte gemessen, da das Nitrat bereits durch die Vegetation aufgenommen wurde

oder durch Denitrifikation und Auswaschung aus dem Material verschwunden war.

Beim pH-Wert konnte im oberflächennahen Bereich ein Rückgang auf ca. 7 von anfänglich etwas über 8 beobachtet werden. Im tiefen Bereich der Felder stieg der pH-Wert teilweise an oder blieb unverändert. Zu erklären wäre dies durch eine Umlagerung von Calciumhydrogencarbonat und eine Mobilisierung von Natriumcarbonat. (Thiry und Hees, 2008)

Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor war von Beginn bei dem Material von der Deponie Allerheiligen wesentlich höher als bei jenem aus St. Pölten, da bei ersterem Klärschlamm im MBA-Prozess beigemischt wird. Bei den Proben aus Allerheiligen wurde zu Versuchsende durch den CAL-Aufschluss mehr Phosphor erfasst als Beginn. In St. Pölten wurde ein Rückgang des pflanzenverfügbaren Phosphors beobachtet, welcher bei den Proben aus dem anaeroben Bereich stärker war. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass es durch den Transport von Calciumhydrogencarbonat aus den oberen in die unteren Schichten und daraus einem Anstieg von Ca^{2+} -Ionen zu einer stärkeren Ausfällung des Phosphors als schwer löslichem Apatit kommt. (Finck, 1976)

Anhand des Glühverlustes ist zu erkennen, dass es auf den Flächen mit Vegetation zu einer stärkeren Mineralisierung der organischen Anteile kommt.

Die Atmungsaktivität zeigt, dass nach einem halben Jahr der mikrobielle Abbau der Organik im oberflächennahen Bereich weit fortgeschritten ist. Im tiefen, anaeroben Bereich bestand auch zu Versuchsende noch großer Sauerstoffbedarf.

Die Felder mit Bewuchs zeigten nahe der Oberfläche eine deutlich höhere Humifizierungsrate als die anderen Varianten.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass eine Vegetationsdecke bei Verwendung von MBA-Material als Substrat einer Rekultivierungsschicht einen positiven Einfluss auf dieses hat. Die Mineralisierung geht schneller voran, der Aufbau stabiler organischer Verbindungen wird gefördert. Nahe der Oberfläche war die mikrobielle Aktivität in dem Material zu Ende der Untersuchungen auf einem Niveau, das den natürlichen Umsatzraten eines Bodens entspricht. Die Stabilisierung kann damit in diesem Bereich als weitgehend abgeschlossen betrachtet werden.

Auswaschungsvorgänge dominierten im beobachteten halben Jahr die Materialveränderungen. Eine Beeinflussung dieser Prozesse durch den Bewuchs konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [Adani u. a. 2009] ADANI, F. ; TAMBONE, F. ; GENEVINI, P.: Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. In: *Waste Management* 29 (2009), Nr. 1, S. 174 – 179
- [Ayuso u. a. 1996] AYUSO, Miguel ; HERNANDEZ, Teresa ; GARCIA, Carlos ; PASCUAL, Jose A.: A Comparative Study of the Effect on Barley Growth of Humic Substances Extracted from Municipal Wastes and from Traditional Organic Materials. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 72 (1996), S. 493–500
- [Binner und Zach 1999] BINNER, E. ; ZACH, A.: Biological reactivity of residual wastes and dependence on the duration of pretreatment. In: *Waste Management & Research* 17 (1999), S. 543 – 554
- [BMfLFUW 2001] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung)*. 2001
- [BMfLFUW 2008] BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008)*. 2008
- [Celardin 2003] CELARDIN, Fredi: Evaluation of soil P-test values of canton Geneva/Switzerland in relation to P loss risks. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166 (2003), S. 416–421
- [Danneberg und Schaffer 1974] DANNEBERG, O. H. ; SCHAFFER, K.: Eine einfache kolometrische Analyse des Huminstoffsystems. In: *Die Bodenkultur, Journal für landwirtschaftliche Forschung* 25 (1974), Nr. 4, S. 360–368
- [Delgado und Scalenghe 2008] DELGADO, Antonio ; SCALENGHE, Riccardo: Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171 (2008), S. 552–575
- [Eichler-Löbermann u. a. 2007] EICHLER-LÖBERMANN, B. ; KÖHNE, S. ; KÖPPEN, D.: Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170 (2007), S. 623–628

- [Engelstad und Terman 1980] ENGELSTAD, O.P. ; TERMAN, G.L.: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Kap. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizer, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 1980
- [Erhart u. a. 2007] ERHART, Eva ; FEICHTINGER, Franz ; ; HARTL, Wilfried: Nitrogen leaching losses under crops fertilized with biowaste compost compared with mineral fertilization. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170 (2007), S. 608–614
- [Faraway 2002] FARAWAY, J.J.: *Practical Regression and Anova using R*. URL <http://cran.r-project.org/other-docs.html>, 2002
- [Finck 1976] FINCK, A.: *Pflanzenernährung in Stichworten*. 3. Ausgabe. Kiel : Hirt, 1976
- [Gerzabek u. a. 1993] GERZABEK, M.H. ; DANNEBERG, O. ; KANDELER, E.: Bestimmung des Humifizierungsgrades. In: *Bodenbiologische Arbeitsmethoden* (1993), S. 107–109
- [Gisi 1997] GISI, U.: *Bodenökologie*. Stuttgart : Thieme, 1997
- [Gomiscek 1999] GOMISCEK, Tanja: *Rekultivierung von Deponien mit abfallbürtigen Substraten und Energiepflanzen in Hinblick auf Wasserhaushalt und Biomasseertrag*, Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation, 1999
- [Haug 1993] HAUG, R. T.: *The practical handbook of compost engineering*. CRC Press, 1993
- [Hoinkis und Lindner 2007] HOINKIS, J. ; LINDNER, E.: *Chemie für Ingenieure*. Weinheim : Wiley-VCH, 2007
- [Holm 1979] HOLM, S.: A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. In: *Scandinavian Journal of Statistics* 6 (1979), Nr. 2, S. 65–70
- [Huber-Humer 2004] HUBER-HUMER, M.: *Abatement of Landfill Methane Emissions by Microbial Oxidation in Biocovers made of Compost*, Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation, 2004
- [Iyamuremye u. a. 1996] IYAMUREMYE, F. ; DICK, R. P. ; BAHAM, J.: Organic Amendments and Phosphorus Dynamics: II. Distribution of Soil Phosphorus Fractions. In: *Soil Science* 161 (1996), S. 436–443
- [Krogmann und Woyzechowski 2000] KROGMANN, Uta ; WOYCZECHOWSKI, Heike: Selected characteristics of leachate, condensate and runoff released during composting of biogenic waste. In: *Waste Management & Research* 18 (2000), S. 235–248
- [Kuntze u. a. 1994] KUNTZE, H. ; ROESCHMANN, G. ; SCHWERDTFEGGER, G.: *Bodenkunde*. Stuttgart : Ulmer, 1994
- [Lashermes u. a. 2010] LASHERMES, G. ; NICOLARDOT, B. ; PARNAUDEAU, V. ; THURIÈS, L. ; CHAUSSOD, R. ; GUILLOTIN, M.L. ; LINÈRES, M. ; MARY, B. ; METZGER, L. ; MORVAN, T. ; TRICAUD, A. ; VILLETTE, C. ; HOUOT, S.: Typology of exogenous organic matters based on chemical

- and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. In: *Bioresource Technology* 101 (2010), Nr. 1, S. 157 – 164
- [Lechner 2004] LECHNER, P. (Hrsg.): *Kommunale Abfallentsorgung*. Wien : Facultas UTB, 2004
- [Linert 1997] LINERT, U.: *Handbuch Deponiewirtschaft zum Seminar 8. - 9. September*. Kap. Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen - Umweltverträglichkeitsprüfung und Möglichkeiten der Optimierung. Wien, 1997
- [Mattingly 1956] MATTINGLY, G. E. G.: Studies on Composts Prepared from Waste Materials III – Nitrification in Soil. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 7 (1956), S. 601–605
- [Montemurro und Maiorana 2007] MONTEMURRO, F. ; MAIORANA, M.: Nitrogen utilization, yield, quality and soil properties in a sugarbeet crop amended with municipal solid waste compost. In: *Compost Science and Utilization* 15 (2007), Nr. 2, S. 84–92
- [Mpenyana u. a. 2008] MPENYANA, L. ; COETZEE, M.A.A. ; SCHWARZER, S.: Removal of ammonia from landfill leachate in a two-stage biofiltration process. In: *J Biol Sci* 8 (2008), S. 368–373
- [Neubauer und Öhlinger 2006] NEUBAUER, C. ; ÖHLINGER, A.: *Ist-Stand der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) in Österreich*. Wien : Umweltbundesamt, 2006
- [OENORMS2023 1993] OENORM S 2023: *Gütekriterien für Komposte aus biogenen Abfällen*. Österreichisches Normungsinstitut, 1993
- [OENORMS2027-1 2004] OENORM S 2027-1: *Stabilitätsparameter zur Beurteilung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen - Teil 1: Atmungsaktivität (AT4)*. Österreichisches Normungsinstitut, 2004
- [van Praagh u. a. 2009] PRAAGH, M. van ; HEERENKLAGE, J. ; SMIDT, E. ; MODIN, H. ; STEGMANN, R. ; PERSSON, K. M.: Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes. In: *Waste Management* 29 (2009), Nr. 2, S. 859–868
- [R Development Core Team 2009] R DEVELOPMENT CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing (Veranst.), 2009. – URL <http://www.R-project.org>
- [Rasch u. a. 2009] RASCH, D. ; KUBINGER, K. D. ; MODER, K.: The two-sample t test: pre-testing its assumptions does not pay off. In: *Statistical Papers* (2009), S. 1–13
- [Rasch u. a. 2007] RASCH, D. ; VERDOOREN, L. R. ; GOWERS, J. I.: *Design and Analysis of Experiments and Surveys*. zweite Auflage. München, Wien : R. Oldenbourg, 2007
- [Rice 1989] RICE, W. R.: Analyzing tables of statistical tests. In: *Evolution* 43 (1989), Nr. 1, S. 223–225
- [Sachs und Hedderich 2009] SACHS, L. ; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik*. Heidelberg : Springer, 2009

- [Schlegel 1992] SCHLEGEL, H.: *Allgemeine Mikrobiologie*. Stuttgart : Thieme, 1992
- [Tambone u. a. 2007] TAMBONE, F. ; GENEVINI, P. ; ADANI, F.: The effects of short-term compost application on soil chemical properties and on nutritional status of maize plant. In: *Compost Science and Utilization* 15 (2007), Nr. 3, S. 176–183
- [Tan 2003] TAN, K.H.: *Humic Matter in Soil and the Environment – Principles and Controversies*. New York, Basel : Marcel Dekker, 2003
- [Thiry und Hees 2008] THIRY, Y. ; HEES, M. V.: Evolution of pH, organic matter and 226 radium/calcium partitioning in U-mining debris following revegetation with pine trees. In: *Science of the total Environment* 393 (2008), S. 111–117
- [Wickham 2009] WICKHAM, H.: *ggplot2: An implementation of the Grammar of Graphics*, 2009. – URL <http://CRAN.R-project.org/package=ggplot2>. – R package version 0.8.3
- [Yu und Huang 2008] YU, H. ; HUANG, G. H.: Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. In: *Bioresource Technology* 100 (2008), S. 2005–2011
- [ZAMG 2000] ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK: *Klimadaten von Österreich 1971 – 2000*. 2000

A Ergebnisse

Tabelle A.1: Messergebnisse aller Proben für alle untersuchten Parameter

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
1A/W1	1AW	23,6	2,6	8,4	650	150	816	8,4	3,6	10,4
1A/W2	1AW	28,2	2,9	7,9	750	80	1469	9,6	3,0	12,8
1A/W3	1AW	26,0	2,5	8,2	750	40	994	7,3	4,4	15,1
1A/W4	1AW	27,1	3,7	7,5	300	60	963	8,2	2,7	10,6
1A/W5	1AW	21,2	2,0	8,2	750	60	757	7,2	1,6	5,6
1A/W6	1AW	21,2	3,1	8,3	800	0	1034	8,7	2,7	9,0
1A/W8	1AW	21,6	1,9	8,1	700	30	823	7,4	2,4	9,8
1A/W10	1AW	23,3	2,2	8,7	1050	0	1216	8,4	2,5	10,7
1A/W12	1AW	26,1	2,7	8,4	1350	10	1053	6,7	4,6	17,7
1A/W13	1AW	24,2	2,8	8,2	650	20	926	7,0	4,4	14,3
1A/W14	1AW	24,3	3,0	8,0	950	30	1168	6,9	3,2	13,2
1A/W15	1AW	24,7	2,7	8,4	1080	0	1186	7,1	3,0	11,9
1A/G4	1ARSG	27,8	3,7	8,3	1000	10	1311	6,7	3,4	11,8
1A/G7	1ARSG	26,5	2,8	8,4	1550	10	839	5,7	1,8	6,1
1A/R2	1ARSG	32,7	3,0	8,1	850	0	1254	5,4	6,8	22,9
1A/G10	1ARSG	20,8	2,2	7,7	450	200	624	6,7	3,0	10,7
1A/G13	1ARSG	22,5	2,3	8,4	900	40	539	6,4	3,3	14,5
1A/G15	1ARSG	26,9	3,0	8,4	1100	50	955	6,4	2,8	10,4
1A/S2	1ARSG	25,9	2,6	8,6	1250	20	844	6,4	1,5	5,8
1A/S9	1ARSG	23,5	2,5	7,7	600	30	620	6,0	3,2	13,6
1A/S12	1ARSG	24,4	2,5	8,5	1100	20	947	6,7	2,5	8,4
1A/S15	1ARSG	24,8	2,4	8,3	850	50	539	6,1	3,1	10,5
1A/R5	1ARSG	29,0	2,5	8,5	1150	10	783	5,5	4,1	14,0
1A/R8	1ARSG	28,4	2,2	8,5	1225	10	727	5,7	2,5	8,7
1E/R1a	1ERa	21,3	0,7	7,5	10	20	768	6,3	1,5	7,2
1E/R2a	1ERa	22,5	1,9	7,7	10	250	1012	5,9	1,6	7,1
1E/R3a	1ERa	16,4	1,2	7,4	10	50	745	8,0	1,6	9,6
1E/R4a	1ERa	20,7	1,1	7,5	10	20	610	6,7	1,6	7,9
1E/R5a	1ERa	15,8	0,5	7,8	15	25	714	8,0	1,8	11,2

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
1E/R6a	1ERa	16,5	0,5	7,9	10	60	637	8,1	1,3	8,1
1E/R7a	1ERa	20,8	1,0	7,8	15	10	634	6,3	2,0	9,4
1E/R8a	1ERa	22,1	0,5	7,5	10	20	746	6,2	2,1	9,3
1E/R9a	1ERa	19,9	0,7	7,5	10	20	625	7,0	1,7	8,6
1E/R10a	1ERa	19,8	0,5	7,8	10	20	663	6,6	2,0	10,1
1E/R11a	1ERa	20,5	0,8	7,8	10	20	687	6,7	1,7	8,4
1E/R12a	1ERa	22,7	1,0	7,5	20	10	728	6,4	1,8	7,9
1E/R13a	1ERa	19,4	0,6	7,8	15	25	726	6,5	1,5	7,6
1E/R14a	1ERa	21,4	0,4	7,8	10	10	726	7,0	1,4	6,7
1E/R15a	1ERa	19,9	1,2	7,4	15	30	673	7,0	2,5	12,6
1E/R16a	1ERa	20,2	0,7	7,7	25	10	675	6,7	2,5	12,6
1E/R1b	1ERb	17,8	1,6	8,8	350	25	696	6,8		
1E/R2b	1ERb	19,4	2,2	8,4	200	300	777	7,0		
1E/R3b	1ERb	20,1	2,3	8,7	400	50	816	7,3		
1E/R4b	1ERb	23,1	2,6	8,9	450	10	475	6,3		
1E/R5b	1ERb	21,6	1,9	8,6	200	25	460	6,4		
1E/R6b	1ERb	22,1	2,2	8,8	400	70	932	6,3		
1E/R7b	1ERb	20,6	2,0	8,9	500	20	635	6,6		
1E/R8b	1ERb	17,3	1,4	8,9	400	10	711	7,3		
1E/R9b	1ERb	20,7	2,2	8,4	150	25	656	6,2		
1E/R10b	1ERb	18,8	2,0	8,5	350	40	445	6,9		
1E/R11b	1ERb	21,8	2,0	8,8	250	10	387	6,1		
1E/R12b	1ERb	19,6	1,6	8,7	300	20	534	6,2		
1E/R13b	1ERb	20,7	1,9	8,9	500	10	586	6,3		
1E/R14b	1ERb	19,7	1,8	8,7	320	0	612	6,1		
1E/R15b	1ERb	19,5	2,1	8,7	300	25	606	6,1		
1E/R16b	1ERb	19,8	1,9	8,2	150	10	764	6,4		
1E/S1a	1ESa	19,6	0,8	7,6	15	20	783	6,8	1,8	9,1
1E/S2a	1ESa	20,2	0,6	7,8	10	0	957	6,7	1,3	6,6
1E/S3a	1ESa	19,6	1,4	7,6	15	0	730	6,8	1,6	8,3
1E/S4a	1ESa	16,6	1,0	7,7	10	0	575	7,5	1,5	9,0
1E/S5a	1ESa	18,8	0,7	7,4	10	5	701	7,2	1,4	7,5
1E/S6a	1ESa	18,7	0,6	7,8	10	0	620	6,9	1,1	5,8
1E/S7a	1ESa	20,4	0,6	7,6	10	5	780	6,8	1,5	7,4
1E/S8a	1ESa	20,7	0,5	7,8	10	0	648	6,7	1,4	6,9
1E/S9a	1ESa	20,9	0,7	7,7	10	10	568	6,0	1,2	6,0
1E/S10a	1ESa	18,0	0,4	7,9	10	0	528	6,9	1,3	7,2
1E/S11a	1ESa	20,1	0,5	7,7	10	25	563	6,2	1,6	7,9

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
1E/S12a	1ESa	20,9	0,5	7,8	10	40	524	6,3	1,5	7,0
1E/S13a	1ESa	20,8	0,5	7,3	10	15	892	5,8	1,3	6,3
1E/S14a	1ESa	18,1	0,5	7,9	10	10	520	6,6	1,5	8,3
1E/S15a	1ESa	19,4	0,7	7,6	10	25	677	6,4	1,5	7,9
1E/S16a	1ESa	21,0	1,0	7,7	10	20	610	6,0	2,1	10,2
1E/S1b	1ESb	20,8	2,0	9,0	600	25	525	7,2	3,0	14,4
1E/S2b	1ESb	19,9	1,8	9,0	650	0	557	7,5		
1E/S3b	1ESb	24,4	2,1	8,8	450	25	725	6,3		
1E/S4b	1ESb	21,5	1,9	8,5	250	40	548	7,9	3,0	14,0
1E/S5b	1ESb	23,7	2,1	8,7	450	10	679	8,2	3,1	12,9
1E/S6b	1ESb	21,4	1,8	8,9	500	0	766	7,2		
1E/S7b	1ESb	21,9	1,9	8,7	650	0	777	7,4		
1E/S8b	1ESb	22,3	2,1	8,5	250	0	656	7,9	3,2	14,3
1E/S9b	1ESb	23,0	2,0	8,8	400	10	623	8,0	2,8	12,2
1E/S10b	1ESb	23,0	1,7	8,6	250	15	618	6,8	2,8	12,4
1E/S11b	1ESb	21,4	1,9	8,5	450	15	573	6,9		
1E/S12b	1ESb	19,9	1,5	8,9	400	0	670	7,3		
1E/S13b	1ESb	23,9	1,9	8,9	500	0	690	7,7	4,0	16,5
1E/S14b	1ESb	21,1	1,5	8,6	400	5	609	7,3	2,6	12,2
1E/S15b	1ESb	20,8	2,0	8,5	250	5	652	6,9		
1E/S16b	1ESb	19,2	2,0	8,6	300	10	719		2,9	14,9
1E/G1a	1EGa	16,2	0,9	7,6	0	0	660	8,7	1,5	9,5
1E/G2a	1EGa	23,4	0,7	7,8	0	0	757	8,0	2,0	8,4
1E/G3a	1EGa	18,0	0,7	7,8	0	0	842	9,2	1,6	9,1
1E/G4a	1EGa	19,3	1,2	7,6	0	0	695	8,6	1,7	8,7
1E/G5a	1EGa	18,3	0,4	7,8	10	10	680	6,8	2,0	11,0
1E/G6a	1EGa	16,8	0,5	7,7	10	15	546	8,7	1,8	10,9
1E/G7a	1EGa	17,5	0,8	7,7	0	0	605	8,9	1,4	8,2
1E/G8a	1EGa	21,3	1,6	7,5	0	0	677	7,9	1,8	8,3
1E/G9a	1EGa	17,7	0,8	7,8	10	5	631	6,5	1,1	6,2
1E/G10a	1EGa	17,2	0,5	7,5	10	50	620	7,0	1,3	7,7
1E/G11a	1EGa	20,5	0,8	7,4	10	30	687	7,8	2,1	10,0
1E/G12a	1EGa	16,8	0,5	7,4	10	15	751	7,9	1,6	9,7
1E/G13a	1EGa	16,4	0,6	7,6	10	50	604	7,0	1,6	9,5
1E/G14a	1EGa	19,6	0,8	7,5	10	10	591	8,1	1,3	6,4
1E/G15a	1EGa	18,9	0,9	7,5	10	50	643	6,4	1,9	9,9
1E/G16a	1EGa	15,9	0,6	7,4	15	20	856	6,6	1,9	12,1
1E/G1b	1EGb	23,5	2,3	8,5	450	10	538	6,4	3,6	15,4

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
1E/G2b	1EGb	22,7	2,3	8,5	300	20	571	6,7	3,1	13,5
1E/G3b	1EGb	21,7	2,5	8,5	200	100	479	7,5	2,9	13,4
1E/G4b	1EGb	24,9	2,8	8,7	400	20	467	5,2	2,7	10,9
1E/G5b	1EGb	23,8	2,5	8,5	350	10	402	6,7	3,4	14,3
1E/G6b	1EGb	23,8	2,4	8,7	350	10	680	6,6	3,0	12,6
1E/G7b	1EGb	21,3	2,2	8,8	400	15	654	6,7	3,0	14,3
1E/G8b	1EGb	22,0	2,3	8,8	450	5	553	6,6	3,2	14,8
1E/G9b	1EGb	22,1	1,9	8,9	400	10	611	5,4	2,9	13,3
1E/G10b	1EGb	22,4	2,0	8,6	200	20	625	6,2	3,0	13,3
1E/G11b	1EGb	21,5	2,2	8,4	250	50	503	5,8	2,8	12,8
1E/G12b	1EGb	22,0	2,0	9,0	300	15	572	7,0	3,2	14,7
1E/G13b	1EGb	21,2	2,2	8,7	300	10	617	6,6	3,5	16,4
1E/G14b	1EGb	22,9	2,3	8,9	450	10	635	6,3	4,0	17,4
1E/G15b	1EGb	21,1	2,2	8,5	150	20	567	7,5	3,3	15,6
1E/G16b	1EGb	20,3	2,1	8,7	350	10	647	6,4	3,8	18,5
1E/W1a	1EWa	19,5	0,7	6,5	0	5	917	8,4	1,5	7,4
1E/W2a	1EWa	16,9	1,2	6,8	0	5	831	9,1	1,8	10,5
1E/W3a	1EWa	18,5	0,6	7,6	10	40	817	8,3	1,3	7,2
1E/W4a	1EWa	18,1	1,0	7,4	0	5	520	8,3	1,2	6,7
1E/W5a	1EWa	19,9	0,5	7,4	10	60	469	7,7	1,5	7,7
1E/W6a	1EWa	16,4	0,7	7,3	10	25	767	9,2	1,3	8,1
1E/W8a	1EWa	16,5	0,4	7,3	10	25	656	9,8	1,0	6,2
1E/W10a	1EWa	20,6	2,3	7,1	10	25	874	8,6	1,4	7,0
1E/W12a	1EWa	17,8	0,7	7,7	0	5	639	8,1	1,3	5,4
1E/W13a	1EWa	19,3	2,1	7,0	0	5	743	8,0	1,2	6,4
1E/W14a	1EWa	21,7	0,6	7,4	10	55	597	8,0	1,2	7,5
1E/W15a	1EWa	20,5	0,8	6,8	0	0	723	8,0	1,2	5,9
1E/W1b	1EWb	17,3	1,3	8,5	250	10	803			
1E/W2b	1EWb	19,8	1,2	7,7	50	30	1067	7,6		
1E/W3b	1EWb	14,0	1,0	8,1	100	15	489			
1E/W4b	1EWb	16,2	1,9	7,5	20	100	1177	8,4		
1E/W5b	1EWb	23,3	2,0	8,2	150	50	593			
1E/W6b	1EWb	22,3	1,6	8,6	200	15	757			
1E/W8b	1EWb	17,9	1,1	8,6	200	30	852			
1E/W10b	1EWb	19,5	1,6	8,4	100	40	721			
1E/W12b	1EWb	19,8	1,7	8,6	200	70	915			
1E/W13b	1EWb	18,9	1,7	8,7			1071			
1E/W14b	1EWb	19,3	1,9	8,6	250	30	765			

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
1E/W15b	1EWb	23,3	3,3	8,6	50	450	87			
2A/W2	2AW	38,0	3,5	8,3	3100	0	2856	9,7	15,0	37,4
2A/W3	2AW	37,8	4,8	8,1	3100	30	2847	9,0	14,2	36,0
2A/W4	2AW	37,5	4,2	8,2	3000	0	2259	7,8	16,5	41,9
2A/W6	2AW	38,2	3,9	8,3	3500	10	2946	9,2	18,1	46,8
2A/W7	2AW	36,5	4,2	8,1	3000	0	2496	6,7	18,2	44,0
2A/W8	2AW	39,5	3,2	8,4	3250	0	2637	7,9	16,2	39,5
2A/W10	2AW	35,5	3,7	8,1	3150	0	2323	7,6	12,4	31,4
2A/W11	2AW	37,1	3,8	8,3	3350	0	2623	7,5	22,4	55,6
2A/W12	2AW	34,3	2,7	8,1	3650	0	2328	8,6	14,6	38,6
2A/W14	2AW	39,3	4,2	8,2	4050	0	2597	8,7	13,3	31,2
2A/W15	2AW	36,6	3,6	8,1	3750	0	2426	9,1	13,0	32,0
2A/W16	2AW	39,1	4,2	8,1	3950	0	2451	8,1	13,6	32,4
2A/G3	2A	32,0	4,1	7,8	2550	0	1110	6,5	36,3	113,4
2A/G7	2A	33,7	4,0	8,4	1550	5	1389	9,1	11,7	34,6
2A/G10	2A	35,1	4,1	8,1	1900	20	1436	9,5	13,7	38,9
2A/G14	2A	36,9	3,7	8,0	1850	0	1740	6,9	16,2	43,9
2A/R5	2A	40	4,1	8,3	1700	20	1499	10,3	11,2	28,0
2A/R10	2A	35,5	3,9	8,2	2000	30	1485	11,3	12,4	35,3
2A/R13	2A	37,4	4,2	8,0	1600	20	1581	7,8	18,7	50,1
2A/R14	2A	37,9	4,1	8,0	2150	0	1480	8,8	18,8	49,7
2A/S2	2A	32,2	3,8	8,4	1300	30	1380	8,6	12,1	37,6
2A/S6	2A	37,6	4,3	8,2	1700	10	1509	9,2	16,4	43,5
2A/S11	2A	35,4	4,2	8,2	1700	40	1175	9,2	12,6	35,6
2A/S16	2A	36,9	3,9	8,0	3050	20	1708	7,6	20	54,3
2E/G1a	2Eav	29,1	1,1	7,0	15	250	1570	11,4	1,2	4,0
2E/G2a	2Eav	29,2	2,3	6,9	750	20	1917	11,1	0,9	3,2
2E/G4a	2Eav	28,2	0,5	8,5	20	100	2209	6,3	1,0	3,6
2E/G6a	2Eav	28,7	1,3	7,5	20	350	2077	8,3	1,0	3,5
2E/G7a	2Eav	29,2	1,5	7,5	20	400	2209	9,8	1,1	3,6
2E/G9a	2Eav	31,6	2,8	7,3	30	5	1508	11,4	2,9	9,2
2E/G10a	2Eav	29,1	0,9	8,4	150	20	1553	12,8	1,2	4,0
2E/G13a	2Eav	30,4	2,1	7,6	50	400	1802	9,6	1,5	5,0
2E/R5a	2Eav	27,9	1,4	7,7	20	300	1753		1,0	3,7
2E/R10a	2Eav	34,3	1,5	7,2	50	50	1437		3,0	8,8
2E/G1b	2Ebv	26,2	2,2	8,3	40	750	2034		2,2	8,3
2E/G2b	2Ebv	33,5	3,7	7,8	1200	15	2298		8,6	22,5
2E/G4b	2Ebv	22,5	1,7	7,2	350	150	1875	13,5	2,4	10,5

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
2E/G6b	2Ebv	31,3	2,7	7,9	750	300	1867	11,1	2,8	8,9
2E/G7b	2Ebv	33,1	3,3	8,4	1400	5	1863	13,8	3,9	11,9
2E/G9b	2Ebv	29,4	2,8	7,8	400	200	1749	9,6	2,3	7,9
2E/G10b	2Ebv	30,4	3,3	8,0	1200	40	1963		3,3	10,7
2E/G13b	2Ebv	29,2	3,1	7,5	1400	10	2255		8,9	30,3
2E/R5b	2Ebv	27,3	2,4	8,1	250	150	1962		1,7	6,4
2E/R10b	2Ebv	32,4	3,1	8,7	1250	90	1813		3,3	10,1
2E/G3a	2Eauv	33,8	1,3	7,2	15	50	1739		3,9	11,5
2E/G14a	2Eauv	32,2	2,0	7,8	160	90	2287		2,0	6,2
2E/S2a	2Eauv	32,6	1,6	8,1	15	650	1792		1,6	5,0
2E/S6a	2Eauv	30,5	3,0	7,6	30	200	1700		1,8	5,8
2E/S11a	2Eauv	28,2	1,0	7,2	15	300	1544		1,2	4,3
2E/S16a	2Eauv	32,2	1,4	7,3	30	300	1886		1,9	5,9
2E/R13a	2Eauv	35,2	2,7	7,4	200	10	2007		2,7	7,6
2E/R14a	2Eauv			7,5	70	400			2,0	
2E/G3b	2EbuV	30,4	2,6	7,4	1300	5	1814	9,7	9,6	31,7
2E/G14b	2EbuV	30	2,4	7,9	1200	20	1884	10,4	3,4	11,3
2E/S2b	2EbuV	29,0	2,7	8,4	1300	60	1740		3,1	10,7
2E/S6b	2EbuV	29,1	3,5	8,1	1100	15	1854		3,0	10,3
2E/S11b	2EbuV	31,5	3,3	8,3	1500	80	1779		3,1	9,7
2E/S16b	2EbuV	31,0	3,1	8,3	5	1800	2262		5,8	18,7
2E/R13b	2EbuV	32,5	3,0	8,6	1900	20	1846		4,6	14,2
2E/R14b	2EbuV	34,7	3,1	8,7	1650	30	2138		4,7	13,5
2E/W2a	2EWa	27,9	2,2	7,2	15	120	1924			
2E/W3a	2EWa	30,2	1,1	7,7	20	150	1820			
2E/W4a	2EWa	27,0	1,2	7,6	20	140	2307			
2E/W6a	2EWa	30,5	1,6	7,6	20	350	2043			
2E/W7a	2EWa	32,5	3,0	7,4	20	70	2153			
2E/W8a	2EWa	27,4	0,5	7,7	15	30	2182			
2E/W10a	2EWa	30	1,3	7,6	20	0	1917			
2E/W11a	2EWa	29,9	1,4	7,7	15	10	2096			
2E/W12a	2EWa	30,9	1,0	7,9	30	0	1668	7,4		
2E/W14a	2EWa	29,9	2,1	8,5	20	70	1874	9,6		
2E/W15a	2EWa	30,4	1,4	7,5	20	60	1648	11,0		
2E/W16a	2EWa	28,8	0,7	7,6	15	30	1752	10,7		
2E/W2b	2EWb	35,7	3,6	8,9	2800	0	2885	12,7		
2E/W3b	2EWb	25,0	2,9	8,5	2750	5	1871	13,2		
2E/W4b	2EWb	32,6	3,1	8,5	1300	10	2039	11,1		

Fortsetzung auf der folgenden Seite...

Tabelle A.1 – Fortsetzung

Feld	Variante	GV % TS	Lf $\frac{\text{mS}}{\text{cm}}$	pH	NH ₄ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	NO ₃ -N $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	P _{cal} $\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}}$	HS % oTS	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g TS}}$	AT ₄ $\frac{\text{mg}}{\text{g oTS}}$
2E/W6b	2EWb	33,2	3,1	8,7	2450	0	2529			
2E/W7b	2EWb	33,0	3,6	8,6	1900	45	2235	11,7		
2E/W8b	2EWb	32,9	3,0	8,9	2100	0	2482	10,7		
2E/W10b	2EWb	31,7	2,8	8,9	1400	0	2428	9,8		
2E/W11b	2EWb	33,5	1,4	8,8	1550	0	2858	10,1		
2E/W12b	2EWb	33,3	3,2	8,8	2300	0	2774			
2E/W14b	2EWb	33,0	3,1	8,8	2100	0	2237			
2E/W15b	2EWb	30,9	3,0	8,8	2100	0	2527			
2E/W16b	2EWb	32,1	2,9	8,8	2400	0	2512			

B Quellcodes

Listing B.1: Varianzanalyse in R

```
#!/usr/bin/Rscript

library(Hmisc)
source("power.anova.test.unbalanced.R") # Power für gewichtete ANOVA
  berechnen: http://tolstoy.newcastle.edu.au/R/e4/help/08/02/4382.html
# CSV-Datei einlesen:
# fehlende Messwerte stehen nicht im File, d.h. *nichts* zwischen zwei ;;
d <- read.table(file("probenahmeplan.csv"), encoding="utf-8", header =
  TRUE, row.names = 1, sep=";")

parameter <- list(
  list(p="GV", lab="Glühverlust", digits=1),
  list(p="HS", lab="Huminsäuren", digits=1),
  list(p="Lf", lab="Leitfähigkeit", digits=1),
  list(p="pH", lab="pH-Wert", digits=1),
  list(p="AT4_TM", lab="Atmungsaktivität_□(TS)", digits=1),
  list(p="AT4_oTM", lab="Atmungsaktivität_□(org.□TS)", digits=1),
  list(p="NO3", lab="Nitrat", digits=0),
  list(p="NH4", lab="Ammonium", digits=0),
  list(p="Pcal", lab="pflanzenverfügbarer_□Phosphor", digits=0)
)

testsets <- list(
  stp.vs.ahg = list(factor=c("1AW", "1ARSG", "2AW", "2A")),
  stp.alle = list(factor=c("1AW", "1ARSG", "1EWa", "1EWb", "1ERa", "1ERb",
    "1ESa", "1ESb", "1EGa", "1EGb")),
  ahg.alle = list(factor=c("2AW", "2A", "2EWa", "2EWb", "2Eav", "2Ebv",
    "2Eauv", "2EbuV"))
)

shapedata <- function(set,par) {
  data <- subset(d, factor %in% set$factor)
  data <- data[! is.na(data[[par$p]]), ] # Beobachtungen entfernen,
  die keinen Wert für den aktuellen Parameter haben
  data[] <- lapply(data, function(x) if (is.factor(x)) factor(x) else x)
  # levels bereinigen
  sname <-<- paste(set$factor, collapse="-")
  if(! any(as.logical(data[[par$p]]), na.rm=TRUE) || nlevels(data$factor)
    < 2) {
    return(FALSE)
  }
}
```

```

    return(data)
}

my.anova <- function(d.par, par) {
  if(typeof(d.par) != "list") {
    out.anova <- rbind(out.anova,
      data.frame(list(p.F="", power=""), row.names = sname))
    return()
  }
  anova.result <- anova(lm(as.formula(paste(par$p, "_~_factor")), data=d
    .par))
  anova.p <- anova.result[["Pr(>F)"]][1]

  means <- tapply(d.par[[par$p]], d.par$factor, mean)
  weights <- tapply(d.par[[par$p]], d.par$factor, length)
  within.var.anovaError <- anova.result[["Sum Sq"]][2]/anova.result[["Df
    "]] [2]
  power <- power.anova.test.unbalanced(within.var=within.var.anovaError,
    means=means, weights=weights)
  anovaP_value.power <- data.frame(list(
    p.F = paste(formatC(anova.p, 3, format="f", decimal.mark=","),
      printbool(anova.p > 0.05)),
    power = formatC(power, 2, format="f", decimal.mark=","),
    row.names = sname)
  out.anova <- rbind(out.anova, anovaP_value.power)
}

partests <- function(par) {
  out.anova <- data.frame()
  # St. Pölten vs. Allerheiligen
  d.par <- shapedata(testsets$stp.vs.ahg, par)
  my.anova(d.par, par)
  # St. Pölten
  d.par <- shapedata(testsets$ahg.alle, par)
  my.anova(d.par, par)
  # Allerheiligen
  d.par <- shapedata(testsets$stp.alle, par)
  my.anova(d.par, par)
  latex(out.anova,
    file=paste("tex/", par$p, "_anova.tex", sep=""),
    rgroup=c("St. Pölten vs. Allerheiligen", "Allerheiligen", "St. Pölten"),
    n.rgroup=c(1, 1, 1), rgroup.just="l",
    colheads=c("Pr(>F)", "Güte"),
    rowlabel="", ctable=TRUE, where='!htbp', na.blank=TRUE, caption.
      loc="bottom",
    caption=paste(par$lab, "\\textendash\\, Ergebnisse der
      Varianzanalyse und zugehörige Güte,  $\alpha=0,05$ ", sep=""),
    label=paste("tab:", par$p, "_anova", sep="")
  )
}

```

```
# Bool'sche Werte in hübsche LaTeX-Zeichen übersetzen
printbool <- function(bool) {
  sapply(bool, function(x) {ifelse(x, "$\checkmark$", "$\times$")}) }

pt <- lapply(parameter, partests)
```

Listing B.2: Berechnung der Güte einer gewichteten Varianzanalyse

```
power.anova.test.unbalanced <- function(within.var, means, weights, alpha
=0.05) {
  weighted.means = data.frame(Mean = means, n = weights)
  N <- sum(weighted.means$n)
  J <- length(means)
  # Quantile of the cutoff point in the central F
  central.quart <- qf(alpha, J - 1, N - J, lower.tail = FALSE)

  weighted.mean <- weighted.mean(weighted.means$Mean, weighted.means$n)

  # Noncentrality parameter for unbalanced ANOVA
  noncentral.param <- sum(weighted.means$n * (weighted.means$Mean -
  weighted.mean) ^ 2) / within.var

  # Probability of central quantile in noncentral distribution
  noncentral.p <- pf(central.quart, J - 1, N - J, noncentral.param,
  lower.tail= FALSE)
  return(noncentral.p)
}
```

Listing B.3: Implementierung der Bonferroni-Holm Sequenz

```
#!/usr/bin/Rscript

library(Hmisc)
source("cbind.all.R")

# CSV-Datei einlesen:
# fehlende Messwerte stehen nicht im File, d.h. *nichts* zwischen zwei
;;
d <- read.table(file("probenahmeplan.csv"), encoding="utf-8", header =
TRUE, row.names = 1, sep=";")

parameter <- list(
  list(p="GV", lab="Glühverlust", digits=1, einheit="\%~TS", beta.d =
2.5),
  list(p="Lf", lab="Leitfähigkeit", digits=1, einheit="\si{\milli}\
siemens\per\cm}", beta.d = 0.5),
  list(p="pH", lab="pH-Wert", digits=1, einheit="", beta.d = 0.3),
  list(p="NO3", lab="Nitrat-Stickstoff", digits=0, einheit="\si{\mg}\
per\kg}~TS", beta.d = 100),
```

```

list(p="NH4", lab="Ammonium-Stickstoff", digits=0, einheit="\si{\mg
  \per\kg}~TS", beta.d = 150),
list(p="HS", lab="Huminsäuren", digits=1, beta.d = .6),
list(p="Pcal", lab="pflanzenverfügbarer_PPhosphor", digits=0, einheit="
  \si{\mg\per\kg}~TS", beta.d = 200),
list(p="AT4_TM", lab="Atmungaktivität_(TS)", digits=1, einheit="\si
  {\mg\,\ce{O2}\per\gram}~TS", beta.d = .5),
list(p="AT4_oTM", lab="Atmungaktivität_(org._TS)", digits=1, einheit="
  \si{\mg\,\ce{O2}\per\gram}~oTS", beta.d = 3)
)

testsets <- list(
  list(
    c("2A", "2AW"), c("2A", "2Eav"), c("2A", "2Ebv"),
    c("2A", "2Eauv"), c("2A", "2EbuV"), c("2Eav", "2Ebv"),
    c("2Eauv", "2EbuV"), c("2Eav", "2Eauv"), c("2Ebv", "2EbuV"),
    c("2AW", "2EWb"), c("2AW", "2EWa"), c("2EWa", "2EWb")),
  list(
    c("1AW", "1ARSG"),c("1ARSG", "1ERa"), c("1ARSG", "1ERb"),
    c("1ARSG", "1ESa"),c("1ARSG", "1ESb"), c("1ARSG", "1EGa"),
    c("1ARSG", "1EGb"),c("1ERa", "1ERb"), c("1ESa", "1ESb"),
    c("1EGa", "1EGb"),c("1EGa", "1ESa"), c("1EGa", "1ERa"),
    c("1ESa", "1ERa"),c("1EGb", "1ESb"), c("1EGb", "1ERb"),
    c("1ESb", "1ERb"),c("1AW", "1EWb"), c("1AW", "1EWa"),
    c("1EWa", "1EWb"))
)

tests <- function(set, par) {
  print("-----")
  df <- data.frame(x = sapply(set, function(x) {return(x[1])}),
    y = sapply(set, function(x) {return(x[2])}),
    mean.x = NA, mean.y = NA, sd.x = NA, sd.y = NA, p.value = NA, p.
      value.holm = NA, sig = NA)
  for(i in 1:nrow(df)) {
    x <- shapedata(d, df[i,]$x, par$p)
    y <- shapedata(d, df[i,]$y, par$p)
    if(length(x) > 4 && length(y) > 4) {
      t.test <- t.test(x,y)
      df[i,]$mean.x <- mean(x)
      df[i,]$mean.y <- mean(y)

      df[i,]$sd.x <- sd(x)
      df[i,]$sd.y <- sd(y)
      df[i,]$p.value <- t.test$p.value
    }
  }
  df.na <- df[is.na(df$p.value),]
  df <- df[! is.na(df$p.value),]
  if(nrow(df) != 0) {
    df <- df[order(df$p.value), ]
    sig.check = TRUE
    for(i in 1:nrow(df)) {

```

```

        df[i,]$p.value.holm <- min(df[i,]$p.value * (nrow(df) - i + 1)
            , 1)
        if(df[i,]$p.value.holm < 0.05 && sig.check) {
            df[i,]$sig <- TRUE
        } else { df[i,]$sig <- sig.check <- FALSE }
    }
}
df <- rbind(df, df.na)
df <- df[order(as.numeric(row.names(df))), ]
df$power[is.na(df$p.value)] <- NA
out.t.test.all <- c(out.t.test.all, df$p.value.holm)
if(nrow(df) == nrow(df.na)) return()
df <- df[! is.na(df$p.value),]
out.t.test.deponie <- data.frame(
    x = as.character(df$x),
    y = as.character(df$y),
    p.val.bh = paste(
        as.vector(sapply(formatC(df$p.value.holm, format="f", digits
            =3, decimal.mark = ","),
            function(x) {x[x == "NA"] <- ""; x} )),
        printbool(df$sig)),
    diff = sapply(abs(df$mean.x - df$mean.y), function(x) {
        x.f <- formatC(x, format="f", digits=par$digits, decimal.mark
            = ",")
        x.f[x < par$beta.d] <- paste("\\textit{" ,x.f, "}", sep="")
        return(x.f)})
)
if(ncol(out.t.test.par) > 0) {
    out.t.test.par <- cbind.all(out.t.test.par, out.t.test.deponie)
} else {
    out.t.test.par <- data.frame(out.t.test.deponie)
}
}

partests <- function(par) {
    print("=====")
    print(par$p)
    out.t.test.all <- c()
    out.t.test.par <- data.frame()
    lapply(testsets, tests, par)
    latex(out.t.test.par,
        file=paste("tex/", par$p, "_t.test_holm.tex", sep=""),
        cgroup=ltx.opts[[paste("set", ncol(out.t.test.par), sep=")]]$
            cgroup,
        n.cgroup=ltx.opts[[paste("set", ncol(out.t.test.par), sep=")]]$n.
            cgroup,
        cgroup.just=ltx.opts[[paste("set", ncol(out.t.test.par), sep=")]]
            $cgroup.just,
        colheads=ltx.opts[[paste("set", ncol(out.t.test.par), sep=")]]$
            colheads,
        rowname=NULL, ctable=TRUE, where='!htbp', na.blank=TRUE, caption.
            loc="bottom",

```

```

caption=paste(par$lab, "\textendash\p-Werte aus t-Test (Welch),
  modifiziert nach Bonferroni-Holm,  $\alpha=0.05$  und
  Differenz der Mittelwerte,  $d=$ ", par$beta.d, " $\$$ ", par$
  einheit),
label=paste("tab:", par$p, "_ttest", sep="")
)
out[[par$lab]] <- out.t.test.all
}

ltx.opts <- list(
  set8 = list(cgroup=c("Allerheiligen", "St. Pölten"),
    n.cgroup=c(4, 4), cgroup.just=c("c", "c"),
    colheads=rep(c("Variante1", "Variante2", "p-Wert", "Differenz"),
      2)),
  set4 = list(cgroup="St. Pölten",
    n.cgroup=4, cgroup.just="c",
    colheads=c("Variante1", "Variante2", "p-Wert", "Differenz"))
)

shapedata <- function(d, f, par) {
  data <- subset(d, factor %in% f)[[par]]
  return(data[! is.na(data)])
}

# Bool'sche Werte in hübsche LaTeX-Zeichen übersetzen
printbool <- function(bool) {
  sapply(bool, function(x) {ifelse(x, " $\times$ ", " $\checkmark$ ")}
)

out <- data.frame(x = sapply(c(testsets[[1]], testsets[[2]]), function(x) {
  return(x[1])}),
  y = sapply(c(testsets[[1]], testsets[[2]]), function(x) {return(x
    [2])}))
dev.null <- lapply(parameter, partests)

csv <- write.csv2(out, file="t-test-holm.csv")

```

C Abkürzungen und Probenbezeichnungen

a	oberflächennaher Probenahmehorizont	NaPP	Natriumpyrophosphat
A	Ausgangsprobenahme	NH₄	Ammonium
AT	Atmungsaktivität	NO₃	Nitrat
AT₄	Atmungsaktivität über 4 Tage	oTS	organische Trockensubstanz
b	tiefer Probenahmehorizont	P_{cal}	pflanzenverfügbare Phosphor
CAL	Calcium-Acetat-Lactat	R	Raps
DVO	Deponieverordnung	RSG	Raps, Spontanvegetation und Gras
E	Endprobenahme	S	Spontanvegetation
G	Grasmischung	TS	Trockensubstanz
GV	Glühverlust	W	Weiden und Pappeln
HS	Huminsäuren	1	St. Pölten
Lf	Leitfähigkeit	2	Allerheiligen
KVO	Kompostverordnung	μ	Mittelwert
MBA	mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle	σ	Standardabweichung