

Dissertation 03/2014

**Eignung von Klärschlammkompost als Rekultivierungs-
material zum Anbau von Energiepflanzen**

Franziska Liemen

**Eignung von Klärschlammkompost als
Rekultivierungsmaterial zum Anbau von Energiepflanzen**

**Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)**

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Franziska Liemen
Geb. am 10.02.1981 in Friedrichroda

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
Summary.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	15
1 Einleitung und Problemstellung.....	18
2 Literaturübersicht.....	20
2.1 Klärschlammaufkommen und -verwendung.....	20
2.2 Eigenschaften von Klärschlammkomposten.....	22
2.3 Biogasgewinnung.....	25
2.3.1 Grundlagen der Vergärung.....	25
2.3.2 Biogas- und Methanausbeuten einzelner Fruchtarten.....	28
3 Material und Methoden.....	30
3.1 Versuch 1.....	30
3.2 Versuch 2.....	34
3.3 Vegetationstest und DIN ISO 11274 zur Bestimmung der nFK.....	37
3.4 Bodenwasserhaushaltsmodell (BOWAHALD).....	38
3.5 Untersuchungsmethoden.....	40
3.5.1 Rekultivierungsmaterial.....	40
3.5.2 Biomasse.....	41
3.5.3 Sickerwasser.....	41
3.6 Berechnung der Biogas- und Methanausbeuten.....	42
3.7 Statistische Auswertung.....	42
4 Ergebnisse und Diskussion.....	43
4.1 Pflanzenbauliche Untersuchungen.....	43
4.1.1 Versuch 1.....	43
4.1.1.1 Erträge.....	43
4.1.1.2 Pflanzliche Inhaltsstoffe.....	49
4.1.1.3 Entzugsbilanzen.....	57
4.1.1.4 Chemische Bodeneigenschaften.....	60
4.1.2 Versuch 2.....	68
4.1.2.1 Pflanzliche Inhaltsstoffe.....	68
4.1.2.2 Chemische Bodeneigenschaften.....	72

4.1.3	Diskussion	76
4.2	Energetische Verwertung der Biomasse	92
4.2.1	Versuch 1.....	92
4.2.1.1	Rohnährstoffgehalte, Biogas- und Methanausbeuten.....	92
4.2.1.2	Nährstoffverhältnisse	101
4.2.2	Versuch 2.....	103
4.2.2.1	Rohnährstoffgehalte, Biogas- und Methanausbeuten.....	103
4.2.2.2	Nährstoffverhältnisse	109
4.2.3	Diskussion	111
4.3	Sickerwasser	117
4.3.1	Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität	117
4.3.2	Wasserhaushaltsmodellierung mit BOWAHALD	120
4.3.3	Sickerwassermengen und -qualitäten.....	122
4.3.3.1	Versuch 1.....	123
4.3.3.2	Versuch 2.....	131
4.3.3.3	Diskussion.....	135
5	Schlussfolgerungen.....	139
	Literaturverzeichnis	142
	Anlagenverzeichnis	157

Zusammenfassung

Ein wesentliches Ziel des Landschaftsbaus besteht darin, eine begrünungsfähige Schicht zu etablieren. Die Einsatzgebiete sind vielseitig und unter den jeweiligen konkreten Standortbedingungen zu betrachten. Möglichkeiten sind u.a. Rekultivierungsflächen des Bergbaus, Altlasten, Halden und Deponien. Um auf diesen Standorten einen Pflanzenwuchs zu ermöglichen, sind geeignete Materialien mit einem hohen Gehalt an organischem Material zur Verbesserung der Bodenstruktur sowie zur Wasser- und Nährstoffversorgung erforderlich. Die Verwendung von Klärschlammkompost (KSK) stellt eine Möglichkeit dar. KSK entsteht bei der aeroben Kompostierung von kommunalem, anaerob behandeltem Klärschlamm in der Mischung mit gleichen Anteilen von Strukturmaterial (Holz, Grünschnitt und Rinde) bis zu Rottegraden von IV und V. Bisherige Untersuchungen zur Verwendung von KSK zum Aufbau von Wasserhaushaltsschichten befassten sich mit dem Bodenwasser- und Stoffhaushalt.

In der vorliegenden Dissertation wurde der Einfluss von Wasserhaushaltsschichten aus KSK auf das Wachstum von verschiedenen Energiepflanzen bei differenzierten Mächtigkeiten und Mischungsverhältnissen ermittelt. Am Beispiel eines dreijährigen Feldversuches auf der Kalirückstandshalde Sondershausen der GSES (Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH) wurden Rekultivierungsschichten aus einem Gemisch von 0/50/75 Vol% KSK mit einem mineralischen Boden (SI2 bzw. SI3) und Mächtigkeiten von 70 sowie 100 cm aufgebaut. Auf diesen sechs Versuchsvarianten wurden sieben verschiedene Fruchtarten (Weißer Senf, Winterweizen, Winterraps, Winterroggen, Sudangras, Mais, Energiegras-Knautgras, Glatthafer, Rotschwingel) angebaut, die sich unter dem Aspekt der energetischen Verwertung eignen. Ergänzend wurde bei dem Unternehmen ROMONTA GmbH in Amsdorf ein zusätzlicher Biomasseversuch angelegt, um über die Wirkung von KSK auf ein breiteres Spektrum an Kulturpflanzen Aussagen treffen zu können. Geprüft wurden ebenfalls die Zumischungen an 0/50/75 Vol% KSK, jedoch bei nur einer Mächtigkeit von 100 cm. Angebaute Fruchtarten in dem zweijährigen Versuch waren Sonnenblume, Sommerraps, Mais, Zuckerhirse, Sudangras, Sommergerste, Sommerhafer, Sommertriticale und Energiegras (Knautgras, Glatthafer, Rotschwingel). Gegenstand der Untersuchungen war der Einfluss von KSK auf die Biomasseerträge sowie auf die pflanzlichen Inhaltsstoffe. Die Ergebnisse waren Grundlage für die Berechnung der Biogas- und Methanausbeute. Anhand der für die Vergärung ermittelten wichtigen pflanzlichen Nährstoffe sollte die Eignung von KSK als Rekultivierungsmaterial ausgewiesen werden. Zur umfassenden Einschätzung wurden der Bodenwasserhaushalt sowie die Bodenchemie untersucht.

Die Erträge zeigten die positive Wirkung von KSK. Bezüglich der Mächtigkeit der Kulturschicht sowie des Zumischungsverhältnisses waren die Ergebnisse differenziert zu beurteilen. Es konnten für Weizen, Mais, Raps und Sudangras mit höherer Zumischung an KSK steigende Erträge auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen erzielt werden. Eine Schichtmächtigkeit von 100 cm wirkte sich zudem positiv auf die Fruchtarten Roggen / Weizen, Weizen, Sudangras, Mais, Raps und Energiegras aus. Im Vergleich zur Variante ohne KSK konnten generell steigende Erträge ermittelt werden. Sehr hohe Erträge für den

Anbau von Energiegras, die sich im Laufe der Versuchszeit steigerten, wurden im Vergleich zu Literaturangaben ausgewiesen. Während 2008 auf den KSK-Varianten 100 bis 142 dt/ha TM erreicht wurden, lag der Ertrag 2009 zwischen 184 und 249 dt/ha TM. Für die Fruchtarten Mais und Sudangras konnten durch die höchste Zumischung an KSK von 75 Vol% ebenfalls hohe Erträge erzielt werden (Mais 167 bis 203 dt/ha TM; Sudangras 135 bis 137 dt/ha TM).

Untersuchungen der pflanzlichen Inhaltsstoffe als Grundlage für den Nachweis der mikrobiologischen Verwertung in der Biogasanlage zeigten standort- und kulturartenabhängige Unterschiede. Bei fast allen Fruchtarten war durch steigende Zumischung an KSK auch eine Zunahme des N_t-Gehaltes festzustellen, während die Schichtmächtigkeit weniger Einfluss ausübte. Die Zumischung von 75 Vol% hatte bei Sudangras, Mais, Raps und Senf die höheren Gehalte in der Biomasse vorzuweisen. Die Aufnahme von P in die Biomasse war ebenfalls pflanzenartenabhängig. Während bei Sudangras, Senf und Gras die Höhe der Zumischung an KSK keinen Einfluss besaß, wirkte sich bei Raps eine höhere Zumischung mit höheren Gehalten an P aus. Bei Mais lief dies konträr. Die Schichtmächtigkeit zeigte keinen Einfluss bei Mais, Raps, Weizen und Energiegras, während sich bei Roggen und Senf die 100 cm mächtige Variante als vorteilhaft erwies. Für den Parameter K waren höhere Gehalte durch steigende Zumischung nur bei den Fruchtarten Mais und Raps nachweisbar.

Die Gehalte an Mg, Ca, Na, S und Cl waren in Abhängigkeit der geprüften Varianten für die unterschiedlichen Fruchtarten differenziert. Bei Mais und Senf wurden steigende Mg-Gehalte durch zunehmende Zumischung an KSK erreicht. Bei Weizen, Sudangras, Senf und Raps war der Ca-Gehalt bei der 50 Vol%-Variante höher. Für S waren keine Abhängigkeiten von der Zumischungshöhe zu erkennen. Na wurde von Roggen und Weizen bei geringerer Menge an KSK in höherem Maße aufgenommen. Bei Cl konnten nur eindeutige Unterschiede bei Senf und Raps nachgewiesen werden.

Vergleichend mit Angaben aus der Literatur lagen die Nährstoffgehalte der Pflanzen teilweise im Defizitbereich, obwohl im Boden hohe Mengen an verfügbarem N, P, K und Mg vorlagen.

Die für die Vergärung wichtigen **Schwermetallgehalte** zeigten für den Parameter Zn bei allen untersuchten Fruchtarten durch Zumischung an KSK eine Zunahme in den pflanzlichen Gehalten. Dies galt ebenso für Cu bei den Fruchtarten Energiegras, Senf, Roggen / Weizen, Sudangras, Sonnenblume, Triticale, während bei Mais und Raps geringere Werte im Vergleich zur Variante ohne KSK ermittelt wurden. Für Al wurden bei allen Fruchtarten mit höchster Zumischung an KSK im Vergleich zur Nullvariante geringere Gehalte gemessen. Ausnahme bildete Weizen mit identischen Werten. Ähnliches konnte für Cr bestätigt werden. Auch hier waren mit Ausnahme von Energiegras und Senf sinkende Gehalte zu beobachten. Hingegen stiegen die Werte für Ni und As bei Roggen, Weizen und teilweise bei Energiegras, Senf und Raps an. Sinkende bzw. gleichbleibende Gehalte wurden ebenso für Cd und Hg bei allen untersuchten Fruchtarten bestimmt, während dies für Pb mit Ausnahme von Senf und Weizen ebenfalls nachgewiesen wurde. Die Schwermetallgehalte im

Rekultivierungsmaterial entsprachen den im Entwurf der neuen AbfklärV (2010) festgelegten Grenzwerten.

Die Untersuchung weiterer **chemischer Bodeneigenschaften** auf der Kalirückstandshalde Sondershausen ließ hohe Vorräte an Pflanzennährstoffen bei allen Zumischungen an KSK erkennen. Die N_T -Gehalte schwankten zwischen 0,37 % (100cm-50Vol%KSK) und 0,98 % (70cm-75Vol%KSK). Die NO_3 -N und NH_4 -N-Gehalte waren jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sowie in Abhängigkeit der angebauten Kultur, KSK-Zugabe und der Probenahmezeit zu sehen. Grundsätzlich variierten die Werte von NO_3 -N zwischen 1,12 mg/100g (100cm-75Vol%KSK) und 9,30 mg/100g (70cm-75Vol%KSK) sowie von NH_4 -N zwischen 0,49 mg/100g (100cm-50Vol%KSK) und 2,22 mg/100g (70cm-75Vol%KSK). Durch eine erhöhte Zumischung an KSK war eine deutliche Steigerung der C_T -Gehalte nachweisbar, die maximal 12,96 % (100cm-75Vol%KSK) erreichte. Die C/N-Verhältnisse lagen bei den KSK-Varianten zwischen 12,0 und 14,6. Hohe Vorräte waren kennzeichnend für P_t (bis 0,43 %), K_t (bis 0,94 %) und Mg_t (bis 1,38 %). Die zugehörigen pflanzenverfügbaren Anteile bewegten sich über den gesamten Versuchszeitraum im Bereich des Luxuskonsums. Dabei war eine Steigerung mit zunehmender KSK-Gabe zu verzeichnen. Dies konnte ebenfalls für den Ca-, S- und Salzgehalt konstatiert werden.

Die für die mikrobiellen Vorgänge geforderten **Nährstoffverhältnisse** waren bei fast allen Fruchtarten als optimal einzuschätzen. Das C/N-Verhältnis lag in einem Bereich von 10 bis 30. Einzig die Pflanzen, die im Jahr des Aufbaues der Kulturschicht geerntet wurden, wiesen zu hohe N-Gehalte auf. Das C/N/P/S Verhältnis zeigte keine Auswirkung aufgrund der Zumischungshöhe an KSK und der Mächtigkeit, es spielte eher die Pflanzenspezifik eine Rolle.

Ebenso ergaben sich keine eindeutigen Aussagen bezüglich des Einflusses der Zumischung an KSK sowie der Mächtigkeiten auf die untersuchten **Rohnährstoffgehalte** für die jeweils angebauten Fruchtarten. Es besaßen die Pflanzenart und der Erntezeitpunkt ein größeres Gewicht. Die auf der Grundlage der Rohnährstoffgehalte berechneten theoretischen **Biogas- und Methanausbeuten** der angebauten Fruchtarten in l/kg oTS zeigten aus diesem Grunde relativ geringe Unterschiede. Am Beispiel der Varianten mit 100 cm Mächtigkeit und 50 Vol% Zumischung an KSK ergaben sich die nachfolgenden Ergebnisse: Sudangras besaß die geringsten Methanausbeuten bis maximal 234 l/kg oTS, gefolgt von Zuckerhirse, Sonnenblume, Raps, Roggen / Weizen, Sommergerste, Sommertriticale, Weizen, Senf und Mais. Der angebaute Mais lieferte unabhängig von der Zumischungshöhe an KSK und Mächtigkeit die höchsten Methanausbeuten bis 296 l/kg oTS. Jedoch ist darauf zu verweisen, dass die im Batchversuch für Sudangras gemessenen Ergebnisse deutlich höhere Methanerträge in der Praxis erwarten lassen. Die während des Laborversuches ermittelten Gasausbeuten erreichten maximal 334 l/kg oTS. Ein hier aufzuführender Grund dieser Differenzen lag in der Berechnung der Methanausbeuten anhand der Verdaulichkeitskoeffizienten der Rohnährstoffgehalte. Als Haupteinflussfaktor auf die Biogas- und Methanausbeuten war der Ernteertrag der einzelnen Kulturen zu nennen. Die hohen Ernteerträge bei Energiegras und Mais auf den 100 cm mächtigen Varianten mit 75 Vol%

KSK waren Grundlage für die höchsten Ausbeuten an Biogas und Methan dieser Fruchtarten. Die maximale Ausbeute erreichte Energiegras im dritten Anbaujahr mit 5871 m³/ha*a Methan, gefolgt von Mais mit 5291 m³/ha*a Methan. Insgesamt wiesen die verschiedenen Kulturen in Abhängigkeit von Mächtigkeit, KSK-Zumischung und Rohnährstoffgehalten große Spannweiten auf. Aufgrund des erzielten Methanertrages war folgende Tendenz in der Eignung zu erkennen: Energiegras 3. Jahr (4241 bis 5871 m³/ha), Mais (3295 bis 5291 m³/ha), Weizen (2994 bis 3935 m³/ha), Energiegras 2. Jahr (2324 bis 3128 m³/ha), Sudangras (2208 bis 2836 m³/ha), Roggen / Weizen (1899 bis 2419 m³/ha). Die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse erzielten Raps und Senf, die jedoch generell für eine Eignung als Ganzpflanze in der Vergärung ausgeschlossen werden. Beim Versuchsanbau sollte eher auf die pflanzlichen Inhaltsstoffe Bezug genommen werden, um sie einer anderen Form der energetischen Verwertung zuzuführen.

Neben einer ausreichenden Nährstoffverfügbarkeit im Rekultivierungsmaterial waren für das Wachstum der Energiepflanzen sowie für das Auftreten von Sickerwasser auch eine ausreichende **Wasserspeicherfähigkeit und Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers** von Bedeutung. Auf der Grundlage eines umfangreichen Vegetationstest mit Sonnenblumen war mit steigender Menge an KSK zu sorptionsschwachen sowie ton- und schluffarmen Sanden ein Anstieg der Feldkapazität und der nutzbaren Feldkapazität zu verzeichnen. Die auf diesen Ergebnissen basierte Modellierung des Bodenwasserhaushaltes mit Hilfe des Modells BOWAHALD brachte für den Standort Sondershausen und bei Anbau von Energiegras eine Minderung der N_{min}-Fracht durch eine Schichtmächtigkeit von 1 m. Die höhere Zugabe von KSK bewirkte auch höhere Frachten. Die angebaute Fruchtart übte einen größeren Einfluss auf die Sickerwassermenge als die KSK-Zumischungshöhe aus. Die Energiegrasmischung konnte aufgrund des ganzjährigen Bewuchses die Sickerwassermenge am effektivsten reduzieren, gefolgt von Sonnenblume / Raps, Sudangras / Sommergerste, Mais / Zuckerhirse und Hafer / Triticale. Im Vergleich zur Variante ohne KSK wurden die Sickerwassermengen durch Zugabe von KSK deutlich reduziert.

Summary

An aim of landscape architecture is to establish a greening enabled layer. The application areas are versatile and have to be considered with respect to their concrete location terms. Possibilities are, among others, recultivation surfaces of mining, polluted areas and waste dumps. To set up plant growth at such locations, suitable materials with a high content of organic matter are necessary to improve the structure as well as the water and nutrient supply of the soil. One such suitable material can be municipal sewage sludge compost (SSC). SSC originates from aerobic composting of municipal, anaerobically treated sludge in the mixture with the equal shares of structural material (wood, green cut and bark) up to rotting degrees of IV and V. Previous studies on the use of SSC in the construction of recultivation layers dealt with the balance of water and nutrients in soil.

In the present thesis the influence of recultivation layers from SSC of different thickness and mixing ratios on different energy crops was determined. Using the example of a three-year experimental plot on a potassium dump near Sonderhausen of the GSES (Glückauf Sonderhausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH), recultivation layers of two different thicknesses (70 and 100 cm) and three mixtures ratios between SSC and a sandy soil (SSC added at 0, 50 and 75 % by volume) were tested. On these six test variations seven different crops (*Sinapis alba*, *Triticum aestivum*, *Brassica napus*, *Secale cereale*, *Sorghum sudanese*, *Zea mays* and Energy grass (*Dactylis glomerata*, *Arrhenatherum elatius*, *Festuca rubra*)) which are suited for the production of renewable energy were grown. Supported by the ROMONTA GmbH, Amsdorf, an additional biomass trial was prepared to test the effects of SSC on a wider range of energy crops. The admixtures were also tested in 0/50/75 % by volume SSC, with a layer thickness of 100 cm. Cultivated crops in the two-year-trial were *Helianthus annuus*, *Brassica napus*, *Zea mays*, *Sorghum bicolor*, *Sorghum sudanese*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, *Triticum secale* and Energy grass (*Dactylis glomerata*, *Arrhenatherum elatius*, *Festuca rubra*). The focus of the investigation was the influence of SSC on the biomass yields as well as on the plant components. The results were the basis for the calculation of biogas and methane yields. Using the plant nutrients determined to be important for fermentation, the suitability of SSC as recultivation material was to be verified. The soil water balance and the soil chemistry were examined for a further comprehensive assessment.

The yields showed the positive effect of SSC. Regarding the thickness of the recultivation layer as well as the admixture ratio the results must be examined more closely. For *Triticum aestivum*, *Zea mays*, *Brassica napus* and *Sorghum sudanese* rising yields could be achieved on the potassium dump in Sonderhausen by using a higher admixture ratio of SSC. In addition, a layer thickness of 100 cm affected the yield of *Secale cereale* / *Triticum aestivum*, *Triticum aestivum*, *Sorghum sudanese*, *Zea mays*, *Brassica napus* and energy grass positively. Compared to the case without SSC, rising yields could be determined in general. The comparison with the literature showed very high yields for the cultivation of energy grass which increased in the course of the test time. While achieving 100-142 dt/ha DM in 2008 on the SSC-variants, the yield in 2009 increased up to 249 dt/ha DM. For the crops *Zea mays*

and *Sorghum sudanese* with the highest admixture of 75 Vol% of SSC high yields were also measured (*Zea mays* 167-203 dt/ha DM; *Sorghum sudanese* 135 – 137 dt/ha DM).

Investigations of the plant ingredients as the basis for the proof of the microbiological utilisation in the biogas plant showed site- and crop-specific differences. An increasing admixture of SSC led to an increase in the N_t content for almost all crops, while the layer thickness was found to have less influence. The admixture of 75 Vol% SSC showed higher concentrations in the biomass at *Sorghum sudanese*, *Zea mays*, *Brassica napus* and *Sinapis alba*. The content of P in the biomass is also dependent on plant species. The admixture ratio did not show an influence in the case of *Sorghum sudanese*, *Sinapis alba* and energy grass. A higher admixture affected higher concentrations of P in *Brassica napus* plants, whereas in the case of *Zea mays* the opposite was observed. The layer thickness showed no influence for *Zea mays*, *Brassica napus*, *Triticum aestivum* and energy grass, while for *Brassica napus* and *Sinapis alba* the layer thickness of 100 cm proved beneficial. Regarding the parameter K, higher concentrations were found by rising admixture only for the crops *Zea mays* and *Brassica napus*.

The contents of Mg, Ca, Na, S and Cl were differentiated in dependence on the tested variants for the different crops. In the case of *Zea mays* and *Sinapis alba* rising Mg concentrations were achieved by an increasing admixture of SSC. In *Triticum aestivum*, *Sorghum sudanese*, *Sinapis alba* and *Brassica napus* the Ca concentration was higher for 50 Vol% variation. S showed no dependence on the admixture ratio. In the lower admixtures of SSC more Na was taken up by *Secale cereale* and *Triticum aestivum*. Cl showed clear differences only in the cases of *Sinapis alba* and *Brassica napus*.

Compared to information from literature, the nutrient contents of the plants were partially in the deficit area, although high levels of N, P, K and Mg were present in the soil.

For the parameter Zn, the **heavy metal concentrations**, important for the fermentation, showed an increase of the concentrations in the plants in all examined crops upon admixture of SSC. This was also valid for Cu in the crops energy grass, *Sinapis alba*, *Secale cereale* / *Triticum aestivum*, *Sorghum sudanese*, *Helianthus annuus*, and *Triticum secale*, while in *Zea mays* and *Brassica napus* lower values were determined compared to the variation without SSC. Lower concentrations of Al were measured in all crops with the highest admixture of SSC compared to the zero variant. An exception was *Triticum aestivum* with identical values. The same could be confirmed for Cr. Here, decreasing concentrations were observed, with the exception of energy grass and *Sinapis alba*. However, the values of Ni and As increased in *Secale cereale* and *Triticum aestivum* and partially in energy grass, *Sinapis alba*, and *Brassica napus*. Diminished or steady levels were also determined for Cd and Hg in all studied crops, while this was just proved for Pb with the exception of *Sinapis alba* and *Triticum aestivum*. The heavy metal concentrations of the recultivation material corresponded to the threshold values in the AbfKlärV (2010).

The investigation of further **chemical soil properties** on the potassium dump in Sondershausen revealed high stocks of plant nutrients in all admixtures of SSC. The N_t-concentrations ranged from 0.37 % (100cm-50Vol%SSC) to 0.98 % (70cm-75Vol%SSC).

The NO_3^- - and $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentrations were subject to seasonal variations had as well to seen in dependence on the tilled culture, SSC-addition, and the sampling time. Basically, the values of NO_3^- ranged from 1.12 mg/100g (100cm-75Vol%SSC) to 9.30 mg/100g (70cm-75Vol%SSC) as well as of NH_4 from 0.49 mg/100g (100cm-50Vol%SSC) to 2.22 mg/100g (70cm-75Vol%SSC). By raising the admixture of SSC, a significant increase of the C_t concentrations, which reached a maximum 12.96 % (100cm-75Vol%SSC), was provable. The C/N ratios at the SSC variations ranged from 12.0 to 14.6. High amounts were characteristic for P_t (up to 0.43 %), K_t (up to 0.94 %) and Mg_t (up to 1.38%). The plant-available nutrients showed very high values during the whole test period. Furthermore, an increase with increasing SSC amount was registered. This could be also stated for Ca-, S- and salinity-content.

The information required for the microbial processes **nutrient ratios** were assessed to be optimal in almost all crops. The C/N ratio was in a range from 10 to 30. Only the plants which were harvested in the year of the construction of the recultivation layer showed too high N concentrations. The C/N/P/S ratio showed no effect caused by the admixture of SSC and the thickness, whereas the plant specificity had more influence.

Likewise, there were no clear conclusions regarding the impact of the admixture of SSC and the thickness on the investigated **raw nutrient contents** for each of the cultivated crops. The plant specificity and the harvest time point showed a greater influence. The theoretical calculated **biogas and methane yields** of the grown crops (l/kg oTS) on the basis of the raw nutrient contents showed relatively small differences for this reason. At the example of the variations with 100 cm thickness and 50 Vol% admixture of SSC, the following results were produced. *Sorghum sudanese* had the lowest methane yields of up to 234 l/kg oTS, followed by *Sorghum bicolor*, *Helianthus annuus*, *Brassica napus*, *Secale cereale* / *Triticum aestivum*, *Hordeum vulgare*, *Triticum secale*, *Triticum aestivum*, *Sinapis alba* and *Zea mays*. The tilled *Zea mays* delivered the highest methane yields up to 296 l/kg oTS, regardless of the admixture of SSC and thickness. However, it should be noted that batch test results measured for *Sorghum sudanese* suggest significantly higher methane yields in practice. The gas yields ascertained during the lab test reached their maximum with 334 l/kg oTS. A reason for these differences was the calculation of the methane yields with the help of the digestibility coefficient of the raw nutrient contents. The yield of each crop is to be stated as the main factor influencing the biogas and methane yields. The high yields of energy grass and maize on 100 cm thickness variations with 75 Vol% SSC were a basis for the highest yield of biogas and methane. Energy grass reached the maximum yield in the third year of cultivation with 5871 m³/ha*a methane, followed by *Zea mays* with 5291 m³/ha*a methane. Overall, the different cultures showed wide ranges (*of what*) as a function of thickness, SSC-admixture and raw nutrient contents. Because of the achieved methane yield the following trend was to be recognised in the suitability: Energy grass 3rd year (from 4241 to 5871 m³/ha), *Zea mays* (from 3295 to 5291 m³/ha), *Triticum aestivum* (from 2994 to 3935 m³/ha), energy grass 2nd year (from 2324 to 3128 m³/ha), *Sorghum sudanese* (from 2208 to 2836 m³/ha), *Secale cereale* / *Triticum aestivum* (from 1899 to 2419 m³/a). *Brassica napus* and *Sinapis alba* achieved the worst results. Nevertheless, *Brassica napus* and

Sinapis alba were not suitable as a whole plant in the fermentation. In the field trial more reference should be made to the crop ingredients in order to another form of energy use.

In addition to a sufficient nutrient availability in the recultivation material, a sufficient water storage capacity and plant availability of soil water were important for the growth of energy crops as well as for the occurrence of leachate. On the basis of a specific vegetation test with sunflowers an increase of the **field capacity and the plant available water** was registered with rising amount of SSC to sorption-weak as well as clay- and silt poor sand. The modelling based on these results using the BOWAHALD model resulted in a decrease of N_{\min} -loads for the location Sondershausen, assuming cultivation of energy grass and a higher thickness of layer. A higher addition of SSC also caused higher loads of seepage water. The tilled crops exerted a more significant influence on the seepage water amount than the SSC-admixture. Due to the all-year growth, the energy grass reduced the seepage water amount most efficiently, followed by *Helianthus annuus* / *Brassica napus*, *Sorghum sudanese* / *Hordeum vulgare*, *Zea mays* / *Sorghum bicolor* and *Avena sativa* / *Triticum secale*. Compared to the variation without SSC the seepage water amounts were clearly reduced by addition of SSC.

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
GI	Globalstrahlung
KS	Klärschlamm
KSK	Klärschlammkompost
LD	Lagerungsdichte
MW	Mittelwert
nFE	stickstofffreie Extraktstoffe
nFK	nutzbare Feldkapazität
OS	organische Substanz
oTS	organische Trockensubstanz
P	mittlerer jährlicher Niederschlag
P _k	messfehlerkorrigierter Niederschlag
PWP	permanenter Welkepunkt
RLF	relative Luftfeuchte
SD	Standardabweichung
T	Temperatur
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
XA	Rohasche
XP	Rohprotein
XL	Rohfett
XF	Rohfaser
pt	Trockenrohichte
Θ _{SAT}	Sättigungswassergehalt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Klärschlammverwertung in Deutschland, Sachsen-Anhalt und Thüringen für das Jahr 2010	20
Abbildung 2	Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus (modifiziert nach FNR 2006, KALTSCHMITT et al. 2009)	26
Abbildung 3	Versuchsanlage (Versuch 1).....	32
Abbildung 4	Aufbau eines Sickerwassersammlers	34
Abbildung 5	Kumulierte Frischmasseerträge von Energiegras im gesamten Versuchszeitraum (Versuch 1).....	47
Abbildung 6	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Senf (Versuch 1).....	92
Abbildung 7	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Senf (Versuch 1)	93
Abbildung 8	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Roggen / Weizen (Versuch 1).....	93
Abbildung 9	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Roggen/ Weizen (Versuch 1)	94
Abbildung 10	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Weizen (Versuch 1)	94
Abbildung 11	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Weizen (Versuch 1).....	95
Abbildung 12	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Sudangras (Versuch 1).....	95
Abbildung 13	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Sudangras (Versuch 1)	96
Abbildung 14	Im Batchversuch gemessene Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Sudangras (Versuch 1)	96
Abbildung 15	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Mais (Versuch 1).....	97
Abbildung 16	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Mais (Versuch 1).....	97
Abbildung 17	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Winterraps (Versuch 1).....	98
Abbildung 18	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Raps (Versuch 1)	98
Abbildung 19	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 1)	99
Abbildung 20	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 1)	100
Abbildung 21	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [m ³ /ha] von Energiegras nach Jahren (Versuch 1).....	100
Abbildung 22	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m ³ /ha] von Sonnenblume (Versuch 2)	104
Abbildung 23	Prozentuale Gehalte der Roh Nährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Mais (Versuch 2).....	104

Abbildung 24	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute (berechnet und Batchversuch) [l/kg oTS] von Sudangras (Versuch 2)	105
Abbildung 25	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Raps (Versuch 2)	106
Abbildung 26	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Zuckerhirse (Versuch 2).....	106
Abbildung 27	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Sommergerste (Versuch 2).....	107
Abbildung 28	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Sommertriticale (Versuch 2).....	108
Abbildung 29	Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Energiegras nach Schnitzeitpunkt (Versuch 2)	108
Abbildung 30	Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Energiegras nach Schnitzeitpunkt (Versuch 2)	109
Abbildung 31	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Ss bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest	117
Abbildung 32	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su2 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest.....	118
Abbildung 33	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest.....	119
Abbildung 34	Simulierte langjährige mittlere Restdurchsickerungsmengen der Varianten im Jahresverlauf	122
Abbildung 35	Verlauf der NO ₃ -N-Konzentrationen im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1).....	124
Abbildung 36	Verlauf der NH ₄ -N-Konzentrationen im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1).....	125
Abbildung 37	Verlauf der pH-Werte im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1).....	128
Abbildung 38	Verlauf der Elektrischen Leitfähigkeit im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1).....	129
Abbildung 39	Verlauf der Chloridkonzentration im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1).....	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Anforderungen an die Kulturschicht nach Anlage 3 Thüringer Kalihaldenrichtlinie (THÜRSTANZ 2002).....	21
Tabelle 2	Hemmstoffkonzentrationen bei der anaeroben Vergärung (Zusammenstellung nach KALTSCHMITT et al. 2009, FNR 2006).....	28
Tabelle 3	Biogas- und Methanausbeuten diverser Fruchtarten (Zusammenstellung nach AMON et al. (2005, 2007), BAUER et al. (2010), CONRAD und BIERTÜMPFEL (2007), FNR (2010), HEIERMANN et al. (2009a, b), KAISER (2007), KTBL (2006), MÄHNERT et al. (2002), RÖHRICHT und ZANDER (2008), SCHUMACHER (2008), STRAUß et al. (2010), STÜLPNAGEL et al. (2009)).....	29
Tabelle 4	Textur der verwendeten Böden als Zumischungsmaterial (Versuch 1)	30
Tabelle 5	Chemische Eigenschaften des verwendeten KSK und der Varianten (Versuch 1).....	31
Tabelle 6	Untersuchte Fruchtarten mit Aussaat- und Erntetermin (Versuch 1)	32
Tabelle 7	Versuchsvarianten (Versuch 1).....	33
Tabelle 8	Niederschlag während des Versuchszeitraumes (Juli 2007 bis Oktober 2009, Versuch 1).....	34
Tabelle 9	Textur des verwendeten Bodens als Zumischungsmaterial (Versuch 2)	35
Tabelle 10	Chemische Eigenschaften des verwendeten KSK und der Varianten (Versuch 2).....	35
Tabelle 11	Untersuchte Fruchtarten mit Aussaat- und Erntetermin (Versuch 2)	36
Tabelle 12	Versuchsvarianten (Versuch 2).....	36
Tabelle 13	Niederschlag während des Versuchszeitraumes (Mai 2008 bis August 2009, Versuch 2).....	37
Tabelle 14	Textur der verwendeten Böden (Vegetationstest).....	37
Tabelle 15	Glühverluste der einzelnen Varianten	38
Tabelle 16	Mittlere langjährige Monatswerte für den Standort Sondershausen (1990 – 2009).....	39
Tabelle 17	Verwendete Wasserhaushaltsgrößen und Dichten für die Modellierung mit BOWAHALD	40
Tabelle 18	Analytikmethoden zur Untersuchung der chemischen Parameter des Rekultivierungsmaterials	40
Tabelle 19	Analytikmethoden zur Untersuchung der Biomasse	41
Tabelle 20	Analytikmethoden zur Untersuchung des Sickerwassers	42
Tabelle 21	Frisch- und Trockenmasseerträge von Senf (Versuch 1)	43
Tabelle 22	Frisch- und Trockenmasseerträge von Roggen / Weizen (Versuch 1)	44
Tabelle 23	Frisch- und Trockenmasseerträge von Weizen (Versuch 1).....	44
Tabelle 24	Frisch- und Trockenmasseerträge von Sudangras (Versuch 1)	45

Tabelle 25	Frisch- und Trockenmasseerträge von Mais (Versuch 1)	45
Tabelle 26	Frisch- und Trockenmasseerträge von Winterraps (Versuch 1)	46
Tabelle 27	Frisch- und Trockenmasseerträge von Energiegras im gesamten Versuchszeitraum (Versuch 1).....	48
Tabelle 28	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Senf (Versuch 1).....	50
Tabelle 29	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Roggen / Weizen (Versuch 1)	50
Tabelle 30	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Weizen (Versuch 1)	51
Tabelle 31	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sudangras (Versuch 1).....	52
Tabelle 32	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Mais (Versuch 1)	53
Tabelle 33	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Winterraps (Versuch 1).....	53
Tabelle 34	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Energiegras (Versuch 1).....	57
Tabelle 35	Nähr- und Schadstoffentzüge durch die Pflanzen für die einzelnen Varianten im gesamten Versuchszeitraum (Versuch 1).....	59
Tabelle 36	Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 1) – Teil 1	66
Tabelle 37	Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 1) – Teil 2	67
Tabelle 38	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sonnenblume (Versuch 2).....	68
Tabelle 39	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Mais (Versuch 2)	69
Tabelle 40	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sudangras (Versuch 2).....	69
Tabelle 41	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sommerraps (Versuch 2)	70
Tabelle 42	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Zuckerhirse (Versuch 2)	70
Tabelle 43	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sommergerste (Versuch 2)	71
Tabelle 44	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Triticale (Versuch 2)	71
Tabelle 45	Pflanzliche Inhaltsstoffe von Energiegras (Versuch 2).....	72
Tabelle 46	Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 2).....	75
Tabelle 47	C:N:P:S-Verhältnisse und C/N-Verhältnisse der untersuchten Fruchtarten (Versuch 1)	102
Tabelle 48	C/N-Verhältnis und C:N:P:S-Verhältnis des Energiegrases (n=5) über 3 Versuchsjahre (Versuch 1).....	103
Tabelle 49	C:N:P:S-Verhältnisse und C/N-Verhältnisse der untersuchten Fruchtarten (Versuch 2)	110
Tabelle 50	C/N-Verhältnis und C:N:P:S-Verhältnis des Energiegrases von (n=3) über 2 Versuchsjahre (Versuch 2)	111

Tabelle 51	Methanausbeuten in l/kg oTS der angebauten Fruchtarten von Versuch 1 und 2	113
Tabelle 52	Mittelwerte der Biogas- und Methanausbeuten in m ³ /ha der angebauten Fruchtarten im Versuch 1 (sortiert nach Biogasausbeuten).....	114
Tabelle 53	Simulierte langjährige mittlere Restdurchsickerungsmengen der Varianten – Vergleich zwischen normalen/extremen Nass- und Trockenjahren	121
Tabelle 54	Häufigkeit des Austrocknungsverhaltens der Varianten	122
Tabelle 55	NO ₃ -N und NH ₄ -N-Frachten des Sickerwassers bei Energiegrasanbau im Vergleich gemessener sowie modellierter Werte (Versuch 1)	127
Tabelle 56	Schwermetallgehalte im Sickerwasser (einmalige Probenahme, Versuch 1).....	131
Tabelle 57	Kumulierte Sickerwassermenge der Varianten (Versuch 2)	132
Tabelle 58	Kumulierte Sickerwassermengen innerhalb von 16 Monaten (Mai 2008 bis August 2009, Versuch 2).....	133
Tabelle 59	NO ₃ -N, NH ₄ -N-Frachten der Varianten nach angebauten Fruchtarten (Versuch 2).....	134

1 Einleitung und Problemstellung

Die stoffliche Verwertung von Klärschlamm kann sowohl in der Landwirtschaft als auch im Landschaftsbau erfolgen. Klärschlamm wird im Recht der Europäischen Union als Abfall eingestuft. Neben wertgebenden Eigenschaften in Form von Nährstoffen sind die Schadstoffe als Schwermetalle bzw. organische Verbindungen (PCB, PCDD, AOX) zu berücksichtigen. Für einen umweltgerechten Einsatz in der Landwirtschaft gilt als Rechtsgrundlage die AbfKlärV (1992). Im Entwurf der neuen AbfKlärV (2010) wird neben der Qualitätssicherung des Klärschlammes dessen Hygienisierung gefordert. Ein mögliches Verfahren stellt die Kompostierung dar. Mit Strauchwerk, Holz und Grünschnitt kompostierter Klärschlamm (KSK) weist bezüglich des Wasserspeichervermögens und der Nährstoffverfügbarkeit andere Eigenschaften als Klärschlamm auf. Daraus resultieren auch unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten.

Das Ziel des Landschaftsbaues besteht in der Schaffung einer begrünungsfähigen Schicht. Die Anwendungsfälle für den Landschaftsbau sind differenziert und haben unterschiedliche Standortbedingungen zu berücksichtigen. Rekultivierungsflächen, Altlasten, Deponien, Haldenflächen stellen mögliche Einsatzgebiete dar. Um auf diesen Standorten eine begrünungsfähige Schicht zu etablieren, ist strukturell ein Bodensubstrat durch Zumischung von nährstoffreichem organischem Material notwendig.

Bisherige Untersuchungen zum Einsatz von KSK im Landschaftsbau befassten sich mit dem Wasser- und Stickstoffhaushalt (GOMISCEK 1999, RAUCHECKER 2001, TAUCHNITZ 2006, BERNSDORF 2008). Des Weiteren wurde KSK zur Rekultivierung von Bergbaufolgefächern eingesetzt (u.a. KATHKE 2010).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, KSK auf Deponien und Halden zur Schaffung von Wasserhaushaltsschichten im Gemisch mit mineralischem Bodenmaterial aufzubringen. Der Anbau von Energiepflanzen auf diesen Substraten zwecks Nutzung des Nährstoffangebots und Minimierung des Sickerwassers, sowie anschließender energetischer Verwertung in der Biogasanlage, wurde bisher nicht untersucht.

Aufgabe vorliegender Arbeit ist es, am Beispiel von zwei Versuchsanlagen unter Praxisbedingungen die Eignung von KSK für den Anbau von Energiepflanzen zu prüfen. Dabei kamen verschiedene Mächtigkeiten und unterschiedliche Zumischungen von KSK zu mineralischem Bodenmaterial zur Schaffung einer kulturfähigen Schicht zur Anwendung.

Im Einzelnen bestanden folgende Ziele

- Anbau unterschiedlicher für die Biogasverwertung geeigneter Pflanzen mit Nachweis der pflanzlichen Erträge
- Untersuchungen der pflanzlichen Inhaltsstoffe als Grundlage für den Einfluss auf den mikrobiologischen Prozess in der Biogasanlage
- Nachweis der Biogas- und Methanausbeuten
- Einfluß der Energiepflanzen auf die Bodeneigenschaften
- Einfluß der Energiepflanzen auf den Bodenwasserhaushalt

Aus den Ergebnissen sind Schlussfolgerungen für die Anwendung von KSK als Rekultivierungsmaterial für den Anbau von Energiepflanzen zu ziehen. Es werden die Ziele

des Landschaftsbaues mit einer ökonomisch sinnvollen Nutzung durch den Anbau von Energiepflanzen verknüpft. Die Ergebnisse sind grundlagenorientiert und auf andere Standorte übertragbar.

2 Literaturübersicht

Zur Rekultivierung von Deponie- oder Haldenflächen werden zum Aufbau von Wasserhaushalts- bzw. Kulturschichten geeignete Substrate wie KSK benötigt. Diese werden nachfolgend in ihren Eigenschaften eingehend beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt der Betreuung von Deponien und Halden ist das Nachsorgenutzungskonzept. Zu nennende Möglichkeiten sind Naherholungsflächen, Fotovoltaikanlagen, Golfplätze oder auch Windparks (HAUBRICH et al. 2011). Eine weitere denkbare Alternative ist der Anbau von Biomasse in Form von Nachwachsenden Rohstoffen auf den nutzbaren Plateauflächen. Interesse besteht hier für Betreiber, die eine dezentrale Form der Energiegewinnung anstreben. Die wesentlichen Zusammenhänge der Biomassebereitstellung und die Anforderungen an den Vergärungsprozess werden erläutert. Weiterhin werden mögliche Probleme aufgezeigt, die entstehen können, wenn auf KSK angebaute Biomasse in der Vergärung eingesetzt wird.

2.1 Klärschlammaufkommen und -verwendung

Im Jahr 2010 betrug das Klärschlammaufkommen laut Statistischem Bundesamt (2012) in Deutschland 1.887.408 t TM, wovon 13,7 % für den Landschaftsbau mit Rekultivierung und Kompostierung verwendet wurden. In Sachsen-Anhalt wurden bei einem Aufkommen von 60.287 t TM 32,7 % im Landschaftsbau verwertet. In Abbildung 1 sind die einzelnen Verwertungswege mit ihrer prozentualen Verteilung in Deutschland, Sachsen-Anhalt und Thüringen dargestellt.

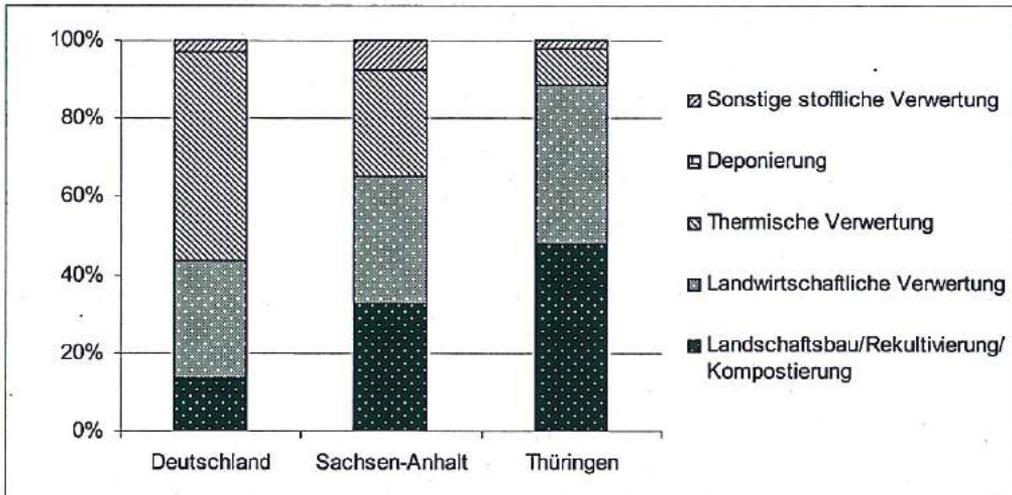


Abbildung 1 Klärschlammverwertung in Deutschland, Sachsen-Anhalt und Thüringen für das Jahr 2010

Eine Einsatzmöglichkeit von KSK im Landschaftsbau stellen Kalirückstandshalden dar. Die Kalihalden im ehemaligen Südharz-Kalirevier können als Ursache für die fortwährende Versalzung von Grund- und Oberflächengewässer genannt werden. Um dem Effekt der Auswaschung entgegen zu wirken, ist nach der Thüringer Kalihaldenrichtlinie (THÜRSTANZ

2002) eine dreischichtige Haldenabdeckung zwingend vorgeschrieben. Die kapillarbrechende Schicht mit Mächtigkeiten bis zu zwei Metern dient als unterste Schicht zur Unterbindung des kapillaren Lösungsaufstieges in die darüberliegenden Schichten. Die konturgebende Schicht soll durch den Einsatz von unbelastetem Bodenmaterial die Oberflächenform der Halde gestalten und ein hohes Wasserspeichervermögen gewährleisten. Als Abdeckschicht fungiert die Kulturschicht, die mit einer Mindestmächtigkeit von 30 cm unter anderem durch geringe Schadstoffbelastung, gute Durchwurzelbarkeit, eine hohe Wasserspeicherfähigkeit und optimale Nährstoffgehalte gekennzeichnet sein sollte. Die N_f -Gehalte richten sich nach dem Bedarf der Folgekultur und dürfen einen Wert von 0,3 % der TM oder einen Gesamtwert von 10.000 kg/ha nicht überschreiten. Auch weist die Richtlinie auf Vorgaben bezüglich des Einsatzes von KS bzw. KSK hin. Unter anderem sind die Schadstoffgehalte nach AbfKlärV (1992) einzuhalten (Tabelle 1).

Tabelle 1 Anforderungen an die Kulturschicht nach Anlage 3 Thüringer Kalihaldenrichtlinie (THÜRSTANZ 2002)

Parameter	Schicht 3 - Kulturschicht	
	Feststoff	Eluat
pH-Wert		6 - 10
EL		1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Σ PAK	15 mg/kg	
Σ PCB	0,5 mg/kg	
As	50 mg/kg	
Pb	300 mg/kg	
Cd	3 mg/kg	
Cr	200 mg/kg	
Cu	200 mg/kg	
Ni	200 mg/kg	
Hg	3 mg/kg	
Zn	500 mg/kg	
Cl		250 mg/l
Sulfat		240 mg/l
Na		250 mg/l

Somit ist ein möglicher Einsatzort für KSK als Kulturschicht auf Kalirückstandshalden genannt. Die Rekultivierung von Haldenflächen war bereits Gegenstand von Untersuchungen. Allerdings spielten neben KSK vorwiegend andere Substrate zur Begrünung eine Rolle (LÜCKE 1997, NIESSING 2005). In einer Studie von STUDE et al. (2002) wurden für Rekultivierungsschichten Mächtigkeiten von mindestens 2 m, der Einsatz geeigneter Materialien wie organische Substrate mit hohem Wasserspeichervermögen und

ein hoher Bedeckungsgrad durch eine Vegetation mit schnellem Anwuchs und hohem Wasserverbrauch empfohlen.

Das Rekultivierungssubstrat KSK wird ebenso zum Aufbau von Rekultivierungsschichten auf Deponien verwendet. Diese müssen je nach ihrer Funktion eine Mindestmächtigkeit von 1m und eine nFK von 140 mm aufweisen. Das geltende Recht wird durch die „Vereinfachung der Verordnung des Deponierechts“ (BUNDESGESETZBLATT 2009) umgesetzt. In Anhang 3 dieser Verordnung sind die Zuordnungswerte für die Erfüllung der Kriterien der Rekultivierungsschicht dargestellt.

2.2 Eigenschaften von Klärschlammkomposten

KSK entstehen bei der aeroben Kompostierung von bereits behandeltem kommunalen Klärschlamm in der Mischung mit gleichem Volumenanteil von Strukturmaterial wie Holz, Rinde oder Grünschnitt bis zu Rottegraden von IV und V. Kompostierung bezeichnet den Begriff des biologischen Umsetzungsprozesses durch Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen (BIDLINGMAIER 2000). Es wird das Ziel verfolgt, ein Bodenverbesserungsmittel herzustellen (KRANERT 2000). Nach drei bis vier Monaten liegt eine genügend stabile OS-Fraktion bei der Kompostierung von KS vor (FRANCOU et al. 2005). In der Literatur werden Möglichkeiten aufgezeigt, um den N-Verlust während des Kompostierungsprozesses zu verringern (HUA et al. 2009). Des Weiteren spielen häufig Zusatzstoffe bei der Kompostierung eine Rolle, um den Prozess effektiver ablaufen zu lassen und die N-Verfügbarkeit zu erhöhen (z.B. DOUBLET et al. 2011). Die Kompostierung mindert die Gefahr phytotoxischer Substanzen (PASCUAL et al. 1997). Laut ZORPAS et al. (2000) ist für die Kompostqualität der Gehalt an anorganischem N entscheidend. Dieser sollte bei Einsatz einen Wert von 10 % des N_i nicht überschreiten. In einem Inkubationsexperiment mit verschiedenen Stufen der Kompostierung von KS wurden die höchsten NO_3 -N-Konzentrationen in ausgereiftem KSK nach 70 Tagen gefunden, dabei lagen 20 % des N_i als N_{min} vor. Dies entspricht einer Nettomineralisierungsrate von 8 %. Die Mineralisierung von N im Boden sinkt mit steigenden Rottegraden. Bei unausgereiftem Kompost besteht das Problem, dass die leicht umsetzbare C_{org} -Fraktion zur N-Immobilisierung führt. Weiterhin betrug die C-Mineralisierung 20 % in 70 Tagen (BERNAL et al. 1998).

Wertgebende Eigenschaften eines KSK sind bodenphysikalischer, -chemischer und ebenso -biologischer Natur. Hinsichtlich der bodenphysikalischen Eigenschaften ist bekannt, dass KSK eine Steigerung der FK bewirken (GOMISCEK 1999, AGGELIDES und LONDRA 2002, FUCHS et al. 2004, HUBER-HUMER 2004). Allerdings ist bei den genannten Autoren die Wirkung auf die nFK umstritten. Des Weiteren wird ein Einfluss auf die Porengrößenverteilung und die Bodendichte deutlich, die wiederum den Wasserhaushalt entscheidend beeinflussen (PINAMONTI 1998, OJEDA und ALCANIZ 2010, SONG und LEE 2010). Vergleichend seien auch Untersuchungen zu Abfallkomposten genannt, die ebenfalls einen positiven Einfluss auf den Wasserhaushalt von Böden ausüben können von GAGNON et al. (1998), MAMO et al. (2000) sowie HAUBOLD-ROSAR und SCHNEIDER (2005).

Eine Versauerung des Bodensubstrates durch den Einsatz von KSK wurde von BAVEYE et al. (1999) beobachtet, während HUANG und CHEN (2009) einen pH-Wert-Anstieg nachwiesen.

Das Problem der Salzzakkumulation wurde von TESTER und PARR (1983) erkannt. Im KSK vorhandene Salze können den Abbau des Kompostes, wenn er in den Boden eingebracht wird, verhindern. Durch erhöhte Salzgehalte wurden steigende Leitfähigkeiten von CASADO-VELA et al. (2006) und HUA et al. (2008) nachgewiesen. Dabei korrelierte die Leitfähigkeit mit der zugegebenen KSK-Menge. Dies wurde auch für KS bestätigt (VEREESH et al. 2003).

Ebenso stieg der Gehalt an organischer Substanz mit Beimengung an KSK an (AGGELIDES und LONDRA 1999, MORENO et al. 1999, KORBOULEWSKY et al. 2002, SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA 2002, MC BRIDE et al. 2004, SONG und LEE 2010). Auch KS in unkompostierter Form trug zu einer Verbesserung des Humusgehaltes bei (STAMATIADIS et al. 1999). Weiterhin wurde auf Auswirkungen auf C_{mic} in Studien von BRAGATO et al. (1998), ROS et al. (2006) sowie SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA (2006) hingewiesen, die eine Erhöhung durch KSK-Beimengung feststellen konnten.

Vorwiegend beschäftigten sich die Untersuchungen zu KSK mit dem N-Haushalt. Hauptsächlich wurde eine Zunahme von N_t nachgewiesen (ZAMAN et al. 2002, ROS et al. 2006, SONG und LEE 2010). Wichtig sind außerdem Literaturhinweise über die N-Mineralisierung. Mineralisierungsraten von 6 % wurden von TESTER et al. (1977) festgestellt. HERNÁNDEZ-APAOLAZA et al. (2000) konnten eine Mineralisation von 26,6 % des N_{org} analysieren. Bodenähnliche Nettomineralisierungsraten unterstellten EPSTEIN et al. (1977). Indes wurden bei Verwendung von KSK häufig auch geringe bis negative N-Mineralisierungsraten festgestellt (SIMS 1990, ZAMAN et al. 2002, FRANCOU 2003, WARMAN und TERMEER 2005b). Auch BELTRÁN et al. (2002) attestierten KSK, ein Dünger mit langsamer Wirkung zu sein. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2007) gibt Mineräldüngeräquivalente der N-Wirksamkeit für Bioabfallkompost kurzfristig in Höhe von 0-20 % und langfristig von 20-30 % an, während bei Klärschlamm (dick) Angaben von 40-50 % (kurzfristig) und 50-60 % (langfristig) gemacht werden. Ähnliche Mineralisierungsraten von 2-6 % wurden auch für kommunalen Abfallkompost bzw. Bio-/Grünkompost festgestellt (MAMO et al. 1999, DEBOSZ et al. 2002, HAUBOLD-ROSAR und GAST 2005). Allerdings liegt die Mineralisierungsrate von reinem KS bedeutend höher. In der Literatur finden sich Werte von 17 bis 48,4 % (GARAU et al. 1991, HE et al. 2000, DEBOSZ et al. 2002, HERNÁNDEZ et al. 2002, HAUBOLD-ROSAR und GAST 2005). Modellierungen über die N-Mineralisierung in verschiedenen Komposten sind von NENDEL et al. (2007) bekannt. Zum Thema N spielen natürlich auch die Treibhausgase eine Rolle. Untersuchungen zum N_2O -Austrag aus mit KSK gedüngten Flächen wurden von INUBUSHI et al. (2000) getätigt. Dabei hatte der Bodentyp, die verwendete Menge an KSK und auch der Gehalt an OS entscheidenden Einfluss. Auch sind Forschungsergebnisse zur Bildung von NH_3 durch den Einsatz von KSK bekannt. Je geringer der Reifegrad des Kompostes, umso höhere Mengen an NH_3 werden emittiert und vermindern somit das Pflanzenwachstum (KATAYAMA et al. 1985). Als Emissionsquelle gilt jedoch auch KS (SHEPHERD 1996, EGIARTE et al. 2006). Des Weiteren sind zum Thema Treibhausgase Untersuchungen von HUBER-HUMER (2004) bekannt.

Anreicherungen anderer Nährstoffe wie K, Mg und P wurden ebenfalls bei einer Zugabe von KSK im Bodenhorizont festgestellt (LARCHEVÉQUE et al. 2006). Ähnliches gilt auch für Abfallkompost und KS (KIDD et al. 2007, WEBER et al. 2007).

Ein anzusprechendes Problem sind die Schadstoffgehalte, insbesondere die Gehalte an Schwermetallen. Hier sind die Einsatzmenge an KSK, die Herkunft des KS, die Spezifik der

einzelnen Schwermetalle sowie der Kompostierungsprozess entscheidend. HE et al. (2009) stellte heraus, dass die absoluten Mengen an Cu, Zn und Pb während der Kompostierung abnehmen. Nach der aeroben Kompostierung nimmt jedoch die Pflanzenverfügbarkeit ab (ZHENG et al. 2004, AMIR et al. 2005, He et al. 2009). Dennoch ist auch Gegenteiliges bekannt. NOMEDA et al. (2008) wiesen eine Steigerung der Bioverfügbarkeit von Mn, Pb und Zn während des Kompostierungsprozesses von KS nach. Mn und Zn lagen in mobilen Fraktionen vor, währenddessen Cu und Pb stärker gebunden wurden. Ebenso wurde von CAI et al. (2007) der Nachweis der erhöhten Gehalte an Schwermetallen bei der Kompostierung erbracht. Es wurden Steigerungen bis 60 % für Cd, 17 % für Cu, 43 % für Pb und 44 % für Zn festgestellt. Wiederum stellt Zn das Hauptproblem dar, da es vorrangig in austauschbarer Form gebunden wird. In der Literatur werden jedoch diverse Möglichkeiten aufgezeigt, um die Mobilität der Schwermetalle während der Kompostierung zu verringern. Zum Beispiel reduziert die Zugabe von Kalk die Verfügbarkeit von Pb, Cu, Zn und Ni (FANG und WONG 1999, CHIANG et al. 2007). Maßgebend für die Verfügbarkeit nach der Ausbringung sind auch der pH-Wert des Bodens und der des eingesetzten KSK. Letztere besitzen meist pH-Werte im neutralen bis alkalischen Bereich. Weiterhin führen sie dem Boden hohe Humusmengen zu, die die Schwermetallbindung verstärken. Schwermetalluntersuchungen in Verbindung mit KSK sind zahlreich. Keine Anreicherungen durch die Gabe von geringen Mengen an KSK wurden u.a. von BRAGATO et al. (1998) und KORBOULEWSKY et al. (2002) festgestellt, während PINAMONTI et al. (1997), MC BRIDE et al. (2004), SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA (2006), CASADO-VELA et al. (2007) und HUA et al. (2008) eine Zunahme nachwiesen. Jedoch ist ebenso bei der Verwendung von KS und Abfallkomposten mit einer Erhöhung der Schwermetallgehalte im Boden zu rechnen (OBRADOR et al. 1997, RICHARDS et al. 1998, DELSCHEN 1999, ACHIBA et al. 2002, SCHAECKE et al. 2002).

In Hinsicht auf die Ertragsleistungen der Biomasse, angebaut auf höhermächtigen Schichten aus KSK, ist der aktuelle Forschungsstand begrenzt. Hier sei auf GOMISCEK (1999), RAUCHECKER (2001), LIEBHARD et al. (2004), HUA et al. (2008), WONG und SELVAM (2009) und OSTOS et al. (2008) verwiesen, die eine Steigerung des Pflanzenwachstums feststellten. Durch den Einsatz geringer Mengen von KSK ließen sich ebenfalls Ertragszuwächse verzeichnen (MORENO et al. 1996, WEI und LIU 2005, SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA 2006, LAG et al. 2010). Ähnliches war bei KS und Abfallkompost zu konstatieren (GERZABEK et al. 1998, RAMACHANDRAN und D'SOUZA 1998, MOHAMMAD und ATHAMNEH 2004, HAUBOLD-ROSAR und GAST 2005). Dennoch waren für alle genannten Substrate (KSK, KS, Abfallkompost) auch gegenteilige Angaben über Mindererträge zu finden (MCCOY 1986, SANDERS et al. 1986, OUDEH et al. 2002, WARMAN und TERMEER 2005b, WEI und LIU 2005, ROS et al. 2006, CARBONELL et al. 2009).

Die Inhaltsstoffe von auf KSK angebaute Biomasse wurden u.a. von TESTER et al. (1982), FALAHI-ARDAKANI et al. (1987), PICTEL und ANDERSON (1997), PLANQUART et al. (1999), WEN et al. (1999), RAUCHECKER (2001), DELGADO ARROYO et al. (2002), GARRIDO et al. (2005), CHENG et al. (2007), HUA et al. (2008) und IPPOLITO et al. (2010) untersucht. Wiederum waren hauptsächlich Angaben bei niedrigen Einsatzmengen an KSK vorzufinden. Den Schwerpunkt der Publikationen bildete die Aufnahme der Schwermetalle in diverse Pflanzen.

Untersuchungen zum Stoffaustrag aus Wasserhaushaltsschichten aus KSK wurden von LÜCKE (1997), GOMISCEK (1999), HUBER-HUMER (2004), LIEBHARD und WRIESSING (2005) sowie TAUCHNITZ (2006) durchgeführt. Es finden sich bei diesen Autoren Angaben über die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser in einer weiten Spanne von 126 bis 7000 mg/l. Wesentliche Faktoren sind die Einsatzmenge an KSK und der Zeitpunkt der Untersuchung nach Ausbringung des KSK. Im zeitlichen Verlauf wurde vorwiegend eine Abnahme der Konzentrationen nachgewiesen. Aus diesen Konzentrationen berechneten sich aus angegebener Literatur in Abhängigkeit vom Bewuchs maximale $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten bis 603 kg/ha innerhalb von zwei Jahren. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen bzw. Frachten bewegten sich bei genannten Autoren auf niedrigerem Niveau. In diesen Untersuchungen finden sich ebenso Angaben über die Sickerwassermenge. GOMISCEK (1999) und TAUCHNITZ (2006) wiesen durch KSK-Einsatz eine deutliche Reduzierung der Sickerwassermengen nach. Diese war abhängig von der Zumischungshöhe an KSK, der Schichtmächtigkeit und dem Bewuchs. Weiterhin sind in der Literatur Hinweise zu Sickerwasserqualitäten und -mengen bei geringen Einsatzmengen an KSK, KS und kommunalem Abfallkompost zu finden, die geringere Konzentrationen und Frachten an N-Parametern bewirken (KELLER und BEDAPUTA 1976, SHEPHERD 1996, KASCHL et al. 2002, LIEBMANN et al. 2004, MANTOVI et al. 2005, CORRÊA et al. 2006).

2.3 Biogasgewinnung

Abhängig vom Trockensubstanzgehalt der eingesetzten Materialien wird zwischen Trocken- und Nassfermentation unterschieden. Von Nassfermentation wird gesprochen, wenn der TS-Gehalt zwischen 10 und 13 % liegt, während bei der Trockenfermentation mindestens Werte von 20 % erforderlich sind. Hierbei können allerdings nur feste Substrate in einem diskontinuierlichen Verfahren eingesetzt werden (WEILAND 2006). Das Verfahren hat geringe Prozessstabilität, jedoch werden höhere Biogasraten erzielt (MÄHNERT 2007).

2.3.1 Grundlagen der Vergärung

Die Vergärung läuft in vier anaeroben Teilprozessen ab, deren Resultat die Bildung von Biogas darstellt (Abbildung 2). Beim ersten Schritt, der Hydrolyse, werden Kohlenhydrate, Proteine und Fette in niedermolekulare Verbindungen gespalten. Die folgende Versäuerungsphase hat das Ziel, mit Hilfe fakultativ anaerober Bakterien organische Säuren, wie auch Alkohole zu bilden. Während der Acetogenese werden flüchtige und langkettige Fettsäuren in Acetat umgewandelt (BISCHOFBERGER et al. 2005). Die abschließende Methanogenese dient der Methanbildung, wobei nur einige wenige Bakterien die in der acetogenen Phase gebildete Essigsäure umsetzen können. Ziel ist eine möglichst hohe Gasausbeute. Die mittlere Zusammensetzung des Biogases ist laut REBHAHN (2002) wie folgt: CH_4 (55-75 %), CO_2 (25-45 %), N (3-7 %), H_2S (bis 2 %), H (bis 1 %) und O_2 (bis 1 %). Für den Lebensraum der Bakterien müssen günstige Bedingungen wie ein optimales Temperaturniveau, angepasste pH-Werte, niedrige Redoxpotentiale, Luft- und Lichtabschluss geschaffen werden (KALTSCHMITT et al. 2009, MÄHNERT 2007).

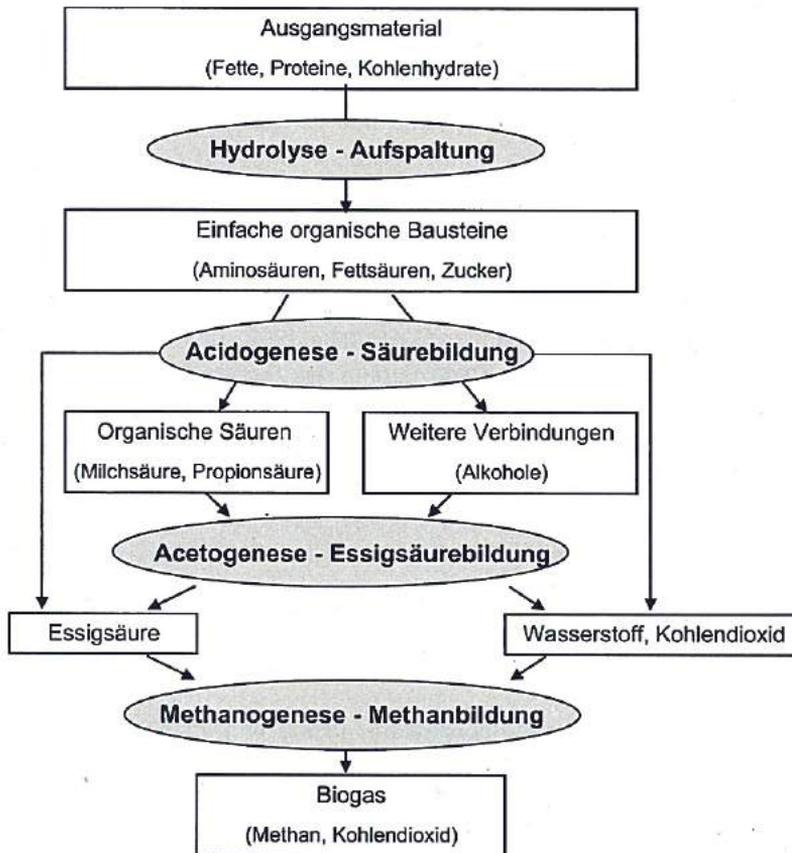


Abbildung 2 Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus (modifiziert nach FNR 2006, KALTSCHMITT et al. 2009)

Nährstoffversorgung

Es ist auf eine optimale Nährstoffversorgung im Biogasprozess zu achten. Als essentielle Nährstoffe für die an der Methanbildung beteiligten Bakterien gelten N, P und S. Die benötigte Menge ist artspezifisch. Die Bakterien bestehen zu 50 % aus C, 11 % aus N, 2 % aus P und 1 % aus S in der TM (BISCHOFBERGER et al. 2005). Demzufolge ist das C/N und das C:N:P:S Verhältnis der pflanzlichen Biomasse von hoher Relevanz für die Vergärung. Das C/N Verhältnis sollte sich zwischen 10 und 30 bewegen (KTBL 2006). DEUBLEIN und STEINHAUSER (2008) grenzten diesen Wert auf 16:1 bis 25:1 ein und wiesen darauf hin, dass dies nur ein Indiz für Umsetzungsprozesse darstellt, da der N ebenso in Lignin gebunden sein kann. Ist der Wert zu hoch, finden die Umsetzungsprozesse nicht in dem gewünschten Umfang statt, da die Kohlenstoffquelle nicht ausreichend genutzt werden kann. Bei zu niedrigen Werten herrscht ein N-Überschuss und führt durch NH_4 -Bildung zu toxischen NH_3 -Konzentrationen, die Bakterien hemmen. Die NH_3 -Bildung steigt mit hohen pH-Werten und Temperaturen. Die tolerierbare Konzentration wird mit 5 g/l N angegeben. Oberhalb kann die Methanausbeute um 25 % reduziert sein (BORJA et al. 1996). Das C:N:P:S-Verhältnis liegt

nach KTBL (2006) in einem Optimalbereich von 500:15:5:3, während KALTSCHMITT et al. (2009) ein C:N:P-Verhältnis von 100 bis 200 : 4 : 1 angeben. Bei OHLY (2006) findet man die Angabe, dass die Bakterien der Methangärung mehr Kohlenstoff benötigen und deswegen ein Verhältnis von 600:15:5:3 günstig ist. Dies gewährleistet eine optimale Versorgung der für den Abbauprozess nötigen Bakterien. Die erforderliche Konzentration an Mikronährstoffen wird mit 0,05 bis 0,06 mg/l angegeben (WEILAND 2010). Ein zu hoher S-Gehalt führt zur Bildung von H₂S (KTBL 2006). Ein Grund hierfür sind hohe Proteingehalte im Ausgangssubstrat.

Weiterhin kann der Erntetermin den Gehalt an Nährstoffen in der TS bestimmen. Je später der Termin gewählt wird, desto geringer sind die Konzentrationen in Bezug auf die TS (RÖHRICHT und ZANDER 2008). Falls die Ca-Konzentration 500 mg/l übersteigt, wirkt sich dies positiv durch die Bildung eines Mikrofilms aus. Allerdings kann ein zu schnelles Wachstum eintreten in dessen Folge der Prozess ins Negative umschlägt. (DEUBLEIN und STEINHAUSER 2008). Des Weiteren werden als essentielle Spurenelemente für die Vergärung Ni, Co, Mo, Fe, Se und W gesehen. Acetogene Bakterien benötigen zusätzlich ausreichende Mengen an Zn, Cu und Mn. Ein Mangel an diversen Elementen kann zur Reduzierung der Abbaugeschwindigkeit führen (BISCHOFBERGER et al. 2005). Hingegen wurde von PREIBLER et al. (2009) aufgrund von Untersuchungen diverser Gärsubstrate konstatiert, dass die Bestimmung der Nährstoffe der Ausgangssubstrate noch keine eindeutigen Hinweise auf die Mineralstoffkonzentrationen im Fermenter geben kann.

Hemmstoffe

Spurenelemente können im Biogasprozess stimulierend wirken, da sie für den Stoffwechsel der Bakterien essentiell sind. Allerdings kann ein Überschuss an Makro- und Spurenelementen ebenso eine Hemmung der Vergärung hervorrufen. Die Hemmung ist abhängig von der Konzentration der Störstoffe, der Zusammensetzung des Substrats und hauptsächlich von der Fähigkeit der Bakterien zur Adaptation (DEUBLEIN und STEINHAUSER 2008). Hohe Nährstoffkonzentrationen sind im Biogasprozess ebenso unerwünscht. So besteht die Rohasche der Energiepflanzen zur Hälfte aus den Elementen P, K, Ca, Mg, Na, S und Cl (STÜLPNAGEL et al. 2009). Da beim Einsatz von KSK die Möglichkeit der Aufnahme von erhöhten Nährstoffkonzentrationen und Schwermetallen in die Pflanzen und somit auch das Eintreten dieser in den Biogasprozess besteht, soll im Folgenden auf hemmende Wirkungen dieser Parameter während der Vergärung eingegangen werden. Eine Zusammenstellung findet sich bei KALTSCHMITT et al. (2009), die auf uneinheitliche Angaben infolge der Unterschiede u.a. im Fermentertyp und in der Fahrweise hinweisen. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Hemmstoffkonzentrationen zusammengestellt.

Des Weiteren können sich Stoffe wie flüchtige Säuren, Desinfektionsmittel oder Antibiotika hemmend auswirken. Die Hemmwirkungen werden häufig durch den pH-Wert und die Temperatur beeinflusst. Mit sinkenden pH-Werten steigt z.B. die Hemmwirkung von H₂S an, während steigende pH-Werte und Temperaturen negativen Einfluss auf den NH₄-N-Gehalt besitzen (WEILAND 2003a,b). Schwermetalle wirken nur in gelöster Form hemmend, können jedoch durch Sulfidfällung neutralisiert werden (FNR 2006, KAISER et al. 2007).

Tabelle 2 Hemmstoffkonzentrationen bei der anaeroben Vergärung (Zusammenstellung nach KALTSCHMITT et al. 2009, FNR 2006)

Parameter	Schadkonzentration		
	g/l	als freies Ion in Carbonatform mg/l	
Na	6,0 - 30,0		
K	3,0		
CaCl ₂	2,8		
MgCl ₂	2,4		
NH ₄ -N	2,7 - 10,0		
NH ₃	0,2		
H ₂ S	0,05		
Ni		10	
Cu		40	170
Cr		130	530
Pb		340	
Zn		400	160
Fe			1750

2.3.2 Biogas- und Methanausbeuten einzelner Fruchtarten

In Tabelle 3 sind einige in der Literatur angegebenen Biogas- und Methanausbeuten der wesentlichen Fruchtarten, die in den Versuchen dieser Arbeit betrachtet werden, dargestellt. Der Vergleich der einzelnen Ergebnisse war problematisch, weil verschiedene Bezugsbasen verwendet wurden. Am gebräuchlichsten ist der Bezug auf oTS, die auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit ihre Anwendung findet. Oft sind in der Literatur nur Angaben über die Biogasausbeuten gegeben, jedoch ist insbesondere der Methangehalt für die Energiegewinnung bedeutsam (KAISER 2007).

Tabelle 3 Biogas- und Methanausbeuten diverser Fruchtarten (Zusammenstellung nach AMON et al. (2005, 2007), BAUER et al. (2010), CONRAD und BIERTÜMPFEL (2007), FNR (2010), HEIERMANN et al. (2009a, b), KAISER (2007), KTBL (2006), MÄHNERT et al. (2002), RÖHRICHT und ZANDER (2008), SCHUMACHER (2008), STRAUß et al. (2010), STÜLPNAGEL et al. (2009))

	Biogas	Methan
	l/kg oTS	
Ackergras bzw. Grünland	560 - 700	294 - 302
Gerste	432 - 633	189 - 360
Hafer	549	293
Mais	567 - 673	300 - 390
Raps	435	
Roggen	520 - 559	270 - 320
Senf		
Sonnenblume	498 - 630	268 - 345
Sudangras	460 - 552	280 - 286
Triticale	520 - 652	270 - 340
Weizen	500 - 567	189 - 299
Zuckerhirse	450 - 549	273 - 291

Neben den Gehalten an Rohnährstoffen der einzelnen Pflanzen spielten andere Einflussfaktoren wie Standort, Witterung, Anbauregime, Sorte, Erntetermin, Anzahl der Schnitte (z.B. bei Gras oder Sudangras), Konservierung und die Verweilzeit im Fermenter eine entscheidende Rolle (HEIERMANN et al. 2009).

Wie in diesem Kapitel deutlich wurde, liegen nur wenige Forschungsergebnisse bezüglich des Einsatzes von KSK als Rekultivierungssubstrat von Haldenflächen vor. Vorwiegend fanden sich in der Literatur Erkenntnisse über die Verwendung von geringen Einsatzmengen an KSK, die hauptsächlich auf die Landwirtschaft zielten. Es wurde von den verbesserten bodenphysikalischen Ergebnissen und der positiven Nährstoffwirkung ebenso berichtet wie von Schadstoffpotentialen des Substrates. Es fanden sich nur vereinzelt Hinweise zum Wasserhaushalt und den N-Austrag aus diesen Rekultivierungsschichten. Der Einfluss von KSK auf die Erträge und Inhaltsstoffe von Pflanzen wurde hauptsächlich nur bei niedrigen Einsatzmengen geprüft. Es fehlten jedoch grundlegende Angaben über den Einsatz von KSK als Rekultivierungsschicht, die dem Anbau von Energiepflanzen dient. Demzufolge lieferten die vorgestellten Quellen auch kaum weitergehende Hinweise über den Einfluss von auf KSK angebauter Biomasse auf den Vergärungsprozess in Biogasanlagen sowie über Berechnungen zu möglichen Biogas- und Methanausbeuten. Diese Zusammenhänge zwischen Rekultivierungsschichten aus KSK, Energiepflanzen und dem Vergärungsprozess darzustellen, ist Aufgabe der vorliegenden Arbeit.

3 Material und Methoden

3.1 Versuch 1

Standort des Versuchs war ein Plateau auf der Kalirückstandshalde der GSES - Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH. Sondershausen befindet sich im nördlichen Thüringen (51° westliche Länge, 24° nördliche Breite) und ist gekennzeichnet durch einen durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 596 mm (BRUMME 2007). Die Halde liegt auf einer geodätischen Höhe von 230 m NN. In Sondershausen wurden bis 1991 bergbaulich Kalirohsalze für die Düngemittelproduktion nach dem Heißlöseverfahren gefördert. Die seit dem Jahr 1975 aufgehaldeten Rückstände nehmen mittlerweile eine Fläche von 65 ha mit einem Rückstandsvolumen von 27.000.000 m³ ein. Die Rückstände bestehen zu 70 % aus Natriumchlorid. Weitere Bestandteile sind u.a. Calcium- und Magnesiumsulfate (BRUMME 2007). Aufgrund der hohen Wasserlöslichkeit der chloridischen und sulfatischen Salze können diese bei einem Jahresniederschlag von 596 mm in den angrenzenden Oberflächen- und Grundwässern wiedergefunden werden. Der durchschnittliche jährliche Austrag ist mit 339 g Salz / l Haldenlösung angegeben.

Die Anlage des Versuches erfolgte im Juli 2007. Es wurde eine Kulturschicht aus einem Gemisch aus KSK und Bodenmaterial aufgebaut. Der KSK wurde von der Firma GEMES Abfallentsorgung und Recycling GmbH Schöngleina geliefert. Dieser stammte aus acht verschiedenen kommunalen Kläranlagen. Es wurde im speziellen Fall zur Kompostierung nur Holz untergemischt und keine Hilfs- bzw. Zusatzstoffe eingesetzt. Die Lagerungsdauer betrug ein Jahr. Das zugemischte Bodenmaterial ist in Abhängigkeit von der angelieferten Charge als leicht- bzw. mittellehmiger Sand zu klassifizieren. Die Feinbodenanteile sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4 Textur der verwendeten Böden als Zumischungsmaterial (Versuch 1)

Variante	gS	mS	fs	gU	mU	fU	T	Bodenart
	> 630 µm	>200 µm	> 63 µm	> 20 µm	>6,3 µm	> 2 µm	< 2 µm	
Anteile an Feinboden in Gew%								
70 cm Mächtigkeit	10,0	38,1	36,7	1,5	4,3	1,1	8,3	SI2
100 cm Mächtigkeit	14,9	23,3	28,3	12,5	7,2	2,3	11,5	SI3

Die Mischung der Komponenten (KSK und sandiges Bodenmaterial) erfolgte praxisüblich vor Ort mit Hilfe von Radladern nach Volumenanteilen. Die chemischen Eigenschaften der Varianten zu Versuchsbeginn im Juli 2007 sind in der Tabelle 5 dargestellt. Die gesetzlichen Grenzwerte gemäß AbfKlärV in Bezug auf die Schwermetallgehalte wurden eingehalten.

Tabelle 5 Chemische Eigenschaften des verwendeten KSK und der Varianten (Versuch 1)

Parameter		Zumischung KSK [Vol%]			
		0	50	75	100
Nährstoffe					
Mg	mg/100g	22,3	78,1	74,3	191,0
K	mg/100g	26,9	101,0	99,0	139,0
P	mg/100g	4,4	74,9	83,4	151,0
C _t	%	0,46	6,61	5,96	19,88
N _t	%	0,02	0,41	0,34	1,05
Schwermetalle					
As	mg/kg	5,2	5,3	5,2	4,4
Pb	mg/kg	9,5	22,0	18,0	43,0
Cd	mg/kg	<0,1	0,18	0,17	0,5
Cr	mg/kg	49	48	48	77
Cu	mg/kg	11	37	35	87
Ni	mg/kg	33	23	29	20
Hg	mg/kg	0,01	0,05	0,05	0,21
Zn	mg/kg	86	150	170	310
Organische Schadstoffe					
Summe PCB	mg/kg	n.n.			n.n.
Summe PCDD/PCDF	ng TE/kg	0,1			10
Summe PAK	mg/kg	0,06			1,89
pH		7,8	7,6	7,7	7,5

Es wurde mit zwei verschiedenen Mächtigkeiten (70 und 100 cm) und drei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen (0, 50 und 75 Vol% Zumischung von KSK) gearbeitet. Auf diesen Flächen wurden pro Jahr drei verschiedene Fruchtarten angebaut, die sich unter energetischen Gesichtspunkten zur Verwertung in der Biogasanlage eignen. Als dauerhafte Kultur wurde eine Energiegrasmischung, bestehend aus 6 kg/ha Knautgras (*Dactylis glomerata*), 4 kg/ha Rotschwingel (*Festuca rubra*) und 5 kg/ha Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) ausgewählt. Die weiterhin angebauten Fruchtarten mit Aussaat- und Erntetermin sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Die Aussaat der unterschiedlichen Fruchtarten erfolgte manuell als Breitsaat.

Tabelle 6 Untersuchte Fruchtarten mit Aussaat- und Erntetermin (Versuch 1)

Feld	Fruchtart	Aussaat	Ernte
1	Weißer Senf (<i>Sinapis alba</i>)	August 2007	Oktober 2007
	Weinterweizen (<i>Triticum aestivum</i>)	Oktober 2007	Juli 2008
	Winterraps (<i>Brassica napus</i>)	August 2008	Juli 2009
2	Winterroggen (<i>Secale cereale</i>)	August 2007	
	Nachsaat Winterweizen	Oktober 2007	April 2008
	Sudangras (<i>Sorghum sudanese</i>)	Mai 2008	Oktober 2008
	Mais (<i>Zea mays</i>)	Mai 2009	September 2009
3	Energiegrasmischung	August 2007	2x pro Jahr
	Knautgras (<i>Dactylis glomerata</i>)		
	Glatthafer (<i>Arrhenatherum elatius</i>)		
	Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)		

Aus dieser Versuchsanstellung ergaben sich 18 Varianten mit Parzellengrößen von 189 und 210 m². Es wurden drei Wiederholungen je Variante angelegt. Die daraus resultierende bewirtschaftete Gesamtfläche betrug circa 4000 m². Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 3 skizziert.



Abbildung 3 Versuchsanlage (Versuch 1)

Nachfolgend werden in Tabelle 7 die verwendeten Abkürzungen vorgestellt. Die Felder 1 bis 3 (F1, F2 und F3) werden durch die jeweils entsprechenden Zusätze gekennzeichnet.

Tabelle 7 Versuchsvarianten (Versuch 1)

Mächtigkeit	Zumischungs- parameter	Zumischungs- höhe [Vol%]	Abkürzung
70		0	70cm-0Vol%KSK
70	KSK	50	70cm-50Vol%KSK
70	KSK	75	70cm-75Vol%KSK
100		0	100cm-0Vol%KSK
100	KSK	50	100cm-50Vol%KSK
100	KSK	75	100cm-75Vol%KSK

Aufgrund der sehr geringen Lagerungsdichte der 50 und 75 Vol% KSK-Varianten war ein Befahren mit maschineller Großtechnik nicht möglich. In den folgenden Jahren wurde ein Kleintraktor für die einzelnen Bearbeitungsschritte wie Umbrechen und Grubbern verwendet. Zur Ernte wurden von jeder Variante fünf Quadratmeterproben genommen. Die Frischmasse wurde durch Wägung bestimmt und diente zur Hochrechnung der Hektarerträge. Nach Trocknung der Biomasse bei 105 °C im Trockenschrank wurde zusätzlich die Trockenmasse bestimmt. Um Einschätzungen zur Phänometrie der angebauten Fruchtarten zu treffen, wurden die Wuchshöhen in fünffacher Wiederholung bestimmt, sowie auch die Bestandesdichte und der Unkrautbewuchs beurteilt. Weiterhin wurden zu jeder Ernte Bodenmischproben der einzelnen Parzellen bis zu einer Tiefe von 30 cm gezogen.

Zur Untersuchung des Wasserhaushaltes wurden 36 Sickerwassersammler eingebaut, es wurde mit einer Wiederholung pro Parzelle gearbeitet. Der prinzipielle Aufbau eines Sickerwassersammlers ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Höhe der Sammler betrug je nach Mächtigkeit der Kulturschicht 70 oder 100 cm mit einem Außendurchmesser von 40 cm. Durch ein Anschragen der unteren Fläche wurde ein einseitiger Abfluss des Sickerwassers geschaffen. Das Anbringen eines zusätzlichen zweiten Rohres mit einem Außendurchmesser von 2 cm ermöglichte das Fördern des Eluates mithilfe einer Unterdruckpumpe. Die unteren Zentimeter der Sickerwassersammler waren mit zwei verschiedenen Korngrößen Grobkies befüllt, um die freie Drainage des Sickerwassers zu gewährleisten.

Da jedoch nach einem Versuchsjahr festgestellt wurde, dass Undichtigkeiten an den Sickerwassersammlern vorlagen und Wasser von außen einzudringen vermochte, wurden zusätzlich 12 neue Sammler im März 2009 mit den vergleichbaren KSK-Varianten errichtet und mit Energiegras bestellt. Hier gewährleistete ein differentes Abflusssystem eindeutige Ergebnisse. Die Qualitätsparameter der im Juli 2007 aufgestellten Sickerwassersammler wurden jedoch zur Auswertung herangezogen.

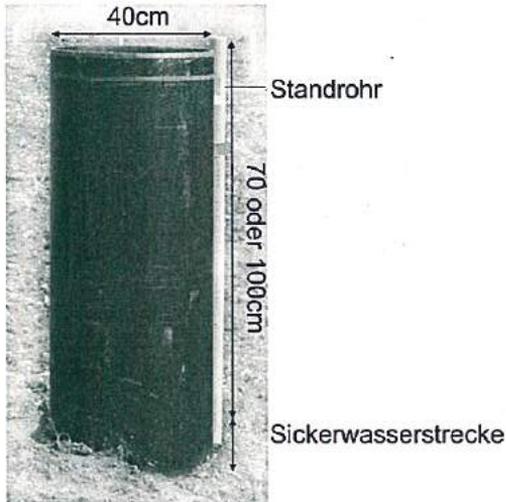


Abbildung 4 Aufbau eines Sickerwassersammlers

Das Sickerwasser wurde monatlich entnommen, ausgelitert und analysiert. Bis zur Analytik wurden die Proben in gefrorenem Zustand aufbewahrt. Der in Sondershausen im Untersuchungszeitraum gefallene Niederschlag ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Niederschlag während des Versuchszeitraumes (Juli 2007 bis Oktober 2009, Versuch 1)

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
	[mm]											
2007							57,3	56,4	110,7	12,8	51,7	32,6
2008	35,2	16,5	55,1	97,6	16,3	78,9	51,0	56,9	31,0	51,4	19,1	47,9
2009	17,4	41,4	52,1	73,3	97,2	48,0	74,3	32,3	34,1	55,3		

3.2 Versuch 2

Um ein breiteres Spektrum an Rekultivierungsmaterialien und Energiepflanzen untersuchen zu können und Aussagen über deren Nutzung in der Ganzpflanzenvergärung zu treffen, wurde ein zusätzlicher Biomasseversuch von Mai 2008 bis August 2009 angelegt. Dieser Feldversuch wurde bei dem Unternehmen ROMONTA GmbH in Amsdorf aufgebaut.

Der verwendete KSK wurde von der Firma GEMES angeliefert. Als mineralisches Zumischungssubstrat diente jeweils ein sandiges Bodenmaterial, dessen Textur der Tabelle 9 zu entnehmen ist.

Tabelle 9 Textur des verwendeten Bodens als Zumischungsmaterial (Versuch 2)

gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	Bodenart
> 630 µm	>200 µm	> 63 µm	> 20 µm	>6,3 µm	> 2 µm	< 2 µm	
Anteile an Feinboden in Gew%							
17,4	59,2	10,5	3,5	2,3	1,2	5,9	Ss

Die chemischen Eigenschaften (Nähr- und Schadstoffparameter) des eingesetzten Rekultivierungsmaterials sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Chemische Eigenschaften des verwendeten KSK und der Varianten (Versuch 2)

Parameter	Zumischung KSK [Vol%]				
	0	50	75	100	
Nährstoffe					
Mg	mg/100g	3,0	9,4	24,2	10,3
K	mg/100g	2,5	5,9	10,1	68,4
P	mg/100g	2,0	13,5	55,5	25,1
C _t	%	0,34	0,59	2,08	1,75
N _t	%	0,01	0,03	0,17	0,19
Schwermetalle					
As	mg/kg	2,3	3,7	4,2	3,1
Pb	mg/kg	3,3	4,9	18,3	7,6
Cd	mg/kg	0,031	0,052	0,203	0,076
Cr	mg/kg	4,2	5,1	9,7	6,4
Cu	mg/kg	3,3	5,7	23,9	8,2
Ni	mg/kg	4,2	4,1	6,5	5
Hg	mg/kg	0,003	0,012	0,029	0,005
Zn	mg/kg	12	25	124	40
pH		7,7	7,5	7,5	7,1

Es wurden drei verschiedene Varianten angelegt. Die Vergleichs- beziehungsweise Nullvariante bestand aus sandigem Bodenmaterial (Ss) und wurde mit 10 t/ha KSK nach der AbfklärV belastet. Zwei weitere wurden mit KSK in Zumischungshöhen von 50 und 75 Vol% versehen. Die jeweiligen Varianten wiesen eine Parzellengröße von 10x2 m mit einer Mächtigkeit von 1 m auf, die in fünf Felder unterteilt wurden. Pro Jahr konnten somit fünf unterschiedliche Fruchtarten untersucht werden. Der gesamte Versuchsumfang kann folglich

mit 15 Parzellen angegeben werden. Die angebauten Fruchtarten mit Aussaat- und Ernteterminen sind der nachfolgenden Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11 Untersuchte Fruchtarten mit Aussaat- und Erntetermin (Versuch 2)

Feld	Fruchtart	Aussaat	Ernte
1	Sonnenblume (<i>Helianthus annuus</i>)	April 2008	September 2008
	Raps (<i>Brassica napus</i>)	April 2009	September 2009
2	Mais (<i>Zea mays</i>)	April 2008	September 2008
	Zuckerhirse (<i>Sorghum bicolor</i>)	April 2009	September 2009
3	Sudangras (<i>Sorghum sudanese</i>)	April 2008	Oktober 2008
	Sommergerste (<i>Hordeum vulgare</i>)	April 2009	August 2009
4	Hafer (<i>Avena sativa</i>)	April 2008	August 2008
	Triticale (<i>Triticum secale</i>)	April 2009	August 2009
5	Energiegrasmischung	April 2008	2x pro Jahr
	Knautgras (<i>Dactylis glomerata</i>)		
	Glatthafer (<i>Arrhenatherum elatius</i>)		
	Rotschwingel (<i>Festuca rubra</i>)		

Analog Versuch 1 wurden auch hier Abkürzungen eingeführt, die in Tabelle 12 dargestellt sind. An die Abkürzungen wurden je nach bewirtschaftetem Feld die Endungen -F1 bis -F5 angehängt. Diese Numerierung ist identisch mit den in der vorangegangenen Tabelle 11 dargestellten Feldern.

Tabelle 12 Versuchsvarianten (Versuch 2)

Mächtigkeit	Zumischungsparameter	Zumischungshöhe [Vol%]	Abkürzung
100		0	Nullv
100	KSK	50	KSK50
100	KSK	75	KSK75

Die Ernte der Biomasse erfolgte manuell, wie auch die gesamte Bearbeitung der einzelnen Parzellen. Die Bestimmung der Erträge und damit die Hochrechnung der Hektarerträge war bei dieser Versuchsanstellung nicht möglich, weil die Flächen für diese Aussage zu klein waren. Die Beurteilung richtete sich auf die Inhaltsstoffe der auf dem Rekultivierungssubstrat gewachsenen Pflanzen. Zusätzlich wurden zu jeder Ernte Bodenproben entnommen und auf Nähr- und Schadstoffparameter, wie auch pH-Werte und Leitfähigkeiten untersucht.

Um auch Aussagen über den Bodenwasserhaushalt treffen zu können, wurden auf dem Julius-Kühn-Feld der Martin-Luther-Universität in Halle zusätzlich zu jeder in Tabelle 12 aufgeführten Variante zwei Sickerwassersammler aufgestellt. Die Sickerwassersammler

besaßen einen Innendurchmesser von 19 cm und eine Höhe von 1 m. Zur Gewährleistung der freien Drainage des Sickerwassers wurde ebenfalls eine Sickerwasserstrecke aus Grobkies eingebaut. Das Wasser wurde in Behältnissen unterhalb des Sammlers aufgefangen und nach Sickerwasserereignissen entleert. Es wurde sowohl die Sickerwassermenge erfasst als auch die Qualität untersucht. In Tabelle 13 sind die Niederschlagsmengen der Station Julius-Kühn-Feld Halle während des Untersuchungszeitraumes dargestellt.

Tabelle 13 Niederschlag während des Versuchszeitraumes (Mai 2008 bis August 2009, Versuch 2)

Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
[mm]												
2008					23,8	53,2	92,4	65,1	53,0	52,2	13,9	41,4
2009	18,9	33,3	61,9	30,1	68,1	64,4	79,6	19,4				

3.3 Vegetationstest und DIN ISO 11274 zur Bestimmung der nFK

Für den Versuchsansatz wurden drei textuell voneinander abweichende Böden verwendet (Tabelle 14). Der jeweilige Boden wurde mit unterschiedlichen Anteilen an KSK (20, 40, 60 und 80 Vol%) versetzt und in Mitscherlichgefäße (5500 cm³) gefüllt. Als Vergleich diente die ungemischte Bodenvariante. Die Versuche wurden in achtfacher Wiederholung (gesamter Versuchsumfang 128 Gefäße) durchgeführt.

Tabelle 14 Textur der verwendeten Böden (Vegetationstest)

gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	Bodenart
> 630 µm	>200 µm	> 63 µm	> 20 µm	>6,3 µm	> 2 µm	< 2 µm	
Anteile an Feinboden in Gew%							
18,9	48,1	28,5	1,1	1,1	1,1	1,2	S
4,6	32,7	31,9	9,4	8,8	7,0	5,6	Su2
2,1	2,1	46,0	11,8	22,1	8,9	7,0	Su4

In Tabelle 15 sind die Glühverluste der einzelnen Bodenarten mit Zumischungsanteilen an KSK dargestellt. Die Glühverluste stiegen aufgrund des höheren Anteils an Kohlenstoff mit zunehmender Zumischung an KSK bei den unterschiedlichen Bodenarten an.

Tabelle 15 Glühverluste der einzelnen Varianten

Bodenart	Glühverlust [%]				
	Zumischung KSK [Vol%]				
	0	20	40	60	80
Ss	2,6	4,7	7,4	19,4	30,9
Su2	4,8	5,7	11,9	17,3	28,8
Su4	7,6	12,3	15,6	40,0	44,0

Nach dreitägiger Aufsättigung der Gefäße im Wasserbad wurde die FK der unterschiedlichen Varianten gravimetrisch bestimmt. Anschließend erfolgte die Aussaat von je drei Sonnenblumensamen der Sorte „Gefüllte Zwerge“. Nach vollständiger Ausbildung der Blüte wurde die Bewässerung eingestellt und die Gefäße täglich bis zum Erreichen des PWP, d.h. bis zum Eintreten der irreversiblen Welke der oberirdischen Biomasse, gewogen. Die ober- und unterirdische Biomasse wurde ebenfalls durch Wägung bestimmt und bei der Berechnung berücksichtigt. Zum Vergleich dieser Ergebnisse mit Laborwerten nach DIN-Vorschrift (DIN ISO 11274) wurden aus den Mitscherlichgefäßen Stechzylinder in dreifacher Wiederholung entnommen. Für die pF-Stufe 1,8 (FK) wurden Stechzylinder mit einem Volumen von 250 cm³ und einer Stechzylinderhöhe von 6 cm eingesetzt. Für die hohe Saugspannung von pF 4,2 (PWP) wurden zur Beschleunigung der Entwässerungszeiten Stechzylinder mit geringer Gefäßhöhe (4 cm, Volumen 100 cm³) genutzt. Die Bodenfeuchtekenwerte der nFK basieren auf der Differenz zwischen FK und PWP. Die Zylinder wurden dafür mit definierten Bodenmengen gefüllt. Der Einbau des Boden-KSK-Gemisches in die Stechzylinder erfolgte mit einer Verdichtungseinrichtung. Die jeweilige Bodenmenge wurde hierfür in die Verdichtungseinrichtung eingefüllt und in die Stechzylinder eingerüttelt bzw. einpresst. Die Entwässerung der Stechzylinderproben erfolgte für die pF-Stufe 1,8 mittels Sandsaugtischmethode (DIN ISO 11274). Bei der hohen pF-Stufe 4,2 wurde die Entwässerung unter Einsatz eines Druckplattenextraktors (DIN ISO 11274) vorgenommen. Die während der Entwässerung der Bodenprobe auftretende Volumenänderung wurde an jeder Stechzylinderprobe eindimensional erfasst. Hierfür wurde die Quellung bzw. die Schrumpfung der Bodenprobe an fünf standardisierten Punkten nach der vollständigen Aufsättigung der Probe mit Wasser und nach der Entwässerung der jeweiligen pF-Stufe ermittelt. Anhand der jeweiligen Quellungs- oder Schrumpfungseignisse wurde der Wassergehalt in der Bodenprobe korrigiert.

3.4 Bodenwasserhaushaltsmodell (BOWAHALD)

Das Modell BOWAHALD berechnet ausschließlich die vertikale Dimension, wobei die horizontalen Faktoren in die folgende Wasserbilanzgleichung einfließen (DUNGER 2002, 2006):

$$P = RO + ETR + RH + RU + DS$$

mit:	P	- Niederschlag
	RO	- Oberflächenabfluss
	ETR	- reale Evapotranspiration
	RH	- lateraler Abfluss (z.B. innerhalb von Drainageschichten)
	RU	- Abfluss an der Basis (Restdurchsickerung)
	DS	- Speicheränderung innerhalb des betrachteten Systems

Da nur langjährige Klimadaten der Wetterstation Artern vorlagen, wurde eine Anpassung an Sondershausen durch Ableitung von monatsvariablen Abgleichfaktoren vorgenommen. Die geodätische Höhe der beiden Orte variiert um 70 m und der mittlere Temperaturunterschied beträgt 0,5°C. In die Modellierung eingehende tägliche Klimaparameter sind mittlere Lufttemperatur, mittlere relative Luftfeuchte, Summe der Globalstrahlung und Niederschlagssumme. In Tabelle 16 sind die für die Modellierung an Sondershausen angepassten mittleren langjährigen Klimawerte (1990 – 2009) dargestellt.

Tabelle 16 Mittlere langjährige Monatswerte für den Standort Sondershausen (1990 – 2009)

Monat		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
T	°C	0,5	1,5	4,6	8,8	13,2	16	18,3	18,2	13,7	8,9	4,3	0,8	9,1
RLF	%	84	81	77	70	72	73	70	69	76	83	87	87	77
GL	J/(cm²d)	265	490	842	1396	1840	1909	1820	1592	1063	624	284	198	1027
P	mm	37,7	33,9	43,2	43,2	53,8	61,5	48,1	56,1	37,8	34,3	44,9	47,5	542,0
P _K	mm	41,5	37,3	47,6	47,5	59,2	67,6	52,9	61,7	41,6	37,7	49,4	52,3	596

Es wurden die Wiederkehrintervalle von normalen bzw. extremen Nass- und Trockenjahren berechnet. Diese liegen bei fünf Jahren für ein normales und 50 Jahren für ein extremes Trocken-/Nassjahr.

Der Wasserhaushalt wurde unter Annahme nachfolgender Parameter, die dem Versuchsaufbau auf der Kalirückstandshalde entsprachen, modelliert. Die Schichtmächtigkeiten lagen bei 70 und 100 cm, die Zumischungen von KSK konnten mit 0, 50 und 75 Vol% angegeben werden. Des Weiteren spielten der Bewuchs und die Bestandsentwicklung eine entscheidende Rolle. Berechnet wurden die Größen nur für die Energiegrasvariante mit Bestandsdichten von 60 % bei der Nullvariante und 95 % bei Zumischung von 50 und 75 Vol% KSK. Die angenommenen Durchwurzelungstiefen wurden mit 1 m bei einer Schichtmächtigkeit von 0,7 m angegeben und erhöhten sich bei der 1 m mächtigen Variante auf 1,3 m.

Die im Modell verarbeiteten Wasserhaushaltsparameter FK, nFK und PWP für die KSK-Varianten wurden mit Hilfe des Sonnenblumenvegetationstests bestimmt. Für die Nullvariante (SI2) wurden Werte aus der Kartieranleitung (KA 5 - AG BODEN 2005) verwandt. Die einzelnen Kenngrößen, wie auch die angenommenen Dichten, sind der Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17 Verwendete Wasserhaushaltsgrößen und Dichten für die Modellierung mit BOWAHALD

KSK Zumischung [Vol%]	Θ_{SAT} [Vol%]	FK [Vol%]	PWP [Vol%]	ρ_t [g/cm ³]
0	43,0	25,0	7,0	1,5
50	64,4	38,4	4,3	1,1
75	71,4	45,4	7,9	0,9

3.5 Untersuchungsmethoden

3.5.1 Rekultivierungsmaterial

Zur Ernte wurden Bodenmischproben der einzelnen Parzellen entnommen, luftgetrocknet und auf <2 mm mithilfe eines schwermetalldfreien Siebes zur Nähr- und Schadstoffanalytik aufbereitet. Es wurden die in der Tabelle 18 dargestellten Untersuchungsmethoden angewandt.

Tabelle 18 Analytikmethoden zur Untersuchung der chemischen Parameter des Rekultivierungsmaterials

Parameter	Methode
TS	DIN ISO 11465
pH-Wert (CaCl ₂)	VDLUFA-Methode A 5.1.1
Salzgehalt	VDLUFA-Methode A 10.1.1
PO ₄ -P, K als K	VDLUFA-Methode A 6.2.1.1
Mg (CaCl ₂)	VDLUFA-Methode A 6.2.4.1
Na, Mg, P, K, Ca, S	Druckaufschluss, Messung: DIN EN ISO 17294-2; 2005
NH ₄ -N, NO ₃ -N	VDLUFA-Methode A 6.1.4.1
N _t	DIN ISO 13 878; 1998-11
C _t	DIN ISO 10 694; 1996-08
Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb	Druckaufschluss, Messung: DIN EN ISO 17294-2; 2005
Hg	Königswasseraufschluss, Messung: DIN EN 13506; 2002-04 (E35)
PCB	DIN ISO 10 832, 2003-05
PCDD / F	DIN 38 414-S24, 2000-10
PAK	DIN ISO 13 877, 1995-06, GC-MSD
Textur	DIN ISO 11277

3.5.2 Biomasse

Zur Bestimmung der Trockenmassen wurden die Proben bei 105°C im Trockenschrank getrocknet. Als nächster Schritt der Probenvorbereitung zur Nähr- und Schadstoffanalytik wurden die Proben gemahlen. Die Analytik der Biomasse erfolgte auf die in der folgenden Tabelle 19 dargestellten Parameter. Um den Biogasertrag bestimmen zu können, fand parallel die Trocknung bei einer Temperatur von nur 65 °C statt.

Tabelle 19 Analytikmethoden zur Untersuchung der Biomasse

Parameter	Methode
TS, oTS	VDLUFA-Methoden, Methodenbuch Band III (1993)
Na, Mg, P, K, Ca, Al, S	Druckaufschluss, Messung: DIN EN ISO 17294-2; 2005
Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser	VDLUFA-Methoden, Methodenbuch Band III (1993)
Cl, NO ₃	§ 64 LFGB L06.00-5, § 64 LFGB:1980-09; Messung nach DIN EN ISO 10304-1:1995-04, IC
Fluorid	VDLUFA-Methoden, Methodenbuch Band III (1993)
N _t	DIN ISO 13 878; 1995-10
C _t	DIN ISO 10 694; 1996-08
Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb	Druckaufschluss, Messung: DIN EN ISO 17294-2; 2005
Hg	Königswasseraufschluss, Messung: DIN EN 13506; 2002-04 (E35)

Hohenheimer Biogasertagstest

Bei der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) in Jena wurde zur Bestimmung der tatsächlichen Biogas- und Methanausbeute der Hohenheimer Biogasertagstest durchgeführt (HENGELHAUPT und GÖDECKE 2008). In Kolben mit einem Volumen von 100 ml wurde mit dreifacher Wiederholung die Biomasse mit dem Impfmateriale (ausgegorene Gülle) gegeben. Diese wurden in einen langsam drehenden Rotor eingebracht, der sich in einem Trockenschrank befand, um eine gleichmäßige Gärtemperatur von 37°C zu gewährleisten. Das entstehende Gas drückte einen Stopfen heraus. Das entstehende Volumen konnte in der Folge abgelesen werden. Die IR-Methode diente der Gasanalytik als externes Messgerät. Die Versuchsdauer betrug 30 Tage (HENGELHAUPT und GÖDECKE 2008). Dieser Versuch wurde jedoch nur mit Sudangras durchgeführt.

3.5.3 Sickerwasser

Alle angefallenen Sickerwasserproben wurden nach Membranfiltration auf die in Tabelle 20 stehenden Parameter untersucht. Aufgrund sehr hoher NO₃-N und NH₄-N-Konzentrationen zu Beginn des Versuches wurden Verdünnungsreihen hergestellt. Problematisch gestaltete

sich die Analytik durch hohe Cl-Gehalte, die teilweise zu Überlagerungen der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Peaks führten.

Tabelle 20 Analytikmethoden zur Untersuchung des Sickerwassers

Parameter	Methode
pH-Wert	DIN 38 404-5
LF	DIN 27 888
$\text{NO}_3\text{-N}$, Cl	DIN EN ISO 10304-2
$\text{NH}_4\text{-N}$	DIN 38 406-E5-1
Fe, Pb, Cr, Cu, Cd, Ni, Zn, Hg	DIN EN ISO 11885

3.6 Berechnung der Biogas- und Methanausbeuten

Die theoretische Biogas- und Methanausbeute wurde unter Verwendung der Verdaulichkeiten der Rohnährstoffe einzelner Pflanzenarten nach Reifestadium mit Hilfe des Modells von BASERGA (1998), welches von KEYMER und SCHILCHER (1999) ausgeführt wurde, berechnet. Das Modell von BASERGA (1998) beruht auf speziellen Gasausbeuten für die einzelnen Stoffgruppen Kohlenhydrate (790 l/kg oTS), Rohprotein (700 l/kg oTS) und Rohfett (1250 l/kg oTS). Von KEYMER und SCHILCHER (1999) wurden die Verdauungsquotienten eingeführt, da nicht jegliche Kohlenhydrate den gleichen Abbauvorgängen unterliegen. Es gehen folglich der Gehalt an oTS, XA, XF, XL, XP und NFe der zu untersuchenden Biomasse ein.

3.7 Statistische Auswertung

Zum Nachweis von statistischen Zusammenhängen wurde PASW Statistics 18 verwendet. Eine Auswertung fand bei den Sickerwässern in den Versuchen 1 und 2 statt. Das erste Jahr in Versuch 1 auf dem Standort Sondershausen von Juli 2007 bis Juni 2008 war gekennzeichnet durch hohe Gehalte an $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Sickerwasser. Um die statistischen Trends aussagekräftiger zu gestalten, wurde der Untersuchungszeitraum in zwei Abschnitte unterteilt. Es erfolgte zum Vergleich der unterschiedlichen Varianten und Anbauformen nach Prüfung auf Normalverteilung mit Shapiro-Wilk eine Einfaktorielle ANOVA unter Nutzung des Tukey-HSD Tests. Der Test nach Shapiro-Wilk und der Tukey-HSD-Test kamen ebenso beim Variantenvergleich der Biomasseerträge und der Boden- und Pflanzenanalytik auf Feld 3 von Versuch 1, der Energiegrasvariante, zum Einsatz. Weiterhin wurde beim Vegetationstest eine Regressionsanalyse durchgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Pflanzenbauliche Untersuchungen

4.1.1 Versuch 1

4.1.1.1 Erträge

Senf

Die Zumischungen von 50 Vol% KSK wiesen unabhängig von der Mächtigkeit die höchsten Erträge bis 43 t/ha FM auf (Tabelle 21). Die 100cm-75Vol%KSK-Variante besaß auf den KSK-Flächen die geringsten Biomasseerträge mit 34 t/ha FM, während die Nullvarianten maximal 8,4 t/ha FM erreichten.

In der Bestandeshöhe waren keine Unterschiede zwischen den KSK-Varianten festzustellen. Allein die Nullvarianten waren gekennzeichnet durch einen spärlichen hellgrünen Bewuchs und deutlich geringere Wuchshöhen, die auf Mangelsymptome schließen ließen. Ein Unkrautbefall wurde im ersten Versuchsjahr nicht festgestellt.

Tabelle 21 Frisch- und Trockenmasseerträge von Senf (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
Zumischung KSK	[Vol%]	0	50	75	0	50	75
FM	[t/ha]	8,0 ± 0,5	41,4 ± 1,3	39,0 ± 8,1	8,4 ± 4,6	42,6 ± 4,0	34,2 ± 4,5
TM	[t/ha]	1,3 ± 0,1	5,5 ± 0,6	4,8 ± 1,1	1,4 ± 0,6	6,1 ± 1,5	5,1 ± 0,2

Roggen / Weizen

Bei Anbau des Roggen-/Weizengemisches erwies sich die Variante 100cm-50Vol%KSK als vorteilhaft. Es wurden FM von 36 t/ha geerntet (Tabelle 22). Bei einer Zumischung von 75 Vol% KSK spielte die Mächtigkeit hingegen keine Rolle, da auf beiden Flächen Erträge von 27 t/ha FM erzielt wurden. Die Vergleichsvarianten wiesen maximale FM-Erträge von 4,3 t/ha auf.

Auf den KSK-Varianten dominierte Weizen. Der Bestand wurde bei einer Zumischung von 50 Vol% KSK auf 75 % Weizen mit Wuchshöhen von 73 cm geschätzt. Der Roggen mit 163 cm auf dieser Variante war höher als derjenige, der auf den Varianten mit 75 Vol% angebaut wurde. Hier lagen die Wuchshöhen um 10 cm niedriger. Ebenso war auf den Nullvarianten des Fruchtartengemisches mehr Weizen als Roggen vorzufinden. Der Roggen erreichte auf diesen Flächen Wuchshöhen von 114 cm (100 cm Mächtigkeit) und 144 cm (70 cm Mächtigkeit), der Weizen hingegen nur 53 cm auf der 100 cm mächtigen Variante.

Tabelle 22 Frisch- und Trockenmasseerträge von Roggen / Weizen (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
Zumischung KSK	[Vol%]	0	50	75	0	50	75
FM	[t/ha]	4,1 ± 2,4	22,7 ± 4,8	26,5 ± 0,9	4,3 ± 1,0	35,5 ± 6,7	26,8 ± 4,5
TM	[t/ha]	1,6 ± 0,9	7,4 ± 1,3	9,3 ± 1,3	1,5 ± 0,3	10,8 ± 2,0	8,1 ± 0,9

Weizen

Es zeigte sich, dass mit steigender Zumischung an KSK und zunehmender Mächtigkeit die Erträge stiegen (Tabelle 23). Auf den 100 cm Varianten mit KSK-Zugabe konnten unabhängig von der Zumischung höhere Erträge als auf den Vergleichsvarianten erzielt werden. Der maximal erreichte Ertrag war folglich bei der Variante 100cm-75Vol%KSK mit 19 t/ha FM zu finden.

Es war kein Unterschied zwischen den 70 cm mächtigen KSK-Varianten feststellbar. Die erreichten Wuchshöhen lagen bei durchschnittlich 70 cm. Als höher einzustufen waren die Wuchshöhen bei einer Schichtmächtigkeit von 100 cm. Es wurden durchschnittliche Werte zwischen 80 cm (75 Vol% KSK) und 90 cm (50 Vol% KSK) gemessen. Hingegen wurden die geringsten Wuchshöhen von Weizen auf den Nullvarianten mit 47 cm (70 cm Mächtigkeit) und 65 cm (100 cm Mächtigkeit) gemessen.

Tabelle 23 Frisch- und Trockenmasseerträge von Weizen (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
Zumischung KSK	[Vol%]	0	50	75	0	50	75
FM	[t/ha]	2,4 ± 0,8	14,0 ± 2,2	16,7 ± 3,2	4,9 ± 2,6	17,4 ± 1,9	19,0 ± 1,8
TM	[t/ha]	1,5 ± 0,4	12,4 ± 2,0	14,8 ± 2,8	4,2 ± 2,1	15,1 ± 1,7	16,7 ± 1,6

Sudangras

Bei Sudangras war keine Abhängigkeit der FM und TM-Erträge in Bezug auf die Mächtigkeit erkennbar, jedoch schien die Zumischungshöhe von KSK eine entscheidende Rolle zu spielen (Tabelle 24). Je mehr KSK zugemischt wurde, desto höher waren die Erträge. Die höchsten Erträge erzielte die Variante 70cm-75Vol%KSK mit 44,8 t/ha FM und 13,7 t/ha TM. Auf den Nullvarianten wurden äußerst geringe Erträge mit 1,8 und 2,2 t/ha FM erreicht.

Auffallend war, dass die Wuchshöhen auf den KSK-Varianten von 50 Vol% (149 cm – 70 cm Mächtigkeit und 185 cm – 100 cm Mächtigkeit) leicht höher waren als diejenigen auf den 75 Vol%-Varianten (144 cm – 70 cm Mächtigkeit und 173 cm – 100 cm Mächtigkeit). Es zeigte sich folglich das bessere Wachstum der Einzelpflanzen auf den Flächen mit größerer Mächtigkeit. Allerdings bestätigte sich diese Tatsache nicht in den Ergebnissen der Erträge. Die Pflanzen erreichten auf den Nullvarianten Höhen von maximal 50 cm.

Tabelle 24 Frisch- und Trockenmasseerträge von Sudangras (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
Zumischung KSK	[Vol%]	0	50	75	0	50	75
FM	[t/ha]	1,8 ± 1,1	34,9 ± 2,6	44,8 ± 5,7	2,2 ± 0,8	36,4 ± 5,7	45,3 ± 8,9
TM	[t/ha]	0,6 ± 0,2	8,2 ± 1,5	13,7 ± 5,6	0,8 ± 0,3	10,8 ± 1,6	13,5 ± 2,0

Mais

Die höchsten Erträge wies die Variante 100cm-75Vol%KSK mit 59,6 t/ha FM auf (Tabelle 25). Jedoch war dieser Wert auch mit der höchsten Streuung verbunden. Allgemein war sowohl der Einfluss der Mächtigkeit als auch der KSK-Zumischung erkennbar. Wie schon bei Sudangras stiegen die Erträge mit zunehmender Mächtigkeit und steigenden Zumischungsverhältnissen an KSK an. Die Nullvarianten erzielten maximale Frischmasseerträge von 4,8 t/ha.

Auf der 70cm-50Vol%KSK-Variante konnte trotz dichtem Bestand ein hoher Unkrautbewuchs beobachtet werden. Die Pflanzen erreichten Höhen von 110 cm. Die Zumischung von 75 Vol% KSK bei 70 cm Mächtigkeit konnte gesunde Pflanzen, einen dichten Bestand und Wuchshöhen bis 180 cm vorweisen. Die Variante 100cm-50Vol%KSK fiel mit 160 cm Maximalhöhe und einem Bestand, der durch geringe Dichte gekennzeichnet war, auf. Das beste Resultat erbrachte die 75 Vol% Zumischung dieser Mächtigkeit mit Höhen von 200 cm. Allerdings war auch hier ein Unkrautbesatz mit Disteln, Brennesseln und Wicken feststellbar. Der angebaute Mais auf den Nullvarianten wies rötliche Verfärbungen auf, die auf Mangelsymptome schließen lassen. Es wurden Wuchshöhen bis zu 30 cm erreicht. Die Bestandesdichte war sehr gering und Unkrautbewuchs mit Wicken, Löwenzahn und Disteln die Folge.

Tabelle 25 Frisch- und Trockenmasseerträge von Mais (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
Zumischung KSK	[Vol%]	0	50	75	0	50	75
FM	[t/ha]	4,1 ± 1,1	32,6 ± 4,8	50,8 ± 10,8	4,8 ± 2,3	45,9 ± 10,3	59,6 ± 17,3
TM	[t/ha]	1,5 ± 0,3	12,3 ± 4,4	15,9 ± 4,7	1,6 ± 0,8	15,8 ± 3,5	20,4 ± 7,7

Winterraps

Bei Raps war wiederum eine eindeutige Abhängigkeit des Ertrages von der Mächtigkeit und der Zumischung an KSK zu erkennen (Tabelle 26) Je höher die Mächtigkeit und die Zumischung an KSK war, desto bessere Erträge wurden erzielt. Bei 100cm-75Vol%KSK wurden die höchsten Erträge mit 23,2 t/ha FM und 8,1 t/ha TM erreicht.

Die 70cm-50Vol%KSK Variante erreichte Wuchshöhen bis zu 95 cm, während die Zumischung von 75 Vol% KSK Werte bis zu 110 cm schaffte. Die 100 cm mächtigen Varianten konnten einen dichteren Bestand vorweisen, der auch größere Wuchshöhen aufwies (110 cm – 50 Vol% KSK, 120 cm – 75 Vol% KSK). Allerdings war auf allen Flächen mit KSK-Einsatz Unkrautbefall durch Melde, Brennessel, Knöterich, Distel, Beifuss und

Kamille festzustellen. Die Wuchshöhen auf den Nullvarianten erreichten gerade 30 cm. Der Bewuchs war sehr spärlich, so dass keine Quadratmeterproben geerntet werden konnten. Bei einer Mächtigkeit von 70 cm wurde kaum Unkraut festgestellt, während die 100 cm mächtige Variante stark mit Hundskamille, Steinklee und Disteln durchsetzt war.

Tabelle 26 Frisch- und Trockenmasseerträge von Winterraps (Versuch 1)

Mächtigkeit	[cm]	70			100		
		Zumischung KSK [Vol%]	0	50	75	0	50
FM	[t/ha]	n.b.	16,5 ± 3,7	18,1 ± 1,5	n.b.	21,9 ± 2,9	23,2 ± 2,2
TM	[t/ha]	n.b.	5,0 ± 1,1	6,5 ± 0,6	n.b.	7,4 ± 1,1	8,1 ± 0,8

Energiegras

Die über den Versuchszeitraum erzielten Erträge des Energiegrases sind in Tabelle 27 dargestellt. Die erste Ernte erfolgte im November 2007. Es konnten allerdings nur die KSK-Varianten beprobt werden, weil die Vergleichsvarianten ein zu geringes Biomassewachstum aufwiesen. Die höchsten FM-Erträge besaß die Variante 70cm-50Vol%KSK mit 15,3 t/ha. Aufgrund geringerer TS-Gehalte dieser Variante konnten die höchsten TM-Erträge mit 2,9 t/ha bei 100cm-75Vol%KSK festgestellt werden. Die ersten Schnitzeitpunkte der folgenden Jahre wiesen erwartungsgemäß höhere Erträge auf als die zweiten. Abbildung 5 dient dazu, einen besseren Überblick über die Erträge der unterschiedlichen Varianten zu erlangen. Es wurden die kumulierten Erträge über die gesamte Versuchszeit erfasst. Durch eine Kompostzumischung konnte der Biomassezuwachs deutlich gesteigert werden. Schon ab dem 2. Versuchsjahr war zu erkennen, dass die 100 cm mächtigen Varianten bessere Erträge als die geringer mächtigen Varianten aufwiesen. Eine Mächtigkeit von 100 cm wirkte sich demzufolge positiv auf das Pflanzenwachstum aufgrund erhöhter Durchwurzelungstiefe aus. Es wurden Gesamterträge von 152 t/ha FM innerhalb von 3 Jahren erreicht, während die 70 cm-Varianten bei maximal 124 t/ha FM lagen. Es war folglich ein FM-Mehrertrag von 28 t/ha nachzuweisen. Die Varianten der Zumischungen von 50 und 75 Vol% lagen jedoch in Abhängigkeit von der Mächtigkeit auf einem annähernd gleichen Ertragsniveau.

Im ersten Versuchsjahr konnte noch kein Unterschied der einzelnen Zumischungsverhältnisse und Mächtigkeiten hinsichtlich der Bestandeszusammensetzung verzeichnet werden. Ab dem zweiten Jahr war jedoch eine Differenzierung im Vergleich der unterschiedlichen Varianten in der Zusammensetzung der einzelnen Grasarten sichtbar. Auf den KSK-Varianten konnten kaum Unterschiede in der Bewuchsstruktur festgestellt werden. Es setzte sich unabhängig von der Mächtigkeit und Zumischung an KSK der Knautgrasbestand durch. Rotschwingel und Glatthafer konnten nur noch vereinzelt wiedergefunden werden. Die Wuchshöhen betrugen 100 bis 120 cm. Der 1. Aufwuchs neigte im 2. und 3. Anbaujahr zur Lagerbildung. Bei einer Mächtigkeit von 100 cm wurde eine stärkere Verunkrautung mit Disteln festgestellt. Auf den Nullvarianten war vorwiegend Glatthafer zu beobachten, der Wuchshöhen bis zu 130 cm erreichte. Der Bedeckungsgrad war über den gesamten Versuchszeitraum allerdings recht spärlich. Auf der 100 cm mächtigen Variante war ein stärkerer Unkrautbesatz mit vorwiegend Distel, Melde, Kamille und Knöterich zu verzeichnen.

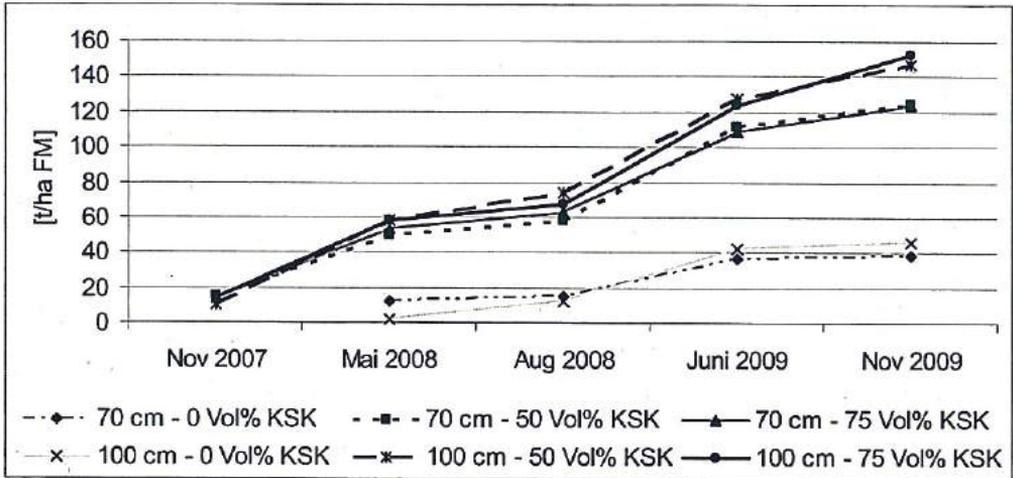


Abbildung 5 Kumulierte Frischmasseeerträge von Energiegras im gesamten Versuchszeitraum (Versuch 1)

4.1.1.2 Pflanzliche Inhaltsstoffe

Im folgenden Text wurden in den Tabellen nur die Parameter N_t , NO_3-N , P, K, Mg, Ca, S, Cl, Na und Fe dargestellt. Alle weiteren Analytikergebnisse, auf die auch im Text verwiesen wird, befinden sich aufgrund ihrer Vielzahl in Anlage 6 bis Anlage 9. Unter Nutzung der Ernteerträge und der Nähr- und Schadstoffkonzentrationen wurden die Entzüge der einzelnen Parameter betrachtet (Tabelle 35). Weiterhin ist darauf zu verweisen, dass As und Al gemeinsam mit den Schwermetallen genannt und diskutiert werden.

Da mit einer Nullvariante ohne Düngungsmaßnahmen gearbeitet wurde, war es schwierig, die Nähr- und Schadstoffgehalte der KSK-Varianten in ihrer Höhe sinnvoll einzuschätzen. Als Vergleichsparameter wurden interne Werte der TLL für den Standort Dornburg (VETTER und NEHRING 2011) und Literaturangaben (ZORN et al. 2007) verwendet. Es spielen jedoch immer Standortfaktoren und das Düngeregime eine wesentliche Rolle für die Inhaltsstoffe der Pflanze.

Senf

Die auf den 70 cm mächtigen Varianten geerntete Biomasse ließ höhere Gehalte an N_t von 4,18 % (50 Vol% KSK) und 4,28 % (75 Vol% KSK) im Vergleich zur höher mächtigen Variante erkennen (Tabelle 28). Die P-Gehalte der KSK-Varianten stiegen hingegen mit zunehmender Mächtigkeit an. Weiterhin fiel die Variante 100cm-50Vol%KSK auf, die sowohl die höchsten Gehalte an K, Na, Ca, Fe als auch an NO_3-N aufwies. Deutlich auffällig verhielt sich der Ca-Gehalt der Pflanzen, da die Nullvarianten mit Abstand die höchsten Gehalte besaßen. Bei allen anderen untersuchten Nährstoffen wie P, K, Mg, Na und S lagen die Gehalte der Nullvarianten unter denen der KSK-Varianten. Bei Betrachtung des Fe-Gehaltes fiel auf, dass eine Zumischung von 75 Vol% KSK mit 349 und 415 mg/kg jeweils geringere Gehalte zeigte als die Nullvarianten und die Zumischungen an 50 Vol% KSK. Die höchsten Cl-Gehalte wurden auf der 70cm-75Vol%KSK-Variante dokumentiert. Aus den angegebenen Konzentrationen wurden die Entzüge in kg/ha der einzelnen Inhaltsstoffe berechnet. Wie schon angemerkt, lagen die Nährstoffkonzentrationen bei der Variante 100cm-50Vol%KSK zum Teil am höchsten, dies spiegelte sich unter Einbezug der Ernteerträge wider. Hier waren die höchsten Entzüge von P (30,9 kg/ha), K (385,1 kg/ha), Mg (32,9 kg/ha), Na (38,0 kg/ha), Ca (80,1 kg/ha) und Fe (5,1 kg/ha), jedoch nur 138,5 kg/ha N_t , zu beobachten.

Bei Mn, Zn und Cu, die als Mikronährstoffe gelten, konnte durch eine erhöhte Zumischung an KSK auch eine Erhöhung in den Gehalten festgestellt werden. Die Betrachtung der Schwermetallgehalte (Anlage 6) ließ erkennen, dass eine Zumischung von 75 Vol% KSK bei den Elementen Al, Cr, Ni, As, Cd und Pb mit geringeren Gehalten als eine Zumischung von 50 Vol% KSK einher ging. Bei Al, Cr, As und Cd lagen die Werte der 75 Vol% KSK-Varianten sogar unter denen der Nullvariante.

Mit dem Entzug von N_t in Höhe von 0,33 kg/t FM bis 0,56 kg/t FM bei den KSK-Varianten ist zum Vergleich der TLL-Wert von 0,45 kg/t FM anzugeben. Damit lag bis auf Variante 100cm-50Vol%KSK ein hoher N_t -Entzug vor. Der Entzug in kg/t FM lag für P im Normbereich, während im Vergleich zur Literatur sehr hohe Mengen an K und Mg bei den KSK-Varianten in die Pflanze aufgenommen wurden.

Tabelle 28 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Senf (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	2,35	0,16	0,31	2,03	0,29	2,20	0,68	1,05	1,58	0,54
70	50	4,18	45,30	0,46	5,62	0,57	1,09	0,84	1,86	4,71	0,63
70	75	4,28	34,70	0,45	5,73	0,63	0,98	0,91	2,78	5,90	0,35
100	0	4,16	0,54	0,29	2,24	0,24	1,85	0,60	1,25	1,05	0,69
100	50	2,27	61,00	0,51	6,31	0,54	1,31	0,79	1,61	6,23	0,83
100	75	3,52	17,90	0,53	5,60	0,60	1,02	1,03	2,53	4,21	0,42

Roggen / Weizen

Bei der Betrachtung der Roggen-/Weizenbiomasse fiel die Variante 100cm-50Vol%KSK auf. Die Pflanzen hatten einen sehr hohen Anteil an NO₃-N mit 1,2 % (Tabelle 29). Aber auch für andere Elemente wie P, K, Mg, Na, Ca, S, Fe und Cl konnte sich diese bevorzugte Aufnahme bestätigen lassen. Die Konzentration in der Pflanze war im Vergleich zu den anderen KSK-Varianten teilweise um das Doppelte erhöht. Demzufolge lagen die Entzüge von N (264 kg/ha), P (48 kg/ha), K (515 kg/ha) und Mg (33 kg/ha) über denen der anderen Varianten. Als Beispiel sei hier 70cm-50Vol%KSK mit N (105 kg/ha), P (24 kg/ha), K (161 kg/ha) und Mg (13 kg/ha) genannt. Die geringsten Nährstoffgehalte wies die Variante 100cm-75Vol%KSK auf. Die Schwermetallgehalte der Variante 100cm-75Vol%KSK sanken im Vergleich zur Nullvariante bei Al, Cr, Cd, Hg und Pb.

Die Gehalte an N_t der KSK-Varianten (1,0 bis 1,6 %) lagen bis auf 100cm-50Vol%KSK (2,5 %) auf einem sehr niedrigen Niveau (Vergleichswert TLL 1,7-2,1 %). Ähnliches bestätigte sich auch für weitere untersuchte Parameter Na, S, K und P. Während 70cm-50Vol%KSK, 70cm-75Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK geringe Gehalte aufwiesen, lag 100cm-50Vol%KSK auf einem zu hohen Niveau. Für Cl, Fe und Al wurden allerdings relativ hohe Werte im Vergleich zur TLL in Dornburg gemessen. Während Mn noch in einem optimalen Bereich einzuordnen war, wurden bei Cu und Zn generell zu niedrige Werte gemessen.

Tabelle 29 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Roggen / Weizen (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	1,10	1,10	0,22	1,65	0,10	0,24	0,10	0,43	0,06	0,24
70	50	1,42	1,90	0,32	2,18	0,18	0,19	0,14	1,14	0,05	0,13
70	75	1,60	3,20	0,28	2,41	0,22	0,19	0,18	1,43	0,03	0,09
100	0	0,74	0,20	0,23	1,59	0,09	0,24	0,09	0,53	0,03	0,09
100	50	2,45	12,30	0,44	4,77	0,30	0,25	0,32	1,67	0,18	0,15
100	75	1,00	1,00	0,35	2,03	0,15	0,15	0,10	0,80	0,03	0,10

Weizen

Die Biomasse auf der Variante 100cm-75Vol%KSK besaß unter den KSK-Varianten die geringsten Gehalte an N_t, Mg, NO₃-N, Na, Ca und S (Tabelle 30). Auf den 70 cm mächtigen Varianten wurden höhere Konzentrationen an K und Na nachgewiesen. Weiterhin auffällig waren die sehr hohen Gehalte an P, K, Mg, Ca, S und Fe der Variante 70cm-0Vol%KSK. Die dazugehörige 100 cm mächtige Variante konnte dies jedoch nicht bestätigen. Knapp 200 kg/ha N_t wurden durch die Varianten 70cm-75Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK festgestellt. Die höchsten Mengen an Cl, K und Fe entzog die Variante 100cm-75Vol%KSK. Ein Vergleich der ermittelten Schwermetallgehalte zwischen der 100cm-0Vol%KSK-Variante und der 100cm-75Vol%KSK-Variante erlaubte die folgende Aussage: bei Al, Cr und Cd änderten sich die Gehalte nicht, während bei Mn und Hg die Gehalte in der Pflanze leicht abnahmen. Eine geringfügige Steigerung war bei Ni, Cu, Zn, As und Pb nachzuvollziehen. Verglichen mit Angaben nach TLL wurden in der Biomasse hauptsächlich zu geringe Konzentrationen an Nährstoffen bestimmt. So lagen z. B. die Werte für N_t, K, Ca, Mn und Cu deutlich unterhalb der Vergleichswerte. Mg und P bewegten sich im Normbereich, während Zn in zu hohen Konzentrationen vorlag.

Tabelle 30 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Weizen (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	0,95	0,01	0,25	1,22	0,16	0,22	0,15	0,48	0,06	0,31
70	50	1,01	0,10	0,19	1,15	0,13	0,12	0,11	0,53	0,29	0,13
70	75	1,34	0,20	0,26	1,14	0,16	0,11	0,13	0,48	0,24	0,13
100	0	1,02	0,01	0,20	0,70	0,10	0,15	0,09	0,27	0,04	0,17
100	50	1,31	0,10	0,27	1,11	0,14	0,11	0,12	0,41	0,15	0,13
100	75	0,95	0,01	0,22	1,12	0,12	0,09	0,10	0,50	0,09	0,15

Sudangras

Bei der Betrachtung von Sudangras fiel die Variante 100cm-75Vol%KSK auf, die sehr geringe Gehalte an den Nährstoffen P (0,11 %), K (0,84 %), Mg (0,12 %), NO₃-N (0,15 %), Na (0,0019 %), Ca (0,11 %), S (0,07 %) und Fe (102 mg/kg) im Vergleich zu den anderen KSK-Varianten besaß (Tabelle 31). Die höchsten Gehalte an N_t (1,91 %), NO₃-N (0,81 %), Cl (1,05 %), S (0,15 %), Mg (0,44 %) und P (0,26 %) der KSK-Varianten konnten bei der Biomasse der 70cm-75Vol%KSK-Fläche verzeichnet werden. Die Nullvarianten ließen generell relativ hohe P- (0,25 bzw. 0,31 %), Ca- (0,63 bzw. 1,01 %) und Fe-Gehalte (1044 bzw. 569 mg/kg) im Pflanzenmaterial erkennen. Die höchsten Entzüge auf einen Hektar bezogen hatte die Variante 70cm-75Vol%KSK mit 262 kg N, 36 kg P, 315 kg K und 61 kg Mg. Folgend konnte 100cm-75Vol%KSK 214 kg/ha N-Entzug aufweisen. Bei anderen betrachteten Parametern wie P, K, Mg, Na, Ca, S und Fe besaßen die 50 Vol% KSK-Varianten höhere Entzüge als die genannte Variante aufgrund der niedrigen Konzentrationen im Pflanzenmaterial. Außer bei Zn konnten bei den untersuchten Schwermetallen keine Zunahmen in den Gehalten im Vergleich zur Nullvariante festgestellt werden.

Bei den KSK-Varianten konnten im Vergleich zur TLL geringe Gehalte an Ca; Normgehalte an N_t, P, Na und Al; erhöhte Gehalte an Mg, K, S und Fe und wiederum sehr hohe Konzentrationen an Cl festgestellt werden.

Tabelle 31 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sudangras (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	1,47	2,40	0,25	1,76	0,26	0,63	0,13	0,58	0,08	1,04
70	50	1,72	3,30	0,26	2,25	0,34	0,29	0,13	0,89	0,08	0,21
70	75	1,91	8,10	0,26	2,30	0,44	0,27	0,15	1,05	0,08	0,23
100	0	1,97	3,00	0,31	1,85	0,27	1,01	0,17	0,73	0,11	0,57
100	50	1,43	3,10	0,24	2,35	0,35	0,26	0,12	0,79	0,10	0,22
100	75	1,58	1,50	0,11	0,84	0,12	0,11	0,07	0,78	0,02	0,10

Mais

Die Variante 70cm-75Vol%KSK war gekennzeichnet durch enorm hohe NO₃-N-Werte mit 2,31 g/kg in der Biomasse (Tabelle 32). Die Vergleichsvarianten lagen auf einem Niveau unter 0,15 mg/kg. Ähnliches zeigte sich für den N_t-Gehalt. Die Variante 70cm-75Vol%KSK besaß ebenfalls die höchsten K-Konzentrationen in der Biomasse. Die K-, Mg- und Ca-Gehalte waren bei 100cm-50Vol%KSK am niedrigsten. Bei einer Zumischung von 75 Vol% KSK wurden Minimalwerte an P von 0,14 % (70 cm Mächtigkeit) bzw. 0,16 % (100 cm Mächtigkeit) erreicht. Die Nullvarianten überstiegen diese Gehalte deutlich mit 0,22 % (70 cm Mächtigkeit) bzw. 0,27 % (100 cm Mächtigkeit). Ähnliches zeigte sich auch für Ca, S und Fe. Obwohl nicht immer die höchsten Nährstoffkonzentrationen in der pflanzlichen Biomasse bei der Variante 100cm-75Vol%KSK bestimmt wurden, konnten doch die höchsten Entzüge infolge der Erträge auf den Hektar bezogen festgestellt werden: 263 kg N, 33 kg P, 396 kg K, 68 kg Mg und 87 kg Ca. Die Gehalte der Schwermetalle Al, Cr, Mn, Ni, Cu, As, Cd und Pb lagen bei der Nullvariante der 70 cm Mächtigkeit zum Teil deutlich über denen der KSK-Varianten. Für die 100 cm mächtige Variante konnten ebenfalls hohe Gehalte an Al, Cr, Ni und As in der Biomasse bestätigt werden.

Der Vergleich der KSK-Varianten mit Werten der TLL ließ für N_t, P und Cu eher niedrige Gehalte; für K, Mg, S, Al und Mn Normgehalte; für Fe und Zn hohe Gehalte und für Na und Cl teilweise sehr hohe Gehalte erkennen.

Tabelle 32 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Mais (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	0,62	0,03	0,22	1,50	0,19	0,44	0,20	0,33	0,63	0,93
70	50	1,11	0,08	0,19	2,01	0,30	0,38	0,12	0,40	0,11	0,37
70	75	1,39	2,31	0,14	2,27	0,29	0,34	0,15	0,58	0,39	0,23
100	0	1,02	0,05	0,27	1,90	0,22	1,18	0,32	0,69	0,29	0,55
100	50	1,13	0,12	0,20	1,89	0,28	0,26	0,13	0,32	0,53	0,18
100	75	1,30	0,15	0,16	1,95	0,34	0,43	0,12	0,31	0,10	0,26

Winterraps

Die Gehalte der Parameter N_t, NO₃-N, P, K und Na lagen bei höchster Zumischung an KSK über denen der 50 Vol% Beimengung, wohingegen Mg und S das Maximum bei einer Zumischung von 50 Vol% zeigten (Tabelle 33). Die Werte von Ca, Fe und Cl waren bei der Variante 70cm-50Vol%KSK am höchsten. Mit zunehmender Zumischung an KSK sanken die Gehalte an Ca stetig. Die Nullvarianten besaßen folglich die höchsten Gehalte an Ca. Unter Einbeziehung der Erträge wurden der 100cm-75Vol%KSK-Variante die höchsten Nährstoffmengen an N_t (140 kg/ha), P (52 kg/ha) und K (239 kg/ha) entzogen. Es konnten die niedrigsten Schwermetallgehalte bei der Variante 100cm-50Vol%KSK festgestellt werden. Die Variante 70cm-75Vol%KSK wies die höchsten Gehalte an Cr, Cu, Zn, Cd und Hg der KSK-Varianten auf. Im Vergleich zur Nullvariante konnten bei Cr, Cd, As und Pb auf allen KSK-Varianten abnehmende Gehalte verzeichnet werden.

Verglichen mit Werten nach TLL lagen bei N_t und Ca zu geringe Gehalte vor, während bei P durch Zumischung von 75 Vol% KSK und bei Mg durch Beimengung an 50 Vol% KSK erhöhte Konzentrationen gefunden wurden. Der Gehalt an K bewegte sich bei allen KSK-Varianten in einem unteren Konzentrationsbereich.

Tabelle 33 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Winterraps (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
70	0	1,92	8,86	0,54	2,76	0,36	1,28	0,81	0,66	0,75	0,25
70	50	1,61	5,64	0,52	2,59	0,53	1,16	0,78	0,72	1,02	0,22
70	75	1,68	9,41	0,65	3,13	0,47	0,72	0,75	0,65	1,17	0,20
100	0	1,54	0,43	0,37	1,94	0,26	1,15	0,42	0,87	0,31	0,19
100	50	1,48	2,96	0,60	2,58	0,54	1,01	0,93	0,61	0,89	0,14
100	75	1,73	9,80	0,64	2,95	0,49	0,80	0,82	0,51	1,17	0,16

Energiegras

Mit Mittelwerten der Gehalte in der pflanzlichen Biomasse zu arbeiten, gestaltete sich als schwierig, da die Werte innerhalb der Jahre in Abhängigkeit vom Erntetermin stark

schwankten. Es wurde in den Jahren nicht der gleiche Erntezeitpunkt gewählt und die erste Ernte im Jahr 2007 war gekennzeichnet durch sehr hohe Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden und demzufolge durch eine hohe Pflanzenaufnahme. Die Gehalte wurden folgend einzeln betrachtet und sind in der Tabelle 34 dargestellt.

Die N_t -Gehalte in der Pflanze auf den KSK-Varianten waren mit 3,9 % bis 4,4 % durch den hohen Gehalt an verfügbarem N im Boden bei der ersten Ernte im November 2007 am höchsten. Ein möglicher Mineralisierungsschub im Jahr 2009 spiegelte sich ebenfalls in der Biomasse wider. Es wurden im November des genannten Jahres Konzentrationen zwischen 2,7 % und 3 % ermittelt. Die niedrigsten Gehalte in den Pflanzen wies generell der Juni 2009 mit 1,7 % auf. Ein deutlicher Unterschied zwischen den KSK-Varianten war jedoch nicht erkennbar. Es zeigte sich eine Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt. Auch wenn der Juni 2009 die geringsten Konzentrationen aufwies, konnten doch die höchsten Entzüge zwischen 245,1 kg/ha (70cm-75Vol%KSK) und 264,5 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) bei den KSK-Varianten festgestellt werden. Deutlich geringer lagen sie zum 2. Schnitzeitpunkt jeden Jahres.

Die NO_3 -N-Werte besaßen ebenfalls ihren Maximalwert bei der ersten Ernte 2007. Allerdings wurde ein Einfluss der Mächtigkeit deutlich, da die 100 cm mächtigen Varianten höhere Werte mit 10,4 g/kg (75 Vol% KSK) und 11,2 g/kg (50 Vol% KSK) erzielten. Die weiteren Ernten konnten nur Gehalte bis 5,7 g/kg aufweisen.

Die P-Gehalte in der pflanzlichen Biomasse lagen zur ersten Ernte 2007 auf den KSK-Varianten auf dem höchsten Niveau (0,44 % – 0,52 %), fielen dann in der Reihenfolge Mai 2008, November 2009, August 2008 und Juni 2009. Tendenziell ließ sich eher eine Abhängigkeit von der Mächtigkeit als vom Zumischungsverhältnis sehen. Wie schon bei N_t wurden die höchsten Entzüge im Juni 2009 durch hohes Biomassewachstum festgestellt. Sie lagen zwischen 33,1 kg/ha (70cm-75Vol%KSK) und 39,0 kg/ha (100cm-75Vol%KSK).

Beim Parameter K ließ sich in der Biomasse eine deutliche Abhängigkeit vom Erntetermin in allen untersuchten Varianten nachweisen. Je später der Erntetermin lag, umso geringere Gehalte wurden in der Pflanze analysiert. Die mit Abstand höchsten Gehalte der KSK-Varianten wurden bei der ersten Ernte im Jahr 2007 mit 4,2 % bis 4,7 % verzeichnet und gingen bis zum Herbst 2009 auf 1,7 % bis 1,8 % kontinuierlich zurück. Die gemessenen Werte der Biomasse auf den Nullvarianten lagen deutlich unter denen der KSK-Varianten. Die K-Entzüge in kg/ha waren jeweils zum 1. Schnitzeitpunkt jeden Jahres höher als die der darauffolgenden Schnitzeitpunkte. Sie bewegten sich mit Maximalwerten im Juni 2009 zwischen 364,2 kg/ha (70cm-75Vol%KSK) und 438,0 kg/ha (100cm-75Vol%KSK).

Die Biomasse zeigte in ihren Mg-Gehalten eine Abhängigkeit zum Erntetermin. Die höchsten Gehalte der KSK-Varianten wies generell der August 2008 auf, gefolgt von den Gehalten im November 2007, November 2009, Juni 2009 und Mai 2008. Die Mg-Entzüge der Variante 100cm-50Vol%KSK schwankten in Abhängigkeit vom Erntetermin zwischen 5,0 kg/ha (November 2007) und 29,8 kg/ha (Juni 2009).

Wie schon bei Mg, konnte auch für Ca eher eine Abhängigkeit vom Erntetermin als von der Zumischungshöhe und der Mächtigkeit festgestellt werden. Mit Abstand sehr hohe Gehalte zwischen 0,59 % und 0,88 % wurden bei allen Varianten am letzten Erntetermin im November 2009 nachgewiesen. Bedeutend niedriger lagen die Gehalte der KSK-Varianten an den anderen Terminen. Es wurden Werte zwischen 0,15 % und 0,42 % gemessen.

Die höchsten **S**-Gehalte in der Biomasse der KSK-Varianten konnte die 1. Ernte 2007 erbringen. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren minimal und lagen in einem Bereich zwischen 0,30 % und 0,33 %. Der letzte Schnittermin im November 2009 erreichte maximale Werte von 0,27 %. Die weiteren Schnitte lagen bei Gehalten unter 0,23 %. Man konnte eine Abhängigkeit zum Schnitzeitpunkt feststellen, die unabhängig von Zumischungshöhe und Mächtigkeit begründet war. Die Nullvarianten bewegten sich grundsätzlich auf niedrigerem Niveau.

Die **Cl**-Gehalte wurden im Jahr 2007 nicht bestimmt, folglich bezieht sich die Auswertung auf die folgenden Jahre. Den höchsten Wert erzielte die Variante 70cm-75Vol%KSK im August 2008 mit 2,31 %. Auch bei den anderen KSK-Varianten wurde zu diesem Zeitpunkt der höchste Gehalt in der Pflanze nachgewiesen, während die geringsten Gehalte im November 2009 vorlagen.

Die **Na**-Gehalte zeigten auf allen KSK-Varianten die höchsten Werte in der Biomasse während des ersten Erntetermins 2007. Allerdings ließ sich keine weitere Logik in die Auswertung dieses Parameters bringen.

Die Höhe der Gehalte an **Fe** folgte den **Ca**-Werten in der zeitlichen Darstellung. Mit Abstand wurden die höchsten Gehalte mit 0,8 % bis 1,7 % für die letzte Ernte im November 2009 der KSK-Varianten gemessen. Die anderen Ernten lagen unter einem Wert von 0,4 %, folgten jedoch generell dem Schema der **Ca**-Werte: November 2007, August 2008, Juni 2009 und Mai 2008 mit abnehmenden Gehalten.

Bei Betrachtung der **Schwermetalle** wird vorwiegend Bezug auf den Vergleich der Varianten 100cm-0Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK genommen, da im ersten Anbaujahr nur diese Varianten hinsichtlich der Schwermetalle untersucht wurden. Es war grundsätzlich ein Zusammenhang zum Erntezeitpunkt festzustellen. Die Gehalte differierten zum Teil enorm, so dass eine Mittelwertbetrachtung nicht sinnvoll erschien. Generell ließ sich ein starker Anstieg in den Schwermetallgehalten zum letzten Erntezeitpunkt im November 2009 erkennen. Dies betraf sowohl die KSK-Varianten als auch die Nullvarianten. Mögliche Ursache könnte hier der Neubau einer Straße auf dem Plateau der Kalihalde gewesen sein, der mit einer hohen Staubbelastung einherging. Ein Fehler in der Analytik war auszuschließen, da die Proben des gesamten Jahres 2009 gemeinsam untersucht wurden und diese hohen Schwermetallwerte zur Ernte im Juni 2009 nicht auffielen und auch die Biomasseproben des Versuches 2 nicht stärker belastet waren. In der Folge wird dieser Erntezeitpunkt im November 2009 nicht in die Betrachtung einbezogen. Die erste Ernte im November 2007 ging auf den KSK-Varianten mit den höchsten Gehalten an **Al**, **Pb**, **Cd**, **As**, **Zn**, **Cu**, **Mn** und **Cr** einher. Der Biomasseaufwuchs war zu diesem Zeitpunkt noch gering, und es kann zu einer Akkumulation der Schad- bzw. Mikronährstoffe gekommen sein. Die folgenden Erntezeitpunkte bewegten sich für die Parameter **Cu** (5,6 – 5,7 mg/kg), **Zn** (26,0 – 30,0 mg/kg), **Cd** (0,02 – 0,04 mg/kg) und **Pb** (0,22 – 0,24 mg/kg) auf annähernd gleichem Niveau. Zum Vergleich sei hier die Spanne der Gehalte in der pflanzlichen Biomasse, angebaut auf der Variante 100cm-0Vol%KSK, genannt: **Cu** (2,3 – 6,0 mg/kg), **Zn** (13,9 – 29,6 mg/kg), **Cd** (0,01 – 0,09 mg/kg), **Pb** (0,16 – 0,42 mg/kg). Die Gehalte, der auf KSK angebauten Biomasse bewegten sich im Rahmen der Gehalte der Nullvarianten. Dies galt, wenn man die erste Ernte wegen geringem Biomassewachstum und die letzte wegen Störfaktoren nicht betrachtet, ebenso für **Cr**, **Al** und **As**, während die Werte für **Mn**, **Ni** und **Hg**

die Gehalte der Nullvarianten überstiegen. Die weiteren KSK-Varianten, die im Jahr 2009 geprüft wurden, lagen in dem Bereich der Variante 100cm-75Vol%KSK. Dabei war kein Einfluss von Mächtigkeit oder Zumischungshöhe an KSK erkennbar.

Weil bei Energiegras eine Sortenmischung aus Knaulgras, Glatthafer und Rotschwingel eingesetzt wurde, gestaltete sich ein Vergleich mit den Literaturangaben schwierig. Weiterhin ist eine klare Abhängigkeit vom Erntetermin in der Nähr- und Schadstoffaufnahme gegeben, die einen Vergleich ungemein erschwerte. Die N_t-Gehalte lagen bei den KSK-Varianten, bis auf die erste Ernte im November 2007 mit zu hohen Werten und im Juni 2009 mit zu geringen Werten, im Normbereich. Bei P lagen die Konzentrationen in der Pflanze, mit Ausnahme vom November 2007, im unteren Bereich im Vergleich zu den angeführten Quellen. Die Werte für Mg und S lagen im Normbereich, während dies für K mit Ausnahme vom November 2007 (zu hohe Werte) auch bestätigt werden konnte. Minderbefunde waren außer im November 2009 bei Ca zu beobachten. Die Konzentrationen für Cl und Na bewegten sich auf einem zu hohen Niveau, wobei für Na vor allem der November 2007 hervorsteicht, bei Fe konnten zu hohe Werte im November 2009 unterstellt werden.

Tabelle 34 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Energiegras (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	Erntetermin	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]	
70	0	Mai 2008	1,38	1,20	0,17	2,46	0,10	0,22	0,11	0,84	0,14	0,07	
		Aug 2008	1,31	0,90	0,15	2,34	0,19	0,42	0,17	1,18	0,11	0,22	
		Jun 2009	0,78	0,05	0,13	1,56	0,09	0,23	0,10	0,78	0,12	0,06	
		Nov 2009	1,33	0,12	0,22	0,87	0,14	0,77	0,19	0,46	0,17	0,80	
70	50	Nov 2007	4,13	6,92	0,47	4,45	0,30	0,43	0,33			1,77	0,42
		Mai 2008	1,46	0,01	0,26	2,95	0,18	0,17	0,13	1,02	0,27	0,06	
		Aug 2008	1,96	1,00	0,23	3,06	0,40	0,41	0,20	1,81	0,55	0,23	
		Jun 2009	1,73	3,35	0,24	2,75	0,20	0,22	0,20	1,36	0,57	0,17	
		Nov 2009	3,03	2,19	0,32	1,97	0,29	0,73	0,28	0,99	0,35	0,87	
70	75	Nov 2007	3,89	4,28	0,44	4,25	0,32	0,32	0,30			1,95	0,33
		Mai 2008	1,78	1,20	0,29	3,40	0,21	0,15	0,17	1,44	0,39	0,06	
		Aug 2008	2,22	1,60	0,24	3,54	0,43	0,32	0,23	2,31	1,12	0,22	
		Jun 2009	1,68	1,68	0,23	2,49	0,24	0,19	0,19	1,43	0,38	0,14	
		Nov 2009	2,89	2,77	0,28	1,69	0,30	0,59	0,28	0,91	0,56	1,68	
100	0	Mai 2008	1,63	0,20	0,25	2,52	0,14	0,39	0,17	0,61	0,10	0,24	
		Aug 2008	1,85	4,90	0,20	2,94	0,24	0,55	0,19	1,22	0,30	0,16	
		Jun 2009	0,94	0,08	0,16	1,81	0,11	0,28	0,12	0,86	0,12	0,06	
		Nov 2009	1,62	0,26	0,21	1,00	0,15	0,70	0,18	0,55	0,09	0,43	
100	50	Nov 2007	4,44	11,20	0,49	4,70	0,30	0,27	0,33			1,42	0,27
		Mai 2008	2,51	5,70	0,35	3,83	0,19	0,16	0,20	1,52	0,57	0,10	
		Aug 2008	2,09	3,00	0,25	3,57	0,35	0,36	0,22	2,06	0,81	0,19	
		Jun 2009	1,68	2,93	0,23	2,55	0,19	0,21	0,18	1,38	0,41	0,13	
		Nov 2009	2,71	2,22	0,30	1,89	0,28	0,84	0,27	1,03	0,50	1,13	
100	75	Nov 2007	4,31	10,40	0,52	4,54	0,31	0,30	0,32			1,98	0,40
		Mai 2008	1,86	0,40	0,33	3,60	0,21	0,18	0,18	1,41	0,48	0,11	
		Aug 2008	2,07	0,50	0,24	3,18	0,45	0,42	0,23	2,10	0,75	0,32	
		Jun 2009	1,55	2,77	0,23	2,58	0,21	0,21	0,19	1,29	0,74	0,12	
		Nov 2009	2,81	3,06	0,26	1,85	0,29	0,88	0,27	0,87	0,26	0,75	

4.1.1.3 Entzugsbilanzen

Unter Einbeziehung der ermittelten Erträge sowie der Nährstoffgehalte der einzelnen Pflanzenarten konnten Entzugsbilanzen für die Varianten innerhalb des Versuchszeitraumes von 3 Jahren erstellt werden. In Tabelle 35 sind die Entzüge der untersuchten Nähr- und Schadstoffe der einzelnen Felder dargestellt. In der folgenden Betrachtung sollen die Nullvarianten zunächst außer Acht gelassen werden. Die Energiegrasmischung auf Feld 3 ließ die höchsten Entzüge an N_t erkennen. Die 100 cm mächtigen Varianten besaßen N_t-Entzüge von 805 kg/ha (50 Vol% KSK) und 847 kg/ha (75 Vol% KSK) und lagen somit 200 kg/ha über denen der 70 cm mächtigen Varianten. Die geringsten N_t-Entzüge, über alle Felder hinweg betrachtet, waren bei einer Zumischung von 50 Vol% KSK und einer Mächtigkeit von 70 cm feststellbar. Weiterhin wurde deutlich, dass die angebauten Fruchtarten auf Feld 2 eine höhere N-Entzugsleistung als die auf Feld 1 besaßen.

Bei **K** ließ sich eine ähnliche Abstufung feststellen. Mit 1146 kg/ha wurde der Höchstentzug von der Energiegrasmischung auf Variante 100cm-75Vol%KSK erbracht. Der höchste **P**-Entzug in Höhe von 116 kg/ha wurde von der Variante 100cm-50Vol%KSK auf Feld 1 erzielt. Die Entzüge lagen hier im Vergleich zu den anderen Feldern allgemein höher. Dem folgten auch die Parameter **Na**, **Ca** und **S**. Besonders auffällig waren die hohen **Na**- und **S**-Entzüge der KSK-Varianten auf Feld 1. Hier spielt die Fruchtartenspezifität der hier angebauten Biomasse eine deutliche Rolle. Sowohl Raps als auch Senf nahmen hohe Mengen an **S** auf. **Na** wurde bevorzugt bei Senf analysiert. Der **Mg**-Entzug war tendenziell auf Feld 2 am höchsten. Der Entzug von **Cl** und **Fe** lag auf den Feldern 1 und 2 auf annähernd gleichem Niveau, während derjenige auf Feld 3 im Gegensatz dazu deutlich erhöht war. Da die Parameter **Al**, **Cr**, **Mn**, **Ni**, **Cu**, **Zn**, **As**, **Cd**, **Hg** und **Pb** im Jahre 2008 nur auf der Variante 100cm-75Vol%KSK analysiert wurden, gestaltete sich ein Vergleich der gesamten Felder kompliziert. Es ließen sich demzufolge nur Aussagen zu dieser einen KSK-Variante treffen. Bei **Fe** (11 g/ha), **Al** (11183 g/ha), **Cr** (44 g/ha), **Mn** (2500 g/ha), **Ni** (58 g/ha), **Cu** (286 g/ha), **As** (6 g/ha), **Hg** (2,3 g/ha) und **Pb** (38 g/ha) wurde der höchste Entzug bei der Variante 100cm-75Vol%KSK der Energiegrasmischung im Vergleich zu den anderen Feldern festgestellt. Besonders hohe Werte ließen **Al**, **Cr**, **Mn**, **Cu**, **Hg** und **Pb** erkennen. Selbst wenn man das Jahr 2008 nicht betrachten konnte, lagen auch die anderen KSK-Varianten des Energiegrases auf einem hohen Niveau im Vergleich zu den restlichen angebauten Fruchtarten. Hier war allerdings anzumerken, dass gerade das dritte Anbaujahr mit sehr hohen Schadstoffgehalten einherging. Da im letzten Versuchsjahr die höchsten Biomasseerträge erzielt wurden, wirkte sich dies überproportional auf das Ergebnis aus. Die höchsten **Zn**- und **Cd**-Entzüge wurden bei der Variante 100cm-75Vol%KSK auf Feld 2 analysiert.

Generell ließ sich das folgende Bild ausweisen: auf den Feldern 1 und 3 war eine deutliche Abhängigkeit der Aufnahme von Nährstoffen hinsichtlich der Mächtigkeit der Kulturschicht erkennbar. Die 100 cm mächtigen Varianten besaßen die höheren Entzüge. Auf Feld 2 wurde dies nicht allzu deutlich. Während die Variante 70cm-50Vol%KSK die geringsten Nährstoffentzüge aufwies, waren diese bei 70cm-75Vol%KSK am höchsten. Es zeigte sich weiterhin eine geringe Entzugsleistung aller Nullvarianten in Bezug auf die Nährstoffe. Die Energiegrasmischung auf der Vergleichsvariante erzielte hier jedoch höhere Entzüge als die anderen Fruchtarten. Auffällig waren die relativ hohen Entzüge von Schwermetallen wie **Al**, **Mn**, **Ni**, **Cu**, **As**, **Cd**, **Hg** und **Pb** auf der Variante 100cm-0Vol%KSK. Diese überstiegen, über die drei Versuchsjahre betrachtet, teilweise die Entzüge der KSK-Varianten auf den Feldern 1 und 2.

Tabelle 35 Nähr- und Schadstoffentzüge durch die Pflanzen für die einzelnen Varianten im gesamten Versuchszeitraum (Versuch 1)

Feld	Mächtigkeit [cm]	Zusammensetzung KSK NO ₃ -N N _t C _t P K Mg Na Ca S Fe Cl											[g/ha]										
		[Vol%]											Al	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	
1	70	0	0,2	44,8	1157	7,7	44,7	6,2	2,1	31,9	11,2	1,2	20,8	696	1,2	40,3	2,2	6,2	54,6	0,3	0,2	0,00	1,3
	70	50	276,6	435,2	9786	75,1	581,7	74,2	34,6	132,3	99,2	6,2	204,4	4003	8,3	464,9	69,7	53,0	590,8	2,3	1,1	0,03	10,2
	70	75	230,7	512,9	11174	101,9	647,2	83,8	39,5	109,7	111,9	4,9	246,4	2614	7,6	593,9	29,2	67,4	852,2	1,8	1,1	0,04	8,0
	100	0	0,8	101,1	2305	12,3	60,6	7,7	1,6	32,1	12,3	1,7	28,8	1353	2,8	197,8	23,5	16,6	129,2	0,7	0,3	0,07	2,8
	100	50	395,5	446,4	12391	116,3	743,5	94,7	46,8	172,3	134,3	8,1	205,5	5476	11,3	570,3	14,3	74,2	655,6	2,9	1,4	0,06	12,3
	100	75	170,8	478,7	12850	115,9	710,4	89,8	32,4	131,7	135,3	6,0	253,8	4684	10,1	972,6	24,1	106,8	1336,6	3,2	1,5	0,16	14,8
2	70	0	3,2	35,6	1619	8,2	59,5	6,1	1,1	14,1	5,3	2,4	15,4	1565	2,7	93,5	3,2	9,6	97,8	0,7	0,1	0,02	2,1
	70	50	42,2	382,6	12464	68,2	592,6	77,7	2,4	84,1	35,8	7,2	206,5	3632	9,1	327,4	8,3	46,2	581,6	1,5	0,8	0,08	8,6
	70	75	179,3	643,6	17691	84,8	917,8	129,0	7,9	111,2	63,1	7,8	374,4	2773	7,0	510,1	6,5	74,4	1425,1	1,8	1,6	0,08	9,2
	100	0	2,8	41,1	1620	9,7	65,2	6,7	0,5	28,1	7,2	1,4	23,5	1054	3,5	176,2	4,9	17,1	111,9	0,5	0,4	0,08	1,7
	100	50	167,5	531,2	13696	93,5	955,7	98,1	8,2	80,9	60,7	5,7	297,0	1100	3,0	163,9	2,7	40,5	432,8	0,7	0,3	0,01	3,1
	100	75	31,3	558,1	18508	75,6	672,3	97,4	2,6	113,5	42,3	7,4	232,5	4966	17,9	1738,1	32,5	200,5	3051,0	3,6	3,1	0,19	13,4
3	70	0	5,3	132,6	5948	19,4	233,8	13,9	1,6	37,4	15,0	1,7	105,2	1214	4,3	410,4	6,0	20,1	139,6	0,6	0,3	0,02	5,7
	70	50	78,0	624,9	14031	83,7	892,3	71,8	17,5	91,7	62,7	7,5	363,5	5451	19,4	1087,0	25,4	161,6	779,9	2,5	1,1	0,23	28,1
	70	75	59,1	651,1	14343	84,4	903,9	81,8	18,2	78,1	66,3	10,2	423,7	5784	18,7	1084,2	18,9	152,5	776,8	2,5	0,9	0,24	24,5
	100	0	16,6	190,6	7054	27,0	306,9	21,8	2,4	59,6	21,7	2,0	137,5	1475	6,6	841,7	86,9	53,2	296,5	0,9	0,8	0,19	6,1
	100	50	143,8	804,9	16230	102,6	1087,4	82,7	20,3	110,1	76,7	9,9	502,7	6620	31,8	876,0	20,5	150,7	723,5	2,9	1,0	0,36	29,4
	100	75	106,7	846,5	17962	111,4	1145,7	101,4	27,1	143,2	87,1	11,1	482,3	11183	44,2	2500,3	57,9	285,5	1580,1	5,6	2,0	2,28	37,7

4.1.1.4 Chemische Bodeneigenschaften

Nachfolgend werden die Nähr- und Schadstoffe der unterschiedlichen Substratzusammensetzungen innerhalb der drei Versuchsjahre betrachtet. Die Mittelwerte mit Standardabweichungen sind in Tabelle 36 und Anlage 10 dargestellt. Um die Parameter der Varianten auch statistisch einschätzen zu können, wurde ein Mittelwertvergleich für Feld 3 (Energiegrasanbau) angestellt, da hier die häufigste Probenahme ($n=5$) stattfand (Anlage 11). Ein statistischer Vergleich über alle Felder mit unterschiedlichem Bewuchs hinweg wurde als nicht sinnvoll erachtet.

Die N_f -Vorräte werden an dieser Stelle ausführlicher dargestellt, da sie für behördliche Entscheidungsträger beim Genehmigungsverfahren von entscheidender Bedeutung sind. Die N_f -Mengen erreichten bei der Variante 70cm-50Vol%KSK auf Feld 1 Durchschnittswerte von 42279 kg/ha, auf Feld 2 von 40601 kg/ha und auf Feld 3 von 39510 kg/ha. Bei Annahme einer identischen Zumischung von 50 Vol% KSK und höherer Mächtigkeit lagen die Vorräte höher: 64030 kg/ha (Feld 1), 50636 kg/ha (Feld 2) und 40318 kg/ha (Feld 3). Ursächlich für die geringe Zunahme auf Feld 3 sind die durchschnittlichen prozentualen N_f -Gehalte. Diese bewegten sich auf der 70 cm mächtigen Variante bei 0,51 % und auf der 100 cm Schichtmächtigkeit nur bei 0,37 %. Die Varianten 70cm-75Vol%KSK besaßen Tonnagen an N_f von 62949 kg/ha (Feld 1), 53240 kg/ha (Feld 2) und 50045 kg/ha (Feld 3). Die Mächtigkeit von 100 cm mit gleicher Zumischung ergab folgende Werte: 74717 kg/ha (Feld 1), 53451 kg/ha (Feld 2) und 71897 kg/ha (Feld 3). Auffällig war wiederum ein fast identischer Vorrat auf Feld 2, obwohl bei höherer Mächtigkeit, eine höhere Menge an N_f erwartet wurde. Ursache für die Unterschiede waren wiederum differente N_f -Gehalte und die praxisüblichen Mischungsverhältnisse. Die Nullvarianten erreichten maximale N_f -Vorräte von 4500 kg/ha. Signifikante Unterschiede wurden zwischen den Nullvarianten und allen KSK-Varianten auf Feld 3 hinsichtlich des N_f -Gehaltes analysiert. Allerdings unterschieden sich auch die KSK-Varianten teilweise voneinander. So waren signifikante Differenzen zwischen 70cm-50Vol%KSK und 70cm-75Vol%KSK sowie zwischen 100cm-50Vol%KSK und 70cm-75Vol%KSK bzw. 100cm-75Vol%KSK auszumachen. Besonders auffällig war, wie oben bereits angemerkt, die Variante 100cm-50Vol%KSK mit den geringsten Werten aller KSK-Varianten.

Um den N-Parameter besser einschätzen zu können, werden folgend NO_3-N und NH_4-N betrachtet. Nach der Ernte von Senf im Herbst 2007 auf Feld 1 lagen noch hohe N_{min} -Gehalte im Substrat vor: 150 kg/ha (100cm-75Vol%KSK) bis 1051 kg/ha NO_3-N (70cm-75Vol%KSK) und 209 kg/ha (100cm-75Vol%KSK) bis 261 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) NH_4-N . Nach der Ernte von Weizen 2008 auf diesem Feld lagen die Gehalte deutlich niedriger und erreichten maximal 134 kg/ha NO_3-N (70cm-50Vol%KSK) und 53 kg/ha NH_4-N (100cm-50Vol%KSK). Im Jahr 2009 waren nach der Ernte von Raps bei den Varianten mit 75 Vol% Zumischung an KSK höhere NO_3-N -Werte mit 597 kg/ha (70cm-75Vol%KSK) und 541 kg/ha (100cm-75Vol%KSK) im Vergleich zu 237 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) und 285 kg/ha (100cm-50Vol%KSK) festzustellen. Die NH_4-N -Werte schwankten währenddessen nur in einem Bereich zwischen 44 und 59 kg/ha.

Auf Feld 2 erfolgte im Jahr 2007 keine Ernte. Jedoch wurden im Jahr 2008 sowohl Roggen im Juni als auch Sudangras im Oktober geerntet. Nach Roggen lagen nur minimale Gehalte an $\text{NO}_3\text{-N}$ bei 70cm-50Vol%KSK, 70cm-75Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK mit 6 bis 16 kg/ha im Boden vor. Nur 100cm-50Vol%KSK erreichte Werte von 70 kg/ha. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte lagen insgesamt mit 25 bis 53 kg/ha leicht höher. Während nach der 2. Ernte 2008 von Sudangras bei den 100 cm mächtigen Varianten 59 kg/ha (100cm-50Vol%KSK) bzw. 70 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ (100cm-75Vol%KSK) und 32 kg/ha $\text{NH}_4\text{-N}$ (100cm-50Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK) nachgewiesen wurden, lagen die Werte auf den 70 cm mächtigen Varianten höher mit 121 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) bzw. 280 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ (70cm-75Vol%KSK) und 30 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) bzw. 50 kg/ha $\text{NH}_4\text{-N}$ (70cm-75Vol%KSK). Im Jahr 2009 nach der Ernte von Mais konnten wieder höhere N_{min} -Gehalte festgestellt werden. Besonders fiel die Variante 70cm-75Vol%KSK mit 1232 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ und 280 kg/ha $\text{NH}_4\text{-N}$ auf. Die restlichen Varianten besaßen 177 bis 261 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ und 60 bis 80 kg/ha $\text{NH}_4\text{-N}$.

Das Feld 3 war geprägt durch eine höhere Anzahl an Ernten und somit an Probenahmen. Im November 2007 hatten die 100 cm mächtigen Varianten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte von 673 kg/ha (100cm-50Vol%KSK) und 308 kg/ha (100cm-75Vol%KSK). Die zugehörigen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte betragen 118 und 153 kg/ha. Die 70 cm mächtigen Varianten lagen unter diesen Werten. Die Variante 70cm-50Vol%KSK pegelte sich bei den N_{min} -Werten zwischen 105 und 117 kg/ha (Mai 2008 bis Juni 2009) ein. Im November 2009 deutete sich ein Mineralisierungsschub mit Werten bis 1180 kg/ha an. Die Variante 70cm-75Vol%KSK hatte mit Ausnahme von November 2009 höhere N_{min} -Werte vorzuweisen. Diese lagen bei 170 bis 278 kg/ha (Mai 2008 bis November 2009). Ähnlich verhielt sich die Variante 100cm-50Vol%KSK. Auch hier konnten in diesem Zeitraum Werte zwischen 119 und 245 kg/ha festgestellt werden. Bei 100cm-75Vol%KSK bildete wieder der November 2009 die Ausnahme mit Werten von 636 kg/ha N_{min} . Die drei Ernten davor erreichten Tonnagen von maximal 200 kg/ha. Im Mai und August 2008 lag N_{min} zum Hauptteil als $\text{NH}_4\text{-N}$ vor, während zu den anderen Terminen $\text{NO}_3\text{-N}$ dominierend war. Bei Betrachtung der Datenlage wurde deutlich, dass der Hauptteil des N_i in organisch gebundener Form vorlag und somit der Pflanzenernährung nicht direkt zur Verfügung stand, allerdings auch in Form von N_{min} nicht auswaschungsgefährdet war. Die zum Teil an N mangelernährten Pflanzen belegten diese Daten. Für die Nullvarianten wurden im gesamten Versuchszeitraum über alle Fruchtarten hinweg betrachtet maximal 81 kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$ und 78 kg/ha $\text{NH}_4\text{-N}$ gemessen. Da die Größen $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ von vielen Faktoren abhängig sind, konnten über den gesamten Zeitraum kaum statistisch gesicherte Zusammenhänge belegt werden. Einzig 70cm-0Vol%KSK unterschied sich signifikant von 70cm-50Vol%KSK und 70cm-75Vol%KSK.

Deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten zeigten sich bei C_t . Eine offensichtliche Steigerung durch KSK-Beimengung war für 50 Vol% zu verzeichnen. Hier wurden unabhängig von der Mächtigkeit Werte zwischen 4,73 und 7,42 % gemessen. Der geringste Wert der KSK-Varianten wurde bei 100cm-50Vol%KSK und Energiegrasbewuchs analysiert. Über 12 % konnten bei Zumischung von 75 Vol% KSK nachgewiesen werden. Eine Ausnahme bildete hier Feld 2 (100cm-75Vol%KSK) mit 9,49 %. Die Nullvarianten der 70 cm-Flächen lagen zwischen 0,10 und 0,33 %, während die 100 cm-Flächen 0,84 bis 1,8 % erreichten. Demzufolge unterschieden sich für Feld 3 die Nullvarianten signifikant von allen KSK-Varianten. Weiterhin konnten signifikante Unterschiede zwischen den

Zumischungen an 50 und 75 Vol% KSK nachgewiesen werden, während die Mächtigkeiten einer Zumischung nicht differierten.

Die **C/N-Verhältnisse** gestalteten sich demnach wie folgt: Die Variante 70cm-50Vol%KSK bewegte sich in einem Bereich zwischen 12,0 und 13,2; die 70cm-75Vol%KSK-Variante zwischen 12,9 und 13,7. Auf der 100 cm mächtigen Variante waren ähnliche C/N festzustellen. Eine Zumischung von 50 Vol% zeigte Verhältnisse zwischen 12,0 und 12,9 und die höhere Zumischung lag in einem etwas weiteren Bereich zwischen 13,3 und 14,4. Die Nullvarianten wiesen bis auf 70cm-0Vol%KSK auf Feld 2 ein sehr weites C/N-Verhältnis mit 35,7 bis 72,9 auf.

Bei dem Parameter P_1 machte sich das Zumischungsverhältnis an KSK bemerkbar. Während bei 50 Vol% KSK Konzentrationen von 0,15 bis 0,24 % analysiert wurden, lagen die Werte bei 75 Vol%KSK mit 0,31 bis 0,43 % höher. Die Nullvarianten erreichten maximal 0,04 %. Damit ergaben sich P_1 -Mengen für die Zumischungen auf den Hektar bezogen von 15823 kg (70cm-50Vol%KSK-F2) bis 34590 kg (100cm-75Vol%KSK-F1). Zur Pflanzenernährung mit P_{verf} standen bei den 50 Vol%-Varianten 53,4 bis 77,6 mg/100g zur Verfügung. Dieser Wert erhöhte sich bei Zumischung von 75 Vol% KSK auf 78,8 bis 103,2 mg/100g. Zum Vergleich sei hier die Gehaltsklasseneinstufung nach VDLUFA genannt. Ab 10,5 mg/100g wird auf Ackerböden von Luxuskonsum ausgegangen. Die maximale Frucht der Varianten in Bezug auf die Mächtigkeit betrug 8536 kg/ha (100cm-75Vol%KSK-F1). Über den Versuchszeitraum war auf keinem der Zumischungsfelder ein Rückgang der verfügbaren Mengen an P nachzuvollziehen. Die Statistik für Feld 3 zeigte signifikante Unterschiede in den P_1 -Mengen. Dabei unterschieden sich 70cm-75Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK, die gekennzeichnet waren durch die höchsten Gehalte. Die verfügbaren P-Gehalte ließen Unterschiede zwischen den Nullvarianten bzw. 100cm-50Vol%KSK mit sehr niedrigen Gehalten und den KSK-Varianten erkennen. Weiterhin fiel 70cm-75Vol%KSK mit den höchsten Durchschnittsgehalten auf.

Die K_1 -Mengen lagen auf den 100cm-50Vol%KSK-Varianten mit 0,82 bis 0,94 % am höchsten. Dem folgten die Varianten 70cm-50Vol%KSK und 70cm-75Vol%KSK. Die niedrigsten Gehalte besaß folglich die Variante 100cm-75Vol%KSK mit 0,55 bis 0,61 %. Es waren damit bei 100cm-50Vol%KSK die höchsten Tonnagen mit 103,7 t/ha anzugeben. Wie schon bei den pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten an P, wurde auch bei K_{verf} deutlich, dass der Zumischungshöhe an KSK eine entscheidende Bedeutung zukommt. Bei 50 Vol% KSK wurden Werte zwischen 51,8 und 72,4 mg/100g analysiert. Die Gehalte der 75 Vol%-Varianten lagen auf höherem Niveau zwischen 57 und 102,3 mg/100g. Wiederum wird der Vergleich mit der VDLUFA angestrebt. Für K gelten Werte ab 19 mg/100g als Gehaltsklasse E. Demzufolge waren hohe Mengen an K_{verf} im Substrat gegeben. Minimal lagen somit bei den KSK-Varianten pro Hektar 3991 kg und maximal 7968 kg vor. Die Nullvarianten erreichten zum Vergleich nur Werte zwischen 5,9 und 9,0 mg/100g. Statistisch unterschied sich bei K_1 70cm-0Vol%KSK von allen KSK-Varianten, während für 100cm-0Vol%KSK keine signifikanten Unterschiede zu 70cm-75Vol%KSK und 100cm-75Vol%KSK nachgewiesen werden konnten. Ebenso waren für die Nullvarianten bei K_{verf} statistisch gesicherte Unterschiede zu den KSK-Varianten feststellbar. Zusätzlich differierten signifikant 70cm-75Vol%KSK (hohe Werte) von 70cm-50Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK.

Bei Betrachtung des Parameters Mg_t fielen auf allen Feldern die Unterschiede der Nullvarianten ins Gewicht. Während auf den 70 cm mächtigen Varianten durchschnittlich 0,31 % (Feld 1); 0,81 % (Feld 2) und 0,28 % (Feld 3) gemessen wurden, lagen die Werte der 100 cm Mächtigkeit deutlich darüber: 0,87 % (Feld 1); 0,85 % (Feld 2) und 0,48 % (Feld 3). Hier wurde deutlich, dass sowohl innerhalb einer Mächtigkeit als auch bei Vergleich der verschiedenen Mächtigkeiten deutliche Unterschiede auftraten. Die Mg_t -Konzentrationen der KSK-Varianten bewegten sich durchschnittlich zwischen 1,08 % (100cm-50Vol%KSK-F3) und 1,38 % (70cm-75Vol%KSK-F2). Es konnte keine eindeutige Tendenz aufgrund der Zumischungshöhe an KSK festgestellt werden. Dies sah jedoch bei Betrachtung des pflanzenverfügbaren Anteils an Mg anders aus. Hier war eine deutliche Abstufung aufgrund des Zumischungsverhältnisses auf allen Feldern ersichtlich. Als Beispiel sei Feld 1 genannt. Die 50 Vol%-Varianten besaßen Werte von 77,3 mg/100g (70 cm) und 76,7 mg/100g (100 cm), während die Werte für 75 Vol% KSK bei 99,6 mg/100g (70 cm) und 94,9 mg/100g (100 cm) lagen. Nach VDLUFA liegt bei entsprechender Bodenart bereits ab 8,6 mg/100g ein Luxuskonsum vor. Es lagen somit enorme Mengen an verfügbarem Mg mit maximal 8441 kg/ha (100cm-50Vol%KSK-F1) vor. Es wurden keine abnehmenden pflanzenverfügbaren Gehalte über den Versuchszeitraum festgestellt. Signifikante Unterschiede traten in Bezug auf Mg_t nur zwischen den Nullvarianten und allen KSK-Varianten auf, während sich Mg_{verf} 70cm-50Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK von allen anderen Varianten signifikant unterschieden. Dies war auch für 70cm-75Vol%KSK mit Ausnahme von 100cm-75Vol%KSK nachzuweisen.

Die Ca-Gehalte des Substrates waren als sehr hoch einzustufen. Durch Zugabe von 50 Vol% KSK wurden Konzentrationen zwischen 1,94 und 3,61 % festgestellt. Durch höhere Zufuhr an KSK stiegen auch die Ca-Konzentrationen im Substrat an und erreichten 3,83 bis 4,8 %. Jedoch muss beachtet werden, dass die mineralische Zumischungskomponente bereits hohe Ca-Gehalte enthielt. Bei 70 cm lagen diese zwischen 0,20 und 0,55 %, stiegen allerdings bei 100 cm auf 1,80 bis 4,28 % an. Somit wurde wiederum deutlich, dass sich die Varianten allein durch die mineralische Bodenkomponente stark unterschieden. Dies drückte sich auch in den Signifikanzen aus. Während sich die Variante 70cm-0Vol%KSK von allen unterschied, wurden für 100cm-0Vol%KSK keine Unterschiede mehr zu 70cm-50Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK festgestellt. Weiterhin konnten die Differenzen zwischen den Zumischungen an 50 und 75Vol% KSK auf Feld 3 statistisch bewiesen werden.

Die Na-Konzentrationen lagen auf der Variante 70cm-75Vol%KSK am höchsten und betragen 641 bis 716 mg/kg. Die der 70cm-50Vol%KSK-Fläche lagen nur bei 440 bis 492 mg/kg. Eine hohe Streuung wurde auf der Variante 100cm-50Vol%KSK erfasst: 368-504 mg/kg. 100cm-75Vol%KSK lieferte Werte zwischen 470 und 524 mg/kg. Die maximale Befruchtung lag bei 5538 kg/ha (100cm-50Vol%KSK-F3). Es konnte auf Feld 3 der Unterschied zwischen 70cm-50Vol%KSK und 70cm-75Vol%KSK statistisch nachgewiesen werden.

Die S-Gehalte nahmen mit zunehmender Zumischung an KSK zu. Während auf den 50 Vol% KSK-Varianten Werte zwischen 0,12 % und 0,22 % gemessen wurden, lagen die 75 Vol%-Varianten darüber: 0,18 % bis 0,30 %. Allerdings muss bemerkt werden, dass schon die Nullvarianten maximale Konzentrationen von 0,09 % erreichten. Signifikante Unterschiede

wurden zwischen 70cm-75Vol%KSK (höchste Gehalte) und 100cm-50Vol%KSK (geringste Gehalte der KSK-Varianten) nachgewiesen.

Auch die **Salzgehalte** der Nullvarianten lagen relativ hoch in einem Bereich zwischen 296 mg/kg bis 549 mg/kg. Jedoch wurde hier wiederum die höhere Zumischung an KSK deutlich: 75 Vol% (1103 bis 2577 mg/kg) und 50 Vol% KSK (868 bis 1660 mg/kg).

Wie schon Ca, war auch die **Fe-Befruchtung** als hoch zu werten. Während die 70 cm Nullvarianten zwischen 0,46 und 0,81 % lagen, waren bei 100 cm höhere Werte zwischen 0,93 und 1,48 % zu finden. Die Varianten 70cm-50Vol%KSK, 70cm-75Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK lagen in einem Bereich zwischen 2,2 und 2,94 %. Es unterschieden sich die Nullvarianten signifikant von den KSK-Varianten.

Die **Cu-Gehalte** der KSK-Varianten von 50 Vol% bewegten sich in einem Bereich von 30,7 bis 48,7 mg/kg. Die Varianten der 75 Vol% Beimengung lagen mit Werten zwischen 55,1 und 91,8 mg/kg deutlich höher. Bei den Nullvarianten wurden maximale Konzentrationen von 8,2 mg/kg analysiert. Die Nullvarianten unterschieden sich signifikant von den KSK-Varianten; die Variante 70cm-75Vol%KSK war durch höchste Gehalte von allen anderen sowie 100cm-50Vol%KSK durch geringste Werte der KSK-Varianten im Vergleich zu 100cm-75Vol%KSK durch signifikante Unterschiede charakterisiert.

Bei **Zn** war ebenso eine Erhöhung mit zunehmender KSK Zumischung zu verzeichnen: 0 Vol% (21,5 bis 52,7 mg/kg), 50 Vol% (139,9 bis 216,3 mg/kg) und 75 Vol% (219,3 bis 405,9 mg/kg). Tendenziell fielen die 100 cm mächtigen Varianten mit geringeren Konzentrationen an Zn auf. Es unterschieden sich alle KSK-Varianten signifikant voneinander.

Die 50 Vol%-Varianten hatten **Cr-Konzentrationen** von 42,3 bis 69,7 mg/kg, die der 75 Vol%-Varianten lagen mit 43,2 bis 56,8 mg/kg in einem ähnlichen Bereich. Die Nullvarianten erzielten maximal 21,5 mg/kg und unterschieden sich somit signifikant von den KSK-Varianten. Des Weiteren unterschied sich 100cm-50Vol%KSK von 100cm-75Vol%KSK.

Für **Ni** wurden bei den 50 Vol%-KSK-Varianten Werte zwischen 25,1 und 30,7 mg/kg ermittelt. Die Gehalte der 75 Vol%-KSK-Substrate lagen mit 20,8 bis 28,7 mg/kg auf geringerem Niveau. Auch war hier wiederum auffällig, dass die 100 cm mächtigen KSK-Varianten geringere Konzentrationen besaßen. Zum Vergleich wurden auf den Nullvarianten maximale Konzentrationen von 15,8 mg/kg gemessen. Damit unterschieden sich die Nullvarianten signifikant von den KSK-Varianten.

As lag auf den 50 Vol%-KSK-Substraten zwischen 5,2 und 8,0 mg/kg und somit vergleichbar zu den 75 Vol%-Varianten mit 5,99 bis 7,39 mg/kg. Wiederum werden als Vergleichsbasis die maximalen Konzentrationen der Nullvariante mit 5,35 mg/kg angegeben. Signifikanzen wurden teilweise zu den Nullvarianten festgestellt.

Die **Cd-Werte** der 50 Vol%-KSK-Varianten lagen zwischen 0,21 bis 0,40 mg/kg. Ein Anstieg bei höherer Zumischung war zu verzeichnen (0,35 bis 0,56 mg/kg). Die Nullvarianten lagen bei maximal 0,10 mg/kg und somit signifikant unter den KSK-Substraten.

Die **Pb-Konzentrationen** stiegen wiederum in Abhängigkeit von der Zumischung von 50 Vol% (20,0 bis 44,6 mg/kg) zur Beimengung von 75 Vol% (31,6 bis 52,7 mg/kg) an. Der Vergleichswert der Nullvarianten lag bei maximal 27,6 mg/kg. Statistisch fiel die Variante 70cm-75Vol%KSK durch sehr hohe Werte auf. Es ließen sich Unterschiede zu 70cm-50Vol%KSK, 100cm-50Vol%KSK und den Nullvarianten statistisch belegen.

Die **pH-Werte** der KSK-Varianten lagen im gesamten Versuchszeitraum zwischen 7,2 und 7,5. Ein Einfluss der Zumischungshöhe und angebauten Fruchtart wurde nicht deutlich, ebenso wenig ein zeitlicher Trend der pH-Wert Veränderung. Die pH-Werte auf Feld 1 und 3 der Nullvarianten bewegten sich zwischen 7,6 und 7,7. Die Werte der Nullvarianten unterschieden sich auf Feld 3 signifikant von den Flächen 70cm-50Vol%KSK, 70cm-75Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK.

Tabelle 36 Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 1)
– Teil 1

Mächtigkeit [cm]	Zunäherung [Vol%]	Field	pH-Wert	NO ₃ -N [mg/100g]	NH ₄ -N [mg/100g]	N _t [%]	C _t [%]	C/N	P _{verr} [mg/100g]	K _{verr} [mg/100g]	Mg _{verr} [mg/100g]	P _t [%]	K _t [%]	Mg _t [%]	Na [mg/kg]	Ca [%]	S [%]	Fe [%]	Salzgehalt [mg/kg]
70	0	MW	7,7	0,12	0,18	0,01	0,22	35,7	1,6	8,1	7,7	0,03	0,30	0,31	81	0,44	0,04	0,81	404
		SD	0,1	0,13	0,15	0,00	0,03	7,5	0,4	2,5	1,6	0,00	0,18	0,10	28	0,17	0,01	0,29	97
	2	MW	7,6	0,10	0,07	0,01	0,11	11,1	1,5	5,9	4,5	0,03	0,26	0,18	72	0,20	0,01	0,46	296
		SD	0,1	0,08	0,02	0,00	0,02	35,1	1,1	0,7	0,3	0,01	0,08	0,03	33	0,06	0,00	0,04	95
	3	MW	7,6	0,31	0,21	0,01	0,33	47,4	1,5	8,0	7,8	0,03	0,24	0,28	64	0,55	0,06	0,72	447
		SD	0,1	0,36	0,20	0,01	0,22	26,9	0,8	3,0	3,1	0,01	0,17	0,14	26	0,33	0,04	0,42	52
70	50	MW	7,4	3,05	1,44	0,50	7,25	14,6	74,5	58,8	77,3	0,24	0,63	1,22	461	3,61	0,22	2,30	1660
		SD	0,2	1,84	1,69	0,10	0,91	9,2	17,5	1,8	14,3	0,01	0,20	0,08	141	0,59	0,04	0,09	873
	2	MW	7,4	1,32	0,60	0,53	6,35	12,0	63,3	51,8	68,1	0,21	0,88	1,29	492	2,22	0,15	2,79	910
		SD	0,1	1,13	0,38	0,13	1,58	12,0	11,6	6,2	14,3	0,17	0,10	0,08	72	0,59	0,07	0,16	270
	3	MW	7,3	3,41	1,59	0,51	6,77	13,2	74,2	62,9	72,3	0,24	0,74	1,22	439	2,67	0,20	2,57	1354
		SD	0,0	5,98	1,31	0,09	1,07	12,2	18,4	16,3	8,8	0,05	0,19	0,12	72	0,11	0,02	0,45	359
70	75	MW	7,3	9,30	1,78	0,98	12,81	13,0	98,0	102,3	99,6	0,43	0,70	1,33	641	3,90	0,30	2,33	2450
		SD	0,1	8,80	1,75	0,14	0,69	5,1	18,5	2,3	7,6	0,03	0,09	0,01	162	0,18	0,07	0,28	1298
	2	MW	7,3	9,10	2,22	0,95	12,24	12,9	84,5	82,4	106,2	0,39	0,70	1,38	716	3,83	0,27	2,35	2577
		SD	0,1	11,42	2,41	0,10	1,94	18,5	3,7	10,0	22,5	0,04	0,17	0,07	141	0,49	0,06	0,15	1122
	3	MW	7,4	2,45	1,70	0,89	12,22	13,7	91,1	94,9	101,3	0,42	0,58	1,15	658	4,28	0,29	2,32	1820
		SD	0,1	0,85	0,63	0,18	1,84	10,2	14,2	16,0	12,8	0,04	0,16	0,57	101	0,25	0,06	0,48	496

Tabelle 37 Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 1)
– Teil 2

Mächtigkeit [cm]	zumischung [Vcl%]	KSK Feld	pH-Wert	NO ₃ -N [mg/100g]	NH ₄ -N [mg/100g]	N _t [%]	C _t [%]	C/N	P _{vert} [mg/100g]	K _{vert} [mg/100g]	Mg _{vert} [mg/100g]	P _t [%]	K _t [%]	Mg _t [%]	Na [mg/kg]	Ca [%]	S [%]	Fe [%]	Salzgehalt [mg/kg]
100	0	MW	7,7	0,15	0,24	0,02	1,78	72,9	2,7	9,0	8,6	0,05	0,45	0,89	143	4,29	0,09	1,48	549
		SD	0,1	0,07	0,25	0,01	0,05	10,7	0,3	1,7	2,0	0,00	0,19	0,03	46	0,66	0,05	0,10	28
	2	MW	7,7	0,12	0,07	0,03	1,80	69,1	2,5	6,4	7,8	0,04	0,44	0,85	161	4,25	0,05	1,24	510
		SD	0,0	0,12	0,02	0,01	0,24	46,1	0,7	0,5	1,1	0,00	0,08	0,07	40	0,81	0,04	0,13	35
	3	MW	7,6	0,20	0,23	0,02	0,84	49,4	1,8	7,2	7,0	0,03	0,32	0,48	91	1,81	0,06	0,94	462
		SD	0,5	0,13	0,10	0,01	0,60	44,7	0,6	1,0	3,1	0,01	0,17	0,19	40	1,27	0,04	0,34	87
100	50	MW	7,4	3,73	1,03	0,58	7,42	12,7	77,6	72,4	76,7	0,24	0,94	1,32	480	2,33	0,19	2,95	1587
		SD	0,1	3,71	0,94	0,05	0,78	15,5	21,3	11,0	13,1	0,02	0,18	0,07	136	0,29	0,07	0,02	679
	2	MW	7,3	1,18	0,49	0,46	5,52	12,0	55,8	54,0	61,4	0,20	0,85	1,22	368	1,94	0,12	2,58	868
		SD	0,1	1,03	0,20	0,06	0,94	15,3	3,3	7,2	5,9	0,01	0,16	0,04	92	0,23	0,02	0,27	98
	3	MW	7,4	2,03	0,86	0,37	4,73	12,9	53,4	53,9	51,4	0,15	0,82	1,08	503	2,27	0,15	2,84	962
		SD	0,1	2,35	0,35	0,06	0,52	8,3	11,0	12,3	4,6	0,01	0,12	0,06	202	0,57	0,06	0,89	320
100	75	MW	7,4	3,25	1,26	0,93	12,41	13,3	103,2	90,7	94,9	0,43	0,55	1,31	594	5,14	0,27	1,91	1900
		SD	0,1	3,06	1,17	0,11	0,54	4,8	16,0	12,4	3,8	0,03	0,17	0,04	144	0,58	0,09	0,04	667
	2	MW	7,5	1,12	0,57	0,67	9,49	14,2	78,8	57,0	71,6	0,31	0,61	1,22	470	4,56	0,18	1,91	1104
		SD	0,1	1,06	0,18	0,07	1,38	19,2	0,6	9,6	7,7	0,04	0,07	0,01	159	0,37	0,05	0,28	169
	3	MW	7,5	2,80	1,08	0,90	12,96	14,4	81,3	71,6	86,9	0,37	0,60	1,30	524	4,80	0,25	1,96	1422
		SD	0,1	2,80	0,29	0,21	3,08	14,5	24,0	19,1	6,8	0,06	0,06	0,06	64	0,37	0,07	0,21	500

4.1.2 Versuch 2

4.1.2.1 Pflanzliche Inhaltsstoffe

Sonnenblume

Die geringsten Gehalte an N_t , NO_3-N , P, K, Mg, Ca, S und Fe traten auf der KSK50 Variante im Vergleich zur Nullv und KSK75 auf (Tabelle 38). Jedoch konnten hier die höchsten Gehalte an Cl und Na nachgewiesen werden. Die Gehalte der Nullv lagen jedoch bei Betrachtung der genannten Parameter unter denjenigen von KSK75. Geringfügig niedrigere Schwermetallgehalte konnten bei KSK75 in Bezug auf Al, Ni, As und Hg im Vergleich zur Nullv analysiert werden, während v.a. Mn, Zn, Cd und Pb verstärkt aufgenommen wurden (Anlage 13).

Wie bereits hingewiesen, besaß die Variante KSK50 sehr niedrige Konzentrationen. Dies wurde auch bei dem Vergleich mit den Daten der TLL bei N_t , Mg, P und K deutlich. Jedoch lag der Parameter N_t auch bei den anderen KSK-Varianten auf zu niedrigem Niveau. Mg, K, Mn, Cu und Zn bewegten sich im Normbereich, während P generell durch zu geringe Gehalte auffiel.

Tabelle 38 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sonnenblume (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N_t [%]	NO_3-N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	1,37	12,70	0,15	3,15	0,24	1,18	0,18	0,96	0,08	0,11
50	1,35	10,20	0,06	1,61	0,11	0,31	0,09	1,67	0,26	0,06
75	1,71	12,20	0,23	3,94	0,31	0,91	0,19	1,17	0,18	0,16

Mais

Bei Vergleich der KSK-Varianten ließ sich feststellen, dass KSK50 höhere Werte an NO_3-N , P, K, Ca, S, Cl, Na und Fe als KSK75 besaß (Tabelle 39). Die höchsten Gehalte an N_t , P, Fe, Cu und Zn waren bei der Nullv nachzuweisen. Die Gehalte von Al, Ni, As und Hg in der Biomasse, gewachsen auf der Nullvariante, lagen über denen der KSK-Variante von KSK75. Der Vergleich mit den TLL-Angaben lieferte auch hier das Bild von zu geringen Konzentrationen an N_t , P, Al und Cu in der Biomasse, während sich Mg, K, Na, Ca, S, Mn, Fe und Zn in einem optimalen Bereich bewegten und wiederum Cl durch sehr hohe Werte auffiel.

Tabelle 39 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Mais (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	1,32	5,70	0,16	1,49	0,12	0,25	0,08	0,48	0,07	0,18
50	1,24	7,20	0,13	2,55	0,25	0,33	0,11	1,10	0,17	0,12
75	1,29	3,50	0,10	2,11	0,32	0,27	0,10	0,87	0,05	0,09

Sudangras

KSK50 hatte gegenüber KSK75 geringere Gehalte an NO₃-N, P, K, Mg, Ca, S und Cl. Auf der Nullv konnten mit 0,69 % NO₃-N, 0,29 % P und 0,48 % Ca sehr hohe Gehalte in der Pflanze im Vergleich zu den KSK-Varianten nachgewiesen werden (Tabelle 40). Die Konzentrationen an Schwermetallen bei einer Zumischung von 75 Vol% KSK lagen bei Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg und Pb höher als bei Versuch 1. Die Mikronährstoffe Mn, Cu und Zn, sowie die Schwermetalle Al, Cr, Cd, Hg und Pb wurden in die Biomasse der KSK75-Variante im Vergleich zur Nullvariante verstärkt aufgenommen.

Während die K-, S- und Fe-Gehalte auf den KSK-Flächen in der Norm lagen, war der Parameter Ca nach TLL-Angaben als gering einzustufen. Allgemein zu hoch waren die Gehalte an Na, Mg und Cl einzuschätzen.

Tabelle 40 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sudangras (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	1,50	6,90	0,29	1,85	0,23	0,48	0,12	0,64	0,06	0,15
50	1,62	3,10	0,20	1,41	0,25	0,31	0,12	0,62	0,21	0,15
75	1,45	3,90	0,21	1,89	0,36	0,37	0,14	0,76	0,07	0,14

Sommerraps

Die Rapspflanzen auf KSK50 besaßen höhere Gehalte an NO₃-N, K, Mg, Ca, Cl, Fe und Mn im Vergleich zu KSK75. Es fiel zudem auf, dass die Nullvariante mit 3,5 % höhere Werte an N_t als die KSK-Varianten besaß (Tabelle 41). Je höher die Zumischung an KSK war, desto höhere Schwermetallgehalte, mit Ausnahme von Mn und Hg, wurden in den Pflanzen vorgefunden. Der Vergleich mit der Nullv zeigte, dass die Elemente Mn, Cu und Hg in den Gehalten höher lagen als die der KSK-Varianten.

Tabelle 41 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sommerraps (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	3,53	23,35	0,52	3,06	0,29	2,16	1,04	1,00	1,64	0,08
50	2,66	13,03	0,54	2,72	0,55	1,77	1,18	1,33	1,63	0,12
75	2,68	12,11	0,56	2,41	0,54	1,57	1,20	1,19	1,62	0,10

Zuckerhirse

Generell konnten bei der KSK50-Variante höhere Nährstoffgehalte (NO₃-N, K, Mg, Ca, S, Cl, Na und Mn) als bei höherer Zumischung festgestellt werden (Tabelle 42). Die Nullvarianten fielen durch die höchsten Gehalte an N_t, NO₃-N, P, K, Ca, Na und Mn und Cu im Vergleich zu den KSK-Varianten auf. Bei Untersuchung der Schwermetallgehalte ließen sich bei der KSK75-Variante höhere Gehalte an Cu, Zn, Al, Cr, As und Pb als bei KSK50 erkennen. Im Vergleich zur Nullvariante konnten bei Ni und Cd die Gehalte durch Zumischung an KSK gesenkt werden.

Bei Vergleich mit Angaben der TLL besaß die auf KSK angebaute Biomasse hohe Gehalte an N_t, Na, Mg, S und Cl, während sich Ca im Minimum bewegte und bei Fe und Al Normwerte erreicht wurden.

Tabelle 42 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Zuckerhirse (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	3,17	17,41	0,37	2,79	0,27	0,54	0,24	0,60	0,27	0,11
50	2,33	5,51	0,30	2,13	0,40	0,50	0,28	0,86	0,21	0,10
75	2,47	4,21	0,31	1,91	0,37	0,45	0,18	0,62	0,09	0,13

Sommergerste

Eindeutig geht aus Tabelle 43 hervor, dass bei N_t, NO₃-N, P, K, Cl, Na, Fe, Mn, Cu und Zn aufgrund einer höheren Zumischung an KSK eine Steigerung in den Gehalten zu verzeichnen war. Die Nullvariante besaß hingegen die höchsten Konzentrationen an Ca und S. Weiterhin auffällig war bei den KSK-Varianten, dass sie im Vergleich zur Nullvariante kaum höhere Werte an P und K erzielten. Die Schwermetallgehalte ließen grundsätzlich für die Variante KSK75 die höchsten Gehalte an Al, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg und Pb erkennen. Dies galt ebenso für As.

Im Vergleich zur TLL-Studie wurden bei allen KSK-Varianten sehr hohe Gehalte an Na, Zn und Cl nachgewiesen. Normgehalte wurden für N_t, P, K, Ca, Fe und Cu konstatiert, während ein leichtes Mn-Defizit vorlag.

Tabelle 43 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Sommergerste (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	1,78	3,73	0,32	1,79	0,13	0,39	0,22	0,85	2,27	0,05
50	1,67	2,32	0,32	1,74	0,19	0,26	0,17	1,49	3,06	0,05
75	1,83	2,66	0,38	1,86	0,19	0,37	0,20	1,59	3,46	0,11

Triticale

Triticale auf KSK zeigte für fast alle Parameter eine Steigerung in den Gehalten im Vergleich zur Nullvariante (Tabelle 44). Ausnahme bildeten Na, Fe und Mn. Im Vergleich der Höhe der Zumischung konnten für KSK50 die höheren Gehalte an N_t, NO₃-N, K, Mg, Cl, Fe nachgewiesen werden. Bezüglich der Schwermetalle ließ ebenfalls die Biomasse auf KSK50 das höhere Aufnahmepotential erkennen.

Der Vergleich wurde mit Literaturwerten von Wintertriticale der TLL vorgenommen, da keine Datengrundlage für Sommertriticale bei der TLL vorlag. Die N_t-Gehalte lagen 0,3 % über denen der TLL. Die Gehalte von S und Cl lagen in der Regel bei allen KSK-Varianten wesentlich über den Werten der TLL, auch Ca war als hoch einzustufen. P, K, Mg und Na waren als Normgehalte einzuschätzen, während bei Fe und Al auf allen KSK-Varianten geringere Gehalte vorlagen. Die Cu-Werte waren im unteren Bereich des Vergleiches und Zn im oberen Bereich. Mn schien auf den KSK-Flächen in der Biomasse im Defizit.

Tabelle 44 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Triticale (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	N _t [%]	NO ₃ -N [g/kg]	P [%]	K [%]	Mg [%]	Ca [%]	S [%]	Cl [%]	Na [g/kg]	Fe [g/kg]
0	1,55	0,48	0,22	1,16	0,11	0,23	0,20	0,38	0,14	0,07
50	1,62	1,85	0,28	1,73	0,19	0,28	0,22	0,82	0,09	0,09
75	1,58	1,66	0,30	1,65	0,17	0,29	0,22	0,79	0,23	0,05

Energiegras

Die Biomasse erreichte ihren maximalen Gehalt an N_t erst im November 2009 mit 2,8 % (KSK75) und 3,4 % (KSK50). Die Nullv besaß zu diesem Zeitpunkt jedoch ebenfalls einen hohen Wert von 2,5 %. Die NO₃-N-Werte der KSK-Varianten (Tabelle 45) lagen im August 2008 zwischen 4,3 g/kg und 4,8 g/kg und fielen bis zur Ernte im November 2009 auf maximal 1,9 g/kg. Die höchsten Gehalte an P waren durch KSK-Beimengung im November 2009 zu beobachten. Sie lagen auf einem Niveau zwischen 0,35 % und 0,41 %. In den vorangegangenen Ernten wurde ein Wert von 0,24 % nicht überschritten. Die höchsten K-Gehalte der KSK-Varianten wurden beim ersten Aufwuchs 2009 konstatiert. Deutliche Unterschiede zwischen den Varianten wurden nicht sichtbar. Die Biomasse der ersten Ernte aller Varianten besaß die höchsten Mg-Gehalte. Diese nahmen im Laufe der Zeit ab. Die höchsten Ca-Gehalte über den gesamten Zeitraum wies die Nullv auf, während die KSK-Varianten Werte zwischen 0,35 % und 0,55 % besaßen. Die S-Gehalte von KSK50 und

KSK75 lagen in einer Spanne zwischen 0,22 % und 0,3 %. Die Aufnahme von **Cl** ließ Unterschiede zwischen der Nullv und den KSK-Varianten erkennen. Kaum einen Einfluss hatte jedoch die Zumischungshöhe an KSK. Es wurden Maximalwerte von 1,88 % (KSK75, Juni 2009) erreicht. Die **Na**-Gehalte der Biomasse auf KSK nahmen hingegen kontinuierlich ab. Zwischen erster und letzter Ernte war ein Unterschied von 1,79 g/kg (KSK50) gegeben. Die **Fe**-Gehalte lagen bei den KSK-Varianten der ersten Ernte auf ihrem höchsten Niveau von 0,44 g/kg, sanken im Juni 2009 auf maximal 0,08 g/kg (KSK75) und stiegen im November 2009 auf maximal 0,26 g/kg (KSK50) an.

Die Gehalte für **Mn**, **Cu** und **Zn** lagen auf der KSK75-Variante tendenziell höher als auf KSK50 und der Nullv (Anlage 14). Es zeigte sich, dass die Biomasse auf den KSK-Varianten im Juni 2009 geringere **Schwermetall**gehalte besaß als im November 2009, unabhängig von der Zumischungshöhe. Jedoch wies die erste Ernte der Biomasse auf KSK75 im August 2008 die höchsten Werte an Schwermetallen im gesamten Versuchszeitraum auf. Der Vergleich mit der Nullvariante lieferte die Aussage, dass die Pflanzeninhaltsstoffe **Al**, **Hg** und **Cd** in den Bereichen der Vergleichsvariante lagen, während **Cr**, **Ni** und **Pb** die Werte überstiegen.

Es konnten ähnliche Aussagen wie in Versuch 1 getroffen werden. Die Gehalte an **N**, **P**, **K**, **Mg** und **S** lagen auf allen KSK-Varianten in einem optimalen Bereich im Vergleich zu den Angaben der TLL. Allerdings bewegten sich **P** und **Ca** auf dem unteren Niveau der Vergleichsskala. **Cl** und vor allem **Na** besaßen viel zu hohe Werte. Bei **Fe** konnte auf den KSK-Flächen zum ersten Erntetermin ein leicht erhöhter Wert erreicht werden.

Tabelle 45 Pflanzliche Inhaltsstoffe von Energiegras (Versuch 2)

Zumischung KSK	Erntetermin	N _t	NO ₃ -N	P	K	Mg	Ca	S	Cl	Na	Fe
[Vol%]		[%]	[g/kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]
0	Aug 2008	1,77	3,30	0,24	2,36	0,41	0,60	0,30	1,27	1,05	0,23
	Jun 2009	1,38	2,42	0,13	1,89	0,20	0,51	0,20	0,98	0,25	0,05
	Nov 2009	2,53	1,05	0,29	1,20	0,18	0,61	0,24	0,55	1,16	0,25
50	Aug 2008	2,15	4,30	0,22	2,75	0,37	0,42	0,22	1,68	2,57	0,44
	Jun 2009	1,79	3,48	0,23	2,94	0,32	0,37	0,23	1,74	1,08	0,07
	Nov 2009	3,40	1,66	0,41	2,37	0,31	0,55	0,30	1,06	0,78	0,26
75	Aug 2008	2,25	4,80	0,24	2,91	0,38	0,49	0,22	1,74	1,88	0,43
	Jun 2009	2,29	4,89	0,23	3,33	0,34	0,35	0,25	1,88	1,35	0,08
	Nov 2009	2,78	1,91	0,35	2,02	0,28	0,42	0,25	1,00	0,46	0,18

4.1.2.2 Chemische Bodeneigenschaften

Die Bodenuntersuchungen fanden nur auf den Feldern 2 (Mais – Zuckerhirse) und 5 (Energiegras) statt. In Tabelle 46 sind die durchschnittlichen Ergebnisse dargestellt, während sich die Analytikergebnisse der Schwermetalle in Anlage 15 finden. Ein Mittelwertvergleich wurde wieder nur bei Anbau von Energiegras durchgeführt (Anlage 16).

Die KSK50-Varianten erreichten N_t -Gehalte von 0,03 bis 0,1 %; durch höhere Beimengung stieg der Wert auf 0,06 bis 0,39 % an. Die Nullvariante konnte nur durchschnittliche Werte von 0,02 % aufweisen. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Die NO_3 -N-Gehalte der KSK50-Varianten erreichten maximale Gehalte von 0,78 mg/100g und die KSK75 von 1,24 mg/100g. Es war im zeitlichen Verlauf keine Abnahme in den Gehalten feststellbar. Auch hier konnten wiederum keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Varianten festgestellt werden. Die NH_4 -N-Gehalte von KSK50 und KSK75 lagen zwischen 0,10 bzw. 0,04 und 0,22 mg/100g. Die Werte unterschieden sich in den zwei Versuchsjahren nicht. Der Parameter C_t lag bei KSK50 auf einem durchschnittlichen Niveau von 1,12 und 1,14 %, während bei KSK75 höhere Werte mit 1,84 bis 3,06 % ermittelt wurden. Die Berechnung der **C/N-Verhältnisse** lieferte für KSK50 Werte von 15,5 bis 19,7 sowie für KSK75 von 12,2 bis 25,8. Die Nullvarianten besaßen sehr weite C/N-Verhältnisse bis 40,3. Für P_t wurden durch höhere Zumischung an KSK auch höhere durchschnittliche Gehalte im Boden analysiert; Nullv (115 bis 131 mg/kg), KSK50 (531 bis 707 mg/kg) und KSK75 (985 bis 1872 mg/kg). Es konnten jedoch keine statistischen Unterschiede belegt werden. Dies war für P_{verf} anders. Hier unterschied sich die Nullv signifikant von KSK75. Die Abstufung der durchschnittlichen Gehalte über die gesamten Felder war wie folgt vorzunehmen: KSK75 (57,4 mg/100g) > KSK50 (29,9 mg/100g) > Nullv (1,6 mg/100g). Es war im zeitlichen Verlauf keine Abnahme in den Gehalten feststellbar. Statistische Unterschiede in den Gesamtgehalten an K_t wurden nicht berechnet. Es konnte jedoch eine deutliche Abhängigkeit von der Zumischungshöhe festgestellt werden. Während die KSK50-Variante durchschnittlich 505 mg/kg erreichte, konnten bei KSK75 745 mg/kg festgestellt werden. Jedoch lag auch die Nullv mit 748 mg/kg recht hoch. Von der Relation entsprechend gestalteten sich auch die K_{verf} -Gehalte. Hier konnte das folgende Bild gezeichnet werden: KSK75 (12,9 mg/100g) > KSK50 (6,9 mg/100g) > Nullv (2,8 mg/100g). Die höchsten **Mg**-Gehalte wurden bei den KSK75-Varianten mit 1816 mg/kg analysiert. Dem folgten KSK50 (1218 mg/kg) und die Nullv (639 mg/kg). Bei den **verfügbaren Mg**-Gehalten konnten ebenfalls bei KSK75 (25,6 mg/100g) die höchsten Werte analysiert werden, während KSK50 durchschnittlich nur 15,9 mg/100g erreichte. Bei **Ca** konnten auf den KSK75-Varianten die höchsten Gehalte mit 1,96 % festgestellt werden. Dem folgte die KSK50-Variante mit 1,34 %. Die Nullv lag bei 0,89 %. Währenddessen wurden auf den KSK-Flächen **Na**-Gehalte von 108 mg/kg (KSK50) und 216 mg/kg (KSK75) gemessen. Die Nullv besaß einen Durchschnittswert von 49 mg/kg. Die **S**-Gehalte der Nullv waren im Vergleich zu den KSK-Flächen mit 454 mg/kg recht hoch. Es ließ sich durch zunehmende Beimengung an KSK auch eine Zunahme in den Gehalten feststellen: 425 mg/kg (KSK50) und 543 mg/kg (KSK75). Bei Betrachtung des **Salzgehaltes** fiel die Abnahme im zeitlichen Verlauf auf. Eine Ausnahme bildete die KSK50-Variante mit Energiegrasbewuchs. Sie lag durchschnittlich bei 89 mg/100g. Bei KSK75-F5 war eine Reduktion von 209 auf 144 mg/100g feststellbar. Die Nullvariante hatte einen Durchschnittswert von 46,6 mg/100g. Bereits das sandige Zumischungssubstrat besaß **Fe**-Gehalte von 0,49 %. Ein identischer Wert wurde bei KSK50 erzielt, jedoch erhöhte sich der Wert auf 0,63 % bei höherer KSK-Beimengung. Die As- und Schwermetallgehalte wurden nur auf Feld 5 (Energiegras) bestimmt. Bei **Cu** waren durch höhere Zumischung an KSK auch steigende Gehalte von 28,2 mg/kg zu verzeichnen. Der Wert reduzierte sich auf 9,5 mg/kg für KSK50. Die Nullv erzielte 3,8 mg/kg. Diese

Reihenfolge konnte auch für **Zn** bestätigt werden: KSK75 (136,4 mg/kg) > KSK50 (40,0 mg/kg) > Nullv (12,4 mg/kg). Auch bei **Cr** besaß KSK75 die höchsten Werte mit 11,8 mg/kg, während KSK50 mit 6,0 mg/kg niedriger lag. Ebenso ließ sich dies für **Ni** feststellen. Die Werte der KSK-Varianten lagen zwischen 4,8 mg/kg (KSK50) und 6,6 mg/kg (KSK75). Bei **Cd** wurde wieder die Reihenfolge KSK75 (0,199 mg/kg) > KSK50 (0,07 mg/kg) > Nullv (0,027 mg/kg) analysiert. Die Zumischung von 50 Vol% KSK (0,006 mg/kg) besaß geringere **Hg**-Werte als die Nullvariante mit 0,008 mg/kg. Allerdings konnten bei KSK75 hohe Werte von 0,014 mg/kg analysiert werden. Die KSK75-Variante unterschied sich somit signifikant von KSK50. Die KSK75-Variante hatte mit 21,2 mg/kg die höchsten **Pb**-Gehalte, gefolgt von KSK50 (7,1 mg/kg) und der Nullv (3,7 mg/kg). Bei **As** konnte der höchste Gehalt bei KSK50 mit 3,6 mg/kg analysiert werden, während die Nullv 3,2 mg/kg vorweisen konnte. Die pH-Werte der Nullvarianten lagen bei 7,8 und sanken durch Zumischung von KSK unabhängig von der Höhe der Beimengung auf 7,5 bis 7,6. Dabei wurden jeweils die geringeren Werte auf dem Energiegrasfeld bestimmt. Signifikante Unterschiede bestanden zwischen den KSK- und den Nullvarianten.

Tabelle 46 Chemische Eigenschaften des Bodens für alle Varianten und den gesamten Versuchszeitraum (Mittelwerte und Standardabweichung, Versuch 2)

Zumischung [%]	KSK	Feld	pH-Wert	NO ₃ -N [mg/100g]	NH ₄ -N [mg/100g]	N _t [%]	C _t [%]	C/N	P _{vert} [mg/100g]	K _{vert} [mg/100g]	Mg _{vert} [mg/100g]	P _t [%]	K _t [%]	Mg _t [%]	Na [mg/kg]	Ca [%]	S [%]	Fe [%]	Salzgehalt [mg/kg]
0	MW	2	7,8	0,05	0,04	0,01	0,37	40,3	1,5	2,3	2,6	0,01	0,08	0,07	63	0,93	0,05	0,53	529
	SD		0,1	0,02	0,01	0,00	0,19	16,4	0,1	0,5	1,3	0,00	0,07	0,01	62	0,19	0,06	0,14	149
5	MW	5	7,8	0,03	0,10	0,02	0,41	20,6	1,8	3,3	2,5	0,01	0,03	0,06	36	0,85	0,04	0,46	403
	SD		0,1	0,03	0,06	0,02	0,07	16,0	0,2	1,2	0,5	0,00	0,08	0,01	27	0,16	0,03	0,03	29
50	MW	2	7,6	0,63	0,15	0,07	1,12	15,7	36,2	7,3	15,9	0,07	0,06	0,10	98	1,35	0,04	0,45	896
	SD		0,1	0,02	0,07	0,02	0,26	0,2	3,5	0,3	2,5	0,04	0,05	0,02	47	0,38	0,04	0,14	530
75	MW	5	7,5	0,59	0,18	0,07	1,14	16,8	23,7	6,5	15,8	0,05	0,03	0,15	119	1,40	0,05	0,53	885
	SD		0,1	0,33	0,04	0,03	0,52	2,1	10,0	0,7	5,5	0,03	0,07	0,08	26	0,26	0,03	0,09	61
75	MW	2	7,6	0,42	0,09	0,11	1,84	16,7	58,5	12,1	24,7	0,10	0,08	0,13	167	1,62	0,03	0,58	1255
	SD		0,0	0,38	0,06	0,07	0,38	8,9	5,7	5,2	9,2	0,02	0,08	0,01	146	0,16	0,03	0,02	998
75	MW	5	7,5	0,72	0,18	0,22	3,06	14,1	56,3	13,7	26,5	0,19	0,07	0,23	264	2,30	0,07	0,67	1349
	SD		0,1	0,49	0,06	0,15	2,26	1,7	32,1	9,7	19,0	0,14	0,09	0,15	183	0,91	0,07	0,14	790

4.1.3 Diskussion

Erträge

Generell konnte bei den Fruchtarten Weizen, Sudangras, Mais und Raps durch eine erhöhte Zumischung an KSK auch eine Zunahme in den Frischmasseerträgen bei gleicher Mächtigkeit ermittelt werden. Eine höhere Mächtigkeit von 100 cm im Vergleich zu 70 cm bei gleicher Zumischung an KSK wirkte sich zudem positiv auf Roggen, Weizen, Sudangras, Mais, Raps und Energiegras aus. Im Vergleich zur Nullvariante wurde bei allen untersuchten Fruchtarten eine Ertragssteigerung deutlich. Dies ließ sich auch statistisch belegen, da sich die Frischmasseerträge der 70cm-0Vol%KSK Varianten bei allen untersuchten Fruchtarten signifikant von den KSK-Varianten unterschieden, während dies für 100cm-0Vol%KSK mit Ausnahme der 2. Ernte des Energiegrases ebenso galt. Bei 70cm-50Vol%KSK gab es generell keine signifikanten Unterschiede zu 70cm-75Vol%KSK. Allerdings konnten signifikante Differenzen bei 100cm-50Vol%KSK bei den Fruchtarten Roggen und Raps und durch eine höhere Zumischung an KSK von 75 Vol% bei Weizen, Sudangras, Mais und Raps im Vergleich zu 70cm-50Vol%KSK festgestellt werden. Signifikante Unterschiede gab es zudem zwischen 70cm-75Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK bei Roggen und 100cm-75Vol% bei Raps. Bei Betrachtung der 100 cm mächtigen Variante konnten nur bei Roggen signifikante Differenzen der unterschiedlichen Zumischungen an KSK nachgewiesen werden. Um einen Vergleich zur Landwirtschaft zu bekommen, wurden repräsentative Erträge der Bundesländer Thüringen und Sachsen-Anhalt für das Jahr 2009 ausgewählt (BAYRISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 2012). Bei Betrachtung des Energiegrases konnte bei allen KSK-Varianten von hohen Erträgen ausgegangen werden, die sich im Versuchszeitraum von 2008 auf 2009 steigerten. Bei Mais und Sudangras wurden durch eine Zumischung von 75 Vol% KSK ebenfalls hohe Ernteerträge erzielt, während die Varianten mit 50 Vol%KSK-Zumischung durchschnittliche Erträge erreichten. Bei Winterroggen sowie Winterweizen wurden hingegen auf allen KSK-Varianten Mindererträge geerntet. Bei Raps und Senf fehlen Vergleichswerte, da diese normalerweise nicht als Ganzpflanze geerntet werden.

Aufgrund nicht optimierter Bodenbearbeitung und wegen des Verzichts auf Einsatz von Pflanzenschutzmitteln war bei fast allen Fruchtarten auf den Nullvarianten ein starker Unkrautbesatz zu verzeichnen, der zum Teil auch auf den KSK-Varianten auftrat.

In der Literatur finden sich wenige Angaben zum Anbau von Energiepflanzen auf Rekultivierungsschichten aus KSK. Da die Einsatzmenge von KSK, KS oder Abfallkompost sowie die angebaute Fruchtart für den Ertragsverlauf von entscheidender Bedeutung sind, werden nun verschiedene Untersuchungen detaillierter vorgestellt. Begonnen wird mit KSK, gefolgt von KS und anderen zur Rekultivierung einsetzbaren Substraten. Die einzelnen Ergebnisse sind weiterhin geordnet nach ihrer Substrateinsatzmenge dargestellt.

Von LIEBHARD et al. (2004) wurden leicht höhere TM-Erträge bei einer Zumischung von 60 % KSK im Vergleich zu 40 % bei Anbau von Gras erzielt, während bei Miscanthus durch

geringere Zumischung höhere Erträge auftraten. Auch GOMISCEK (1999) konnte gesteigerte Erträge für Feldgras bei Einsatz bis 60 % KSK im Vergleich zu den „Erdevarianten“ nachweisen. Ähnliches verzeichnete RAUCHECKER (2001). Auf 60 % KSK stellte er ein höheres Biomassewachstum für Gras als auf 40 % fest. Auch lagen die Erträge über denen auf „Erde“ angebauten Varianten. Hinsichtlich des Biomasseaufwuchses für Weidelgras stellten HUA et al. 2008 eine Steigerung bis zu einer Gabe von 60 % KSK fest, die einen deutlichen Ertragszuwachs von 86 – 128 % zur Folge hatte. Bei Schwingel lag das Optimum jedoch nur bei 40 % KSK, was einen Ertragszuwachs von 27 – 44 % nach sich zog. Danach waren negative Effekte zu beobachten. Experimente mit Zumischungen von 20 % und 40 % KSK und dem Anbau von *Brassica chinensis* (Chinesischer Senfkohl) und *Agropyron elongatum* (Riesen-Weizengras) machten WONG und SELVAM (2009). Die TM-Erträge der beiden Fruchtarten stiegen durch zunehmende Zumischung an KSK an. Auch OSTOS et al. (2008) konnte durch KSK-Zugabe von 40 % ein besseres Wachstum bei Wilder Pistazie erkennen.

In den folgenden Studien wurden im Vergleich zum eigenen Versuch nur geringe Mengen an KSK eingesetzt. Jedoch war, wie die Untersuchungen zeigten, bereits durch diesen niedrigen Einsatz ein gesteigertes Biomassewachstum zu verzeichnen. Zum Beispiel wies KATHKE (2010) durch Gaben von 125 t bis 500 t KSK eine signifikante Steigerung des Biomassewachstums von Knaulgras nach. Es konnte ein Mehrertrag von 182 dt/ha bei Eintrag von KSK im Vergleich zur mineralischen Düngung erzielt werden. Bei Anbau von Luzerne unterschieden sich die Erträge zwischen Vergleichsvariante und KSK-Flächen allerdings hauptsächlich nicht signifikant. Untersuchungen zur Rekultivierung von Kalirückstandshalden mit Hilfe von KSK und KS sind von LÜCKE (1997) bekannt. Er setzte KSK bzw. KS bis 400 t/ha ein. Dabei erzielten die KS-Varianten gegenüber den KSK-Varianten geringere Biomasseaufwüchse von Knaulgras und Rotschwingel. Auch ließen KSK-Gaben bis 175 t/ha zu einem Kiefern-Bestand mit zunehmender Kompostzumischung die Biomasseerträge steigen (SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA 2006). WEI und LIU (2005) stellten in Untersuchungen mit Applikation von 150 t TS KSK bei Chinakohl und Gerste fest, dass die Erträge signifikant im Vergleich zur Kontrolle stiegen. Allerdings zeigte herkömmlicher NPK Dünger bei Gerste höhere Erträge als die KSK-Variante. Weiterhin ermittelte MORENO et al. (1996) bei Düngungssteigerungsversuchen von 20-80 t/ha KSK steigende Stroherträge für Gerste, allerdings wurde der Körnertrag nur bei höchster Zugabe an KSK verbessert. LAG et al. (2010) fand durch Applikation von 70 t/ha KSK eine signifikante Zunahme der Erträge von Artischocken. Bereits bei einem Einsatz von nur 4,5 t/ha KSK konnte ein höheres Pflanzenwachstum von Ackerbohnen festgestellt werden (GARRIDO et al. 2005).

Allerdings waren in der Literatur auch Angaben zu ausbleibenden Effekten bzw. negativen Ertragsbilanzen zu finden. Unter anderem brachten MANTOVI et al. (2005) in einem schluffig lehmigen Boden mit pH-Werten von 7,8 über einen Zeitraum von 12 Jahren 10 t KSK jährlich aus. Jedoch reagierte Mais kaum auf eine Zugabe von KSK mit erhöhten Erträgen. Auch WEN et al. (1997, 1999, 2002a,b) stellte bei Einsatz von KS im Vergleich mit KSK (bis 80 t TS/ha in 2 Jahren) in verschiedenen Studien kaum Unterschiede im Ertrag bei Bohnen, Salat und Petunien bei den unterschiedlichen Düngungsregimen fest. Bis zu 100 % KSK setzten CHENG et al. (2007) bei der Kultivierung von Weidelgras ein. Negative Effekte auf das

Pflanzenwachstum wurden ab einer Zugabe von 40 % KSK beobachtet. Des Weiteren wurden durch Zumischung bis 240 t/ha KSK zu einem Boden mit pH-Werten von 6,8 bei Anbau von Hafer Mindererträge von 43 % ermittelt (PICHTEL und ANDERSON 1997). Auch bei Zugaben von 30,6 t/ha zu Gras bzw. 25,7 t/ha KS, KSK zu Mais wurden sowohl bei Mais als auch bei Gras geringere Erträge im Vergleich zu KS und mineralischer Zudüngung beobachtet (WARMAN und TERMEER 2005b). Trotz KSK-Zugabe bis 1500 kg P / ha konnte auch McCoy (1986) kein gesteigertes Wachstum von Mais feststellen. Über einen Zeitraum von 12 Jahren wurden jährlich 175 kg N / ha als KSK verbracht. Verglichen mit mineralischer Düngung wurden jedoch auch bei dieser Studie geringere Ernteerträge erzielt (ROS et al. 2006).

Ebenso sind Untersuchungen zur Keimrate von Pflanzen auf KSK-Substraten bekannt. Dabei stellten WONG und SELVAM (2009) bei Riesen-Weizengras durch eine Zumischung an KSK Germinationsverluste fest, die sich mit steigender Zumischung erhöhten. Kein Einfluss war allerdings bei Chinesischem Senfkohl zu beobachten. WEI und LIU (2005) konnten ebenso keinen negativen Effekt auf die Keimung von Raps ab einer Gabe von 150 t KSK nachweisen. Bei einer Zumischung von 60 % KSK lag die Keimrate von Wiesenlieschgras bei 65 % und steigerte sich durch höhere Beimengung von 75 % KSK auf 90 %. Für Gartenkresse wurde bei allen Zumischungen eine Keimrate von 100 % erreicht (GOMISCEK 1999). Als ein Grund für eine verminderte Keimrate und Biomasseleistung wurde das ungünstig hohe C/N-Verhältnis aufgeführt. Damit verbunden ist eine geringe Verfügbarkeit an N (PICHTEL und ANDERSON 1997). Auch WARMAN und TERMEER (2005b) konnten nur einen geringen Verfügbarkeitsindex von N, der bei 14 % im Vergleich zur mineralischen Düngung lag, feststellen. Ebenso gibt LÜCKE (1997) ein unausgewogenes Nährstoffangebot bei Einsatz von KSK an. Allerdings wurde KSK von GOMISCEK (1999) als geeignetes Substrat zur Rekultivierung dargestellt, weil es eine langfristige Nährstoffverfügbarkeit gewährleistet. Positiv wirkt sich eine Kombination von mineralischen und organischen Düngern aus (WEI und LIU 2005, ROS et al. 2006). Auch DELGADO ARROYO et al. (2002) wiesen nach, dass sich durch Zugabe von 12 t/ha KSK und 350 kg/ha Urease in 4 Jahren der Maiseertrag um 24 % steigern ließ. Eine weitere zu nennende Ursache geringerer Erträge ist der durch die Düngung mit KSK auftretende erhöhte Salzgehalt im Boden. Ab einem Salzgehalt von 0,2 % kam es bei Studien von LÜCKE (1997) zu Wuchsdepressionen bei Knautgras und Rotschwengel. Die Salinität von KSK wurde ebenfalls von CAI et al. (2010) untersucht. Bei Salzgehalten über 1,45 % war das Wachstum von Tomaten und Gurken eingeschränkt. Gerade in ariden Gebieten ist der Salzgehalt des Bodens von nicht untergeordneter Rolle (MORENO et al. 1996). Des Weiteren werden Ertragseinbußen bei hohen Gaben von KSK auf die Akkumulation von niedermolekularen organischen Säuren und Schwermetallen zurückgeführt, die sich toxisch auf die angebaute Kultur auswirken können (PICHTEL und ANDERSON 1997, HUA et al. 2008). Allerdings wurde bei Studien von PLANQUART et al. (1999) mit einem Einsatz von 30 t KSK nachgewiesen, dass die hohe Nährstoffzufuhr mit dem KSK sich stärker auswirkt als die negativen Effekte durch die Schwermetallbelastung.

Ergänzend werden weitere Rekultivierungssubstrate und deren Auswirkungen auf die Ertragsleistung vorgestellt. Ein Mix von 5:1 mit KS ließ zum Beispiel auf einem Kalksteinbruch eine höhere Bestandesdichte in kürzerer Zeit erwarten, jedoch reduzierte sich

die Artenvielfalt (MORENO-PENARANDA 2004). Bei der Rekultivierung von Deponien wurde eine 1 cm dicke Schicht an KS aufgebracht. Resultate zeigten ein besseres Wachstum der Pioniervegetation (INGELMO et al. 1998). In Versuchen mit steigender Zugabe an KS bis zu maximal 160 t/ha auf Salat wurden ebenfalls steigende Erträge festgestellt (MOHAMMAD und ATHAMNEH 2004). Des Weiteren wurde eine Stimulation des Pflanzenwachstums von Weidelgras durch die Gabe von maximal 140 t/ha KS von PASCUAL et al. (2004) nachgewiesen. Bei Gaben von 7,5 t/ha KS stellten auch GERZABEK et al. (1998) eine Wachstumsförderung fest. KIDD et al. (2007) wiesen an einem Boden, der 10 Jahre KS Applikation erhielt, doppelte Erträge bei Anbau von Mais im Vergleich zur Kontrolle nach. RAMACHANDRAN und D'SOUZA (1998) stellten bei KS Zumischung ebenfalls höhere Maiserträge fest. HAUBOLD-ROSAR und GAST (2005) konnten durch Gaben von Klärschlamm- oder Kompost ebenso steigende Biomasse aufzeigen. Bei Einsatz von 15 g KS / kg Boden wurden keine negativen Effekte auf das Pflanzenwachstum beobachtet, allerdings wurde Cd als Problem benannt (OUDEH et al. 2002). Jedoch sind, wie schon bei Einsatz von KSK, auch Negativauswirkungen bekannt. Bei der Düngung von KS auf Hartweizen ließen sich von FROST und KETCHUM (2000) keine Unterschiede des Ertrags im Vergleich zur mineralischen Düngungsvariante belegen. SANDERS et al. (1986) konnte durch Zugabe von stark mit Cu, Zn und Ni belastetem Klärschlamm keinen großen Einfluss auf den Ertrag von Gerste und Hafer feststellen. Auch BROUWERE und SMOLDERS (2006) arbeiteten mit unterschiedlich behandelten Klärschlämmen in Höhe von 150 t in 3 Jahren und verglichen diese mit N-Düngern. Die Erträge von Winterweizen stiegen durch Applikation von Klärschlamm mit niedrigem Schwermetallgehalt leicht an, während höherer Schwermetallgehalte einen negativen Einfluss zeigten. Bei Zugabe von 120 t/ha KS wurde eine signifikante Abnahme der Frischmasse von Raps, Weizen und Wicke festgestellt (CARBONELL et al. 2009).

Pflanzliche Inhaltsstoffe

Hinsichtlich der Mächtigkeit und des Zumischungsverhältnisses an KSK ergaben sich für den Versuch 1 bei den untersuchten Parametern und Fruchtarten tendenzielle Aussagen. Der N_t -Gehalt zeigte eine Abhängigkeit von der Zumischungshöhe an KSK. Die höhere Zumischung von 75 Vol% hatte bei Sudangras, Mais, Raps und Senf die höheren Gehalte in der Biomasse vorzuweisen. Zusätzlich wiesen die 70 cm mächtigen Varianten für Sudangras und Senf die höheren Werte auf. Bei den anderen untersuchten Kulturen spielte die Schichtmächtigkeit für die Aufnahme von N_t keine Rolle. Auch für Versuch 2 waren höhere Gehalte an N_t bei Sonnenblume, Mais, Raps, Zuckerhirse und Gerste durch steigende Zumischung an KSK nachzuweisen.

Im Vergleich zu Literaturwerten wurden bei Versuch 1 zu niedrige Gehalte an N_t bei den KSK-Varianten für Roggen, Weizen und Raps ermittelt, während im Versuch 2 die Werte weniger im Defizitbereich lagen. Es wurden lediglich zu geringe N_t -Aufnahmen bei Anbau von Mais bestimmt.

Bei Untersuchungen von GOMISCEK (1999) und RAUCHECKER (2001) lagen die N_t -Gehalte in Gras bei einer Zumischung von 40 % beziehungsweise 60 % KSK höher als auf den „Erde“-Varianten. Wie im eigenen Versuch besaß die höhere Zumischung an KSK die höheren Gehalte in der Pflanze. Auch CHENG et al. (2007) wies eine Steigerung der N_t -Gehalte bei

Weidelgras durch Zugabe von 20 % KSK nach. Ebenso wurden bei Chinesischem Senfkohl und Riesen-Weizengras durch Beimischung von 20 bis 40 % KSK steigende N-Gehalte in der Biomasse beobachtet (WONG und SELVAM 2009). Bei Verwendung eines lehmigen Sandes und der Zumischung von 6 % KSK (135 t/ha) wurde die N-Aufnahme von Rohrschwengel durch TESTER et al. (1982) untersucht. Je höher der zugegebene Anteil an N war, desto mehr N wurde in der Pflanze wiedergefunden. Während 167 d wurden maximal 8 % des Kompost-N ausgenutzt. Des Weiteren war eine Abhängigkeit von der Textur zu beobachten, da die Pflanzen auf den lehmigen Sand eine höhere Aufnahme an N als auf dem schluffigen Lehm erkennen ließen (TESTER et al. 1982). Auch MORENO et al. (1996) ermittelte bei Gerste und Einsatz von 20-80 t/ha KSK steigende N-Konzentrationen in der Pflanze im Vergleich zur Kontrolle. Ebenso wurden durch die 12-jährige Zugabe an 10 t KSK höhere N-Gehalte im Weizenkorn nachgewiesen (MANTOVI et al. 2005). Hingegen wurden von ZHANG et al. (2006) bei KSK-Gaben von 200 t/ha nur N-Ausnutzungsraten von 11 % im ersten und 1-3 % in den folgenden Anbaujahren von Gerste und Weizen konstatiert. Es wurde die Feststellung getroffen, dass für eine optimale N-Versorgung eine Düngung alle zwei Jahre in Höhe von 100 t/ha sinnvoll ist. Auch MCCOY (1986) konnte bei einer Gabe von 25,7 t/ha KSK nur einen geringen Gehalt an N im Korn von Mais nachweisen. Ferner wurde bei Anwendung von KSK in Gemüsebau wie Salat, Kohl und Tomate N nur bis zur sechsten Woche aufgenommen (FALAHI-ARDAKANI et al. 1987).

Das Aufnahmeverhalten von N bei Einsatz von KS oder Abfallkompost kann als weiterer Hinweis in die Betrachtung aufgenommen werden. Eine 1,9-mal höhere N-Aufnahme in die Rapspflanze wurde von GERZABEK et al. (1998) bei Anwendung von nur 7,5 t/ha KS gemessen. Allerdings wurde bei Verwendung von kommunalem Abfallkompost in einer Maiskultur eine geringere Konzentration an N im Vergleich zur NPK-Düngung festgestellt (MKHABELA und WARMAN 2005).

Die Aufnahme des Parameters P in die Biomasse von Versuch 1 ist wiederum pflanzenartenabhängig. Während sich bei Sudangras, Senf und Gras die Höhe der Zumischung an KSK nicht bemerkbar machte, wirkte sich bei Raps eine höhere Zumischung mit steigenden Gehalten aus. Bei Mais lief dies konträr. Die Schichtmächtigkeit zeigte keinen Einfluss bei Mais, Raps, Weizen und Energiegras, während sich bei Roggen und Senf die 100 cm mächtige Variante als vorteilhaft erwies. Bei Versuch 2 wurden durch geringere Zumischung an KSK auch geringere Gehalte an P bei Sonnenblume, Sudangras, Gerste, Raps, Triticale und Zuckerhirse analysiert.

Im Gegensatz zu Vergleichswerten der TLL wurden bei Versuch 1 zu niedrige Gehalte an P bei Anbau von Energiegras, Roggen und Mais festgestellt. In Versuch 2 betraf es nur den angebauten Mais.

Hinsichtlich der Höhe des Zumischungsverhältnisses ist RAUCHECKER (2001) zu erwähnen, welcher bei geringer Zumischung von 40 % KSK höhere P-Gehalte im Vergleich zu 60 % KSK in der Grasbiomasse feststellte. Ebenfalls sind Zunahmen an P-Konzentrationen bei Rohrschwengel durch SIKÓRA et al. (1982) bekannt. Vergleichbares konnten MORENO et al. (1996) in Gerste und MANTOVI et al. (2005) in Weizen durch KSK-Beimengung nachweisen. Auch WONG und SELVAM (2009) sowie OSTOS et al. (2008) konnten steigende Konzentrationen bei Zugabe bis 40 % KSK in Senfkohl, Weizengras beziehungsweise Wilder

Pistazie beobachten. Ferner stellten IPPOLITO et al. (2010) bis zu Gaben von 30 t/ha KSK in Abhängigkeit von Art und Jahr erhöhte P-Konzentrationen in Gras fest. Hingegen konnte trotz KSK-Zugabe bis 1500 kg P / ha die P-Aufnahme von Mais nicht erhöht werden (McCOY 1986).

Auch bei Einsatz von KS wiesen BROUWERE und SMOLDERS (2006) nach, dass die Gehalte an P im Weizenkorn geringfügig unter denen mit Dünger behandelten Pflanzen lagen. KIDD et al. (2007) wiesen durch 10-jährige KS-Gabe nach, dass das P-Angebot den Pflanzenbedarf deutlich überstieg. Jedoch wurde konstatiert, dass die P-Aufnahme in der Pflanze auch bei Vorliegen eines enormen Angebotes nicht erhöht war. Ein Bioabfallkompost mit einer jährlicher Fracht von 32 t/ha wurde über einen Zeitraum von 5 Jahren ausgebracht. Die angebauten Fruchtarten Dinkel und Hafer ließen kaum eine Erhöhung an P erkennen (BARTL et al. 2002). Auch MKHABELA und WARMAN (2005) identifizierten Abfallkompost als äquivalente P-Ressource. Ein weiteres Indiz für die P-Versorgung der Pflanzen sind im Boden vorhandene Schwermetalle. FÄSSLER et al. (2010) untersuchten die Wirkung zu hoher Gaben an Cu und Zn und analysierte Defizite an P in der Biomasse, die jedoch äußerlich keine Mangelsymptome erkennen ließ. Des Weiteren ist die P-Verfügbarkeit hauptsächlich abhängig von Fällungsreaktionen in der Kläranlage. Bei Einsatz von 4,85 mg P / 100g Boden als KS in fester und flüssiger Form wurde festgestellt, dass die P-Ausnutzung von 8 % in drei Jahren insbesondere bei flüssigem KS und P-Fällung mit Fe in der Kläranlage vergleichbar mit Superphosphat war. Eine Abhängigkeit von der Bodenart war jedoch gegeben. Bei Mais wurden auf Sand höhere P-Entzüge im Vergleich zur mineralischen Düngung festgestellt. Die Fe- und Al-P sowie die Ca-P-Formen unterlagen kaum Veränderungen, während sich der organische Teil v.a. auf Lößböden änderte (ANONYMUS 2001). Zu einem anderen Urteil kam SIMONS (2008). Er stellte fest, dass Fe-gefällter KS die geringste P-Verfügbarkeit hatte, während Mg-gefällter die höchste besaß. Die mit Fe und Al gefällten KS gingen mit geringeren Erträgen bei Anbau von Welschem Weidelgras einher.

Bei Betrachtung des Parameters K besaß die Biomasse der 70 cm mächtigen Variante in Versuch 1 eine höhere Aufnahme für Mais und Weizen, während die Schichtmächtigkeit bei den anderen Kulturen keine Auswirkungen hatte. Die höhere Zumischung an KSK ging bei Mais und Raps mit den höheren Gehalten in der Pflanze einher, während alle anderen Fruchtarten keine Unterschiede zwischen den Zumischungsgraden lieferten. Bei Versuch 2 konnte für die K-Aufnahme eine Abhängigkeit von der Zumischungshöhe des eingesetzten Substrates angenommen werden. Durch zunehmende Beimengung an KSK stiegen die Gehalte für Energiegras, Sonnenblume, Sudangras, Gerste und Triticale an, während Mais, Raps und Zuckerhirse tendenziell geringere Werte hatten. Auch für K wurden zu geringe Werte im Vergleich zur Literatur auf den KSK-Varianten von Versuch 1 bei Roggen, Weizen und Raps gemessen.

Es sind wiederum GOMISCEK (1999), RAUCHECKER (2001), WONG und SELVAM (2009) sowie CHENG et al. (2007) anzuführen, die in verschiedenen Grasarten bzw. Senfkohl steigende K-Konzentration durch den Einsatz von KSK nachweisen konnten. WARMAN und TERMEER (2005a) begründeten die hohen Gehalte an K im Gras hingegen durch zu geringes Biomassewachstum bei Gaben von 30,6 t/ha KSK. In Gemüse wurde K nur bis zur sechsten Woche aufgenommen (FALAH-ARDAKANI et al. 1987). WEN et al. (1997, 1999, 2002a,b)

konstatierte bei Einsatz von KS im Vergleich mit KSK (bis 80 t TS/ha in 2 Jahren) in verschiedenen Studien, dass die K-Verfügbarkeit in organischen Düngern vergleichbar ist mit mineralischen, wenn man KSK-Mengen ab 20 t/ha einsetzt. Jedoch besitzen deutsche KS und KSK nur geringe Mengen an K. Dadurch kann es zur Insuffizienz bei Pflanzen kommen.

Die Aufnahme von **Mg** in die verschiedenen angebauten Pflanzen des Versuches 1 war grundsätzlich unabhängig von der Mächtigkeit zu sehen. Die höhere KSK-Zumischungsmenge von 75 Vol% konnte bei Gras und Senf steigende Gehalte vorweisen. In Versuch 2 konnten bei Raps, Triticale und Zuckerhirse mit steigender Beimengung niedrigere Gehalte im Pflanzenmaterial nachgewiesen werden, während sich die restlichen Fruchtarten konträr verhielten.

In den Studien von GOMISCEK (1999) und RAUCHECKER (2001) wurde in die Grasbiomasse bei Verwendung von KSK weniger Mg im Vergleich zur „Erde“-Variante aufgenommen. Auch konnte festgestellt werden, dass eine Zumischung von 40 % KSK höhere Konzentrationen in der Pflanze zur Folge hatte als 60 % Beimengung. GOMISCEK (1999) stellte eine Änderung der Nährstoffaufnahme zwischen den Jahren fest, die mit erhöhter Konkurrenz im ersten Anbaujahr zwischen Mg und Ca bzw. K erklärt wurde. Ca und K wurden im ersten Jahr verstärkt ausgewaschen und minderten somit im zweiten Jahr die Konkurrenz. Äußerst geringe Auswirkungen auf die Mg-Konzentration wurden durch WARMAN und TERMEER (2005b) nachgewiesen.

Für Weizen und Sudangras war der **Ca**-Gehalt in Versuch 1 bei der geringer mächtigen Variante höher, während die 50 Vol%-Variante bei diesen Kulturen sowie Senf und Raps mit höheren Gehalten einherging. Hingegen stieg der Ca-Gehalt in Versuch 2 mit zunehmender Zumischung an KSK bei Sonnenblume, Gerste und Triticale an, sank jedoch bei Mais. Für **S** ließen sich keine Abhängigkeiten von der Zumischungshöhe und der Mächtigkeit in Versuch 1 ableiten. Während bei Sonnenblume, Sudangras und Raps in Versuch 2 generell steigende pflanzliche Werte für S bei höherer Zumischung an KSK gemessen wurden, sank der Gehalt bei Mais und Zuckerhirse und blieb identisch bei Triticale.

Ca fiel im Versuch 1 im Vergleich zu Literaturwerten der TLL auf, da Defizite bei Energiegras, Weizen, Sudangras und Raps auftraten. Auch in Versuch 2 konnte bei Sudangras und Zuckerhirse ein Ca-Mangel unterstellt werden. Weiterhin fiel der S-Gehalt auf. Er war bei Zuckerhirse und Triticale erhöht.

Wie schon bei P und Mg erwähnt, konnten auch für Ca und S von GOMISCEK (1999) und RAUCHECKER (2001) geringere Konzentrationen in die Grasbiomasse bei Einsatz von KSK im Vergleich zur „Erde“-Variante nachgewiesen werden. Auch hier besaß die Zumischung von 40 % KSK höhere Konzentrationen in der Pflanze als 60 % KSK. Die höheren Ca-Gehalte auf den „Erdevarianten“ wurden begründet durch einen erhöhten Anteil an anorganischem C und damit stärkerer Löslichkeit des Carbonates.

Die Mächtigkeit hatte auf die **Na**-Aufnahme in Versuch 1 keinen Einfluss, allerdings konnten bei Roggen und Weizen bei geringerer Menge an KSK höhere Gehalte nachgewiesen werden. Ähnlich wie Ca, verhielt sich auch Na in Versuch 2. Durch steigende Beimengung an KSK nahmen die Gehalte in Energiegras, Gerste und Triticale zu, während Gegenteiliges

für Mais, Raps und Zuckerhirse beobachtet wurde. Im Vergleich zu Literaturwerten wurden bei Versuch 1 zu hohe Werte für Na bei Energiegras und Mais beobachtet. Ebenfalls zu hoch war die Aufnahme in Versuch 2 bei Energiegras, Sudangras, Hafer, Sommergerste und Zuckerhirse.

Als Literaturquellen sind wiederholt GOMISCEK (1999) und RAUCHECKER (2001) aufzuführen, die steigende Gehalte im Vergleich zu den „Erde“-Varianten nachwiesen. Auch waren durch höhere Zumischung an KSK steigende Gehalte in der Grasbiomasse zu erkennen.

Bei **Cl** wurden in Versuch 1 auf der geringer mächtigen Variante höhere Gehalte bei Senf, Weizen, Sudangras, Mais und Raps festgestellt. Die Zumischungshöhe wirkte sich hingegen nur eindeutig bei Senf und Raps aus. Auch für Versuch 2 war bei der Aufnahme von Cl eine Pflanzenspezifität zu sehen. Die geringere Zumischung an Substrat lieferte höhere Werte für Mais, Raps und Zuckerhirse, während die anderen Fruchtarten sinkende beziehungsweise konträr verlaufende Gehalte besaßen. Cl wurde im Vergleich zu anderen Studien in zu hohen Mengen aus dem Boden von Energiegras, Roggen, Sudangras und Mais (Versuch 1) aufgenommen. Ähnliches lässt sich für den Versuch 2 bei allen angebauten Fruchtarten bestätigen.

Bei Betrachtung der **Schwermetalle** sowie **Al** und **As** wird ein Vergleich mit der Nullvariante angestrebt. Bei Senf, Roggen und Weizen des **Versuches 1** ging die höhere Schichtmächtigkeit mit den höheren Gehalten an Fe im Pflanzenmaterial einher. Dies konnte für Senf und Roggen ebenfalls für die geringere Zumischung an KSK bestätigt werden. Für die restlichen Fruchtarten konnten keine Regelmäßigkeiten festgestellt werden. Der Parameter **Zn** zeigte bei allen untersuchten Fruchtarten durch Zumischung an KSK eine Zunahme in den pflanzlichen Gehalten. Dies galt ebenso für Cu bei Energiegras, Senf, Roggen und Weizen, während bei Sudangras und teilweise bei Mais und Raps geringe Werte im Vergleich zur Nullvariante ermittelt wurden. Der **Mn**-Gehalt stieg bei Zumischung von KSK im Vergleich zur Nullvariante bei Senf und Roggen, allerdings wurden sinkende Gehalte für Weizen, Sudangras, Mais und teilweise für Energiegras und Raps festgestellt. Bei **Al** wurden bei allen Fruchtarten bei höchster Zumischung an KSK im Vergleich zur Nullvariante geringere Gehalte gemessen. Ausnahme bildete Weizen mit identischen Werten. Ähnliches konnte für **Cr** bestätigt werden. Auch hier waren bis auf Energiegras und Senf sinkende Gehalte zu beobachten. Hingegen stiegen die Werte für **Ni** und **As** bei Roggen, Weizen und teilweise bei Energiegras, Senf und Raps an. Sinkende bzw. gleichbleibende Gehalte wurden ebenso für **Cd** und **Hg** bei allen untersuchten Fruchtarten bestimmt, während dies für **Pb** mit Ausnahme von Senf und Weizen genauso nachgewiesen wurde. Ein zu nennender Faktor im Vergleich zu den TLL-Angaben war Cu für Roggen, Weizen und Mais. Eine zu hohe Fe-Aufnahme wurde zusätzlich bei Mais und Roggen konstatiert, während zu viel Zn von Mais und Weizen aufgenommen wurde.

In **Versuch 2** stiegen die Fe-Gehalte durch Zumischung bei Sonnenblume an, während die Werte für Mais, Sudangras und Triticale sanken. Außer für Mais wurde eine steigende Aufnahme von Zn bei Einsatz von KSK-Substrat im Vergleich zur Nullvariante beobachtet. Ebenfalls steigende Gehalte an Cu wurden bei Anbau auf KSK für Sonnenblume, Triticale und Sudangras gemessen. Die Mn-Werte lagen bis auf Raps, Triticale, Sommergerste und

Zuckerhirse auf einem höheren Niveau verglichen mit der Nullvariante. Für Cr, Cd und Pb wurden bei den Fruchtarten Mais, Sonnenblume und Sudangras steigende Gehalte in der pflanzlichen Biomasse bei Anbau auf KSK im Vergleich zur Nullvariante nachgewiesen, während bei Ni Gegenteiliges zu beobachten war. Auch für Sommergerste, Sommertriticale sowie Raps und Zuckerhirse wurden erhöhte Gehalte an Cr im Vergleich zur Nullvariante konstatiert. Für Cd konnten zusätzlich steigende Gehalte bei Triticale gemessen werden. Die restlichen Kulturen besaßen sinkende bzw. gleichbleibende Gehalte. Erhöhte Gehalte bei Pb konnten weiterhin bei Gerste und Zuckerhirse festgestellt werden. Bei Betrachtung des Parameters Hg fiel auf, dass für Gerste, Triticale und Zuckerhirse sowie für Mais, Sonnenblume und Sudangras gleichbleibende Gehalte nachvollzogen werden konnten. Raps hatte hingegen bei KSK sinkende Gehalte zu verzeichnen. Die Al-Werte der auf KSK angebauten Fruchtarten Mais, Sonnenblume und Sudangras lagen niedriger als auf den Nullvarianten. Bei As war wiederum ein differenziertes Bild in Abhängigkeit der Fruchtarten zu erkennen. Steigende Gehalte waren bei Raps und Sommergerste nachzuvollziehen, während die Werte für Mais und Sonnenblume sanken sowie für Sudangras, Triticale und Zuckerhirse gleich blieben. Im Vergleich zur TLL-Literatur sind die Mn-Gehalte auffällig, die für Sommergerste und Triticale einen zu niedrigen Wert aufwiesen. Hingegen lagen die Zn-Gehalte bei Triticale und Gerste auf einem höheren Niveau, wie auch die Fe-Werte bei Hafer.

Ebenfalls wurden von GOMISCEK (1999) die Schwermetallgehalte in Gras untersucht. Zn, Cu, Mo, Cl, Pb und Ni lagen auf den KSK-Varianten (40 und 60 % KSK) höher, die von Fe, Mn, Cd, Cr, Al und Co auf niedrigerem Niveau als auf den „Erde“-Varianten. Bei WONG und SELVAM (2009) wurden durch zunehmende Beimengung an KSK von 20 % bis 40 % KSK steigende Gehalte in der Biomasse an Cu, Zn, Fe, Mn und Cd von Chinesischem Senfkohl und Riesen-Weizengras beobachtet. Bis zu einer Gabe von 20 % KSK reicherten sich Cu, Zn und Pb in Weidelgras an (CHENG et al. 2007). Auch in der Biomasse von Hafer konnten für Cu, Ni und Zn zunehmende Gehalte durch KSK-Gaben bis 240 t/ha festgestellt werden, während keine Beziehungen zu Pb und Cr nachgewiesen wurden (PICHTEL und ANDERSON 1997). Statistisch konnten durch Zumischung von 150 t/ha KSK erhöhte Zn und Cu Konzentrationen in Blättern und Korn von Gerste nachgewiesen werden, wobei die höhere Ablagerung in den Körnern zu finden war. Zn wurde in stärkerem Maße aufgenommen als Cu (WEI und LIU 2005). MORENO et al. (1996) ermittelte bei Gerste und Einsatz von 20-80 t/ha KSK steigende Cd- und Zn-Konzentrationen in der Pflanze im Vergleich zur Kontrolle, während Ni und Cu nicht in erhöhtem Maße aufgenommen wurden. Bei einer Gabe von 30,6 t/ha KSK waren kaum Auswirkungen auf den Gehalt an Fe, Cu und Mn in Gras bemerkbar. Allerdings wurden höhere Gehalte an Zn als bei mineralischer Düngung gemessen (WARMAN und TERMEER 2005b). Steigende KSK-Gaben bis maximal 30 t/ha KSK ließen in Abhängigkeit von Art und Jahr die Konzentrationen an Cu, Mo und Zn in der Grasbiomasse steigen (IPPOLITO et al. 2010). Bei der Anwendung von KSK in Gemüse (Brokkoli, Tomate, Pfeffer, Kohl und Salat) wurden die Elemente Zn und Cd während der gesamten Vegetationsperiode aufgenommen (FALAH-ARDAKANI et al. 1987). RAMACHANDRAN und D'SOUZA (1998) wiesen nach, dass Mn bei hohen pH-Werten in gleichem Maße wie aus der Kontrolle aufgenommen wurde. Bei niedrigen pH-Werten hingegen wurden in der Pflanze geringere Gehalte aufgrund der Bildung von unlöslichen organischen Komplexen gefunden.

Des Weiteren kann die Schadstoffaufnahme in Abhängigkeit von der Textur verlaufen. Weizenkorn besaß durch 12-jährige Zugabe an 10 t KSK höhere Gehalte an Zn und Cu (MANTOVI et al. 2005). Hingegen konnte ein linearer Verlauf zwischen KSK Beimengung in Höhe von 30 t und Schwermetallaufnahme von Raps von PLANQUART et al. (1999) nicht festgestellt werden. Auch durch die Zumischung von 80 t/ha KSK wurden die Cu und Zn-Gehalte in der Pflanze im Gegensatz zur Einbringung von KS nicht erhöht (WEN et al. 1997, 1999, 2002a,b). Ebenso wiesen DELGADO ARROYO et al. (2002) nach, dass durch Zugabe von 12 t/ha KSK und 350 kg/ha Urease in 4 Jahren keine negativen Effekte auf Mais durch Schwermetalle auftraten. In einer Literaturstudie von SMITH (2009) wurde ebenfalls festgestellt, dass die Bioverfügbarkeit der Metalle und damit die Pflanzenaufnahme bei KSK im Vergleich zum reinen KS verringert ist. Bei einem Einsatz von 4,5 t/ha KSK auf die Ackerbohne war kein Unterschied in der Biomasse zwischen Kontrolle und KSK-Flächen hinsichtlich der Schwermetallaufnahme erkennbar (GARRIDO et al. 2005). HOODA et al. (1997) konstatierten, dass der pH-Wert einen deutlicheren Einfluss als der Tongehalt in Bezug auf die Schwermetallaufnahme hatte. Allerdings stieg bei RAMACHANDRAN und D'SOUZA (1998) das pflanzenverfügbare Zn und Cd mit steigender KSK-Gabe unabhängig vom pH-Wert. Durch KSK Zugabe werden die säurelöslichen Pb Formen reduziert, während sich die säurelöslichen Zn Konzentrationen erhöhen. Es wurden Synergieeffekte zwischen Cu und Mg bzw. Ca und Zn nachgewiesen. Dabei ist die Aufnahme von Cu und Mg in stärkerem Maße vom pH-Wert des Bodens beeinflusst als diejenige von Ca und Zn. Die Aufnahme von Schwermetallen erfolgte in der angegebenen Reihenfolge: Zn>Cu>Pb. Bei niedrigen pH-Werten tritt Zn als freies Kation auf. Durch einen pH-Wert-Anstieg werden Zn-mineralische Komplexe gebildet und die Adsorption an negativ geladenen Bodenkolloiden steigt. Zn zeigte eine geringe Affinität zur organischen Substanz. Weiterhin zeigte sich, dass der Reifegrad des Kompostes entscheidend ist, da bei längerer Ausreifung die Schwermetalle in stabileren Formen gebunden sind. (PLANQUART et al. 1999). Ähnliches findet sich bei WEN et al. (1997), der die sinkende Verfügbarkeit der Schwermetalle bei der Kompostierung herausstellt. Dabei wurde allerdings Cu eher stabilisiert als Zn. Des Weiteren ist die Pflanzenspezifität der verschiedenen Grasarten zu beachten. HUA et al. (2008) wies bei Weidelgras durch eine Zumischung bis 60 % KSK geringere Gehalte an Cu und Zn als bei Schwingel nach. Dies deutet auf unterschiedliche Adsorptionsraten hin.

BROUWERE und SMOLDERS (2006) erklären Phytotoxizität als eine Kombination aus den Faktoren Schwermetallkonzentration, NH_3 und Salzgehalt. Die Schwermetallmobilität ist folglich eher von der Klärschlamm- als von der Bodenchemie abhängig. Theoretisch kann NH_4 den pH-Wert der Rhizosphäre erniedrigen und somit die Schwermetallaufnahme erleichtern. Der Input von OS erhöht die mikrobielle Biomasse und fixiert somit N_{min} (GERZABEK et al. 1998).

Zudem können hohe Nährstoffgaben die Bioverfügbarkeit von Schwermetallen beeinflussen, weil sie die Bodenverhältnisse (pH-Wert und Redoxpotential) ändern. N-, P- oder Fe-Zugabe erhöhten demnach die Cd- und Zn-Phytoextraktion bei Senf. Dies galt vor allem bei der Zugabe von N. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Nährstoffe ist allerdings wichtig. Nur einzeln zugegebene Nährstoffe konnten die Phytoextraktion nicht steigern (SUN et al. 2007). Ebenso wurde von JALALI und MOHARAMI (2009) angenommen, dass eine N-Zugabe die Mobilität von Schwermetallen steigert. Die Zuführung an N, P oder Fe kann die

Bioakkumulation von Schwermetallen auch durch verbessertes Pflanzenwachstum steigern (SUN et al. 2007). Es ist anzumerken, dass nur die oberirdische Biomasse beerntet und untersucht wurde. Generell lag jedoch die Schwermetallkonzentration in der Wurzel höher als in der restlichen Pflanze (HAAS et al. 1990; TYLER und OLSSON 2001, PASCUAL et al. 2004, ROSSI et al. 2004).

Weiterhin kann angeführt werden, dass sich bei Vorliegen von hohen Cl-Gehalten CdCl^- -Komplexe bilden, die die Aufnahme von Cd steigern, wobei eine Abhängigkeit von der angebauten Pflanzenart besteht (BARTL et al. 2002, BROUWERE und SMOLDERS 2006). Mais und Weizen zeigten jedoch ein unterschiedliches Aufnahmeverhalten. Es wurde von BROUWERE und SMOLDERS (2006) festgestellt, dass die Cd-Verfügbarkeit in den ersten Jahren nicht höher ist als in den folgenden. Die Bildung von mobilen DOC-Metall-Komplexen konnte nicht ausgeschlossen werden. Von BARTL et al. (2002) wurden jedoch bei Einsatz von Bioabfallkompost nachgewiesen, dass keine erhöhten Cd-Gehalte in der Pflanze vorlagen, wahrscheinlich aufgrund von kompetitiven Inhibitoren wie P, Zn oder Cu. Weiterhin stellten RAMACHANDRAN und D'SOUZA (1998) bei hohen pH-Werten die Fällung von Cd als Carbonat und Hydroxid fest. Damit war Cd weniger löslich und pflanzenverfügbar. Es existiert an der Pflanzenwurzeloberfläche eine Konkurrenz zwischen Cd^{2+} - und Ca^{2+} -Ionen, wodurch Cd weniger aufgenommen wird. Hingegen konnten auch ROSSI et al. (2002) den Nachweis erhöhter Cd-Aufnahme bei Zugabe von kommunalem Abfallkompost erbringen. Bei TASSI et al. (2004) werden Quellen über das Verhältnis von As zu $\text{PO}_4\text{-P}$ ausgewertet. Dabei wurde angeführt, dass As und P die gleichen Sorptionsplätze im Boden belegen. Damit können hohe P-Mengen im Boden die Sorption von As reduzieren.

Auf den Nullvarianten des Versuches 1 ließen sich z.B. bei Raps, Mais und Sudangras höhere Schwermetallgehalte an Al, Cr, Ni, Cd und Pb sowie As feststellen. Ein möglicher Grund ist ein Aufkonzentrationseffekt durch zu geringes Biomassewachstum (ECKER und HORAK 1997).

Bei Betrachtung von Senf fielen enorm hohe Gehalte an Al, Cr, Ni, As, Cd und Pb im Vergleich zu den anderen angebauten Kulturen auf. Brassicaceae sind bekannt als Hyperakkumulatoren für Schwermetalle (GINNEKEN et al. 2007, SUN et al. 2007). Dies ist insbesondere für Senf bei Zn nachgewiesen worden (KOS et al. 2003).

Weiterhin gibt die Literatur Auskunft über die Aufnahme von Schadstoffen bei Einsatz von KS und Abfallkompost. Signifikant erhöht durch die Gabe von maximal 140 t/ha KS waren in der Biomasse von Weidelgras Zn, Cu, Mn und Cd. Weiterhin wurde konstatiert, dass die Schwermetalle geringer verfügbar waren als bei mineralischer Düngung (PASCUAL et al. 2004). HOODA et al. (1997) untersuchte auf KS gedüngten Böden den Anbau von Weizen. Im Weizenkorn wurden sehr hohe Konzentrationen an Cd und Ni gefunden, währenddessen die Konzentrationen an Pb und Zn nur geringfügig erhöht waren. Für Cu schienen die Gehalte niedriger zu sein als auf der Kontrollvariante. Der pH-Wert hatte in der vorliegenden Untersuchung einen deutlicheren Einfluss als der Tongehalt. Es wurden Kalkungsversuche unternommen, die allerdings bei Anheben des pH-Wertes auf 6,5 keine Reduzierung der Schwermetallgehalte im Weizenkorn nach sich zogen. FROST und KETCHUM (2000) stellten bei Hartweizen durch den Einsatz von KS in der Wurzel erhöhte Konzentrationen für Cd, Cr, Cu und Pb fest. Bei Anbau von Gerste und Weizen auf mit Schwermetallen kontaminierten

Flächen wurden vor allem Cu und Zn aufgenommen (HAAS et al. 1990). Auch bei Zugabe von 120 t/ha KS wurden Schwermetallanreicherungen in Raps in Betracht gezogen (CARBONELL et al. 2009). Bei Gaben von 7,5 t/ha KS stellten GERZABEK et al. (1998) bereits eine Zunahme in der mobilen Fraktion von Cd, Cu und Zn fest. Allerdings konnte die Aufnahme in Raps nicht eindeutig bestätigt werden. Weiterhin wurde ein negativer Einfluss bei Zumischung von nur 6 % KS auf die Germination und die Wurzellänge durch Schwermetalle bei Raps gefunden (OLESZCZUK 2010). KIDD et al. (2007) wies durch 10jährige KS-Gabe nach, dass der Gehalt an Cu und Zn in der Maiswurzel erhöht vorlag. Erhöhte Schwermetallgehalte an Fe, Mn, Zn, Cu, Pb und Cd in Salat wurden von MOHAMMAD und ATHAMNEH (2004) durch Einsatz bis 160 t/ha KS bewiesen. Diese stiegen mit zunehmender Beimengung an KS kontinuierlich an. BROUWERE und SMOLDERS (2006) konstatierten, dass die Cr, Cu, Ni und Pb- Konzentrationen im Mais durch KS-Gabe in Höhe von 150 t in 3 Jahren unbeeinflusst blieb, während sich bei den Parametern Zn und Cd ein Einfluss zeigte. Mit steigender Schlammapplikation nahm der Gehalt an Zn und Cd zu ohne ein Maximum zu erreichen. Ebenfalls KS wurde von ALCANTARA et al. (2009) eingesetzt, um die Wirkungen auf den Anbau von Mais zu testen. Hierbei wurden bei Mn, Fe, Zn und Cu steigende Gehalte in der Pflanze mit zunehmenden Mengen an KS festgestellt.

Hingegen konnten HAUBOLD-ROSAR und GAST (2005) keine erhöhten Schwermetallgehalte in Gras feststellen, da die Verfügbarkeit durch erhöhte Gehalte an OS vermindert war. BROUWERE und SMOLDERS (2006) wiesen ebenfalls nach, dass die Gehalte an Mikro- und Makronährstoffen (Mn und Fe) im Weizenkorn geringfügig unter denen mit Dünger behandelten Pflanzen lagen. Die Gehalte an Ni, Pb und Cr waren hingegen nur unsignifikant höher als in der Vergleichsdüngervariante. Cu und Cd wurden allerdings in geringerem Maße aufgenommen. Des Weiteren wurde Gerste untersucht. Auch hier waren in der Vergleichsvariante geringere Cadmiumkonzentrationen zu verzeichnen. Verschiedene Konzentrationsstufen an Cu wurden bei Untersuchungen von SANDERS et al. (1986) beigemischt. Es zeigte sich, dass trotz hoher Cu-Verfügbarkeit kein Anstieg in Gerste und Hafer zu verzeichnen war. Der Einfluss der Pflanze ist demnach höher als der Einfluss des Bodens. Auch RAMACHANDRAN und D'SOUZA (1998) stellten bei KS-Zumischung keine erhöhten Cd Gehalte bei pH-Werten von 7,2 in Mais fest.

ROSSI et al. (2002) demonstrierten in einem Versuch mit kommunalem Abfallkompost, dass bei Raps die Aufnahme von Cd und Zn in die Pflanze höher ist als die von Cu aufgrund der höheren Mobilität der beiden Elemente. Es waren deutliche Wechselwirkungen zwischen den Elementen zu erkennen. Zn wurde während des gesamten Vegetationszyklus gleichmäßig aufgenommen. Das Vorhandensein von hohen Mengen an Cu im Boden steigerte die Zn-Aufnahme wie auch umgekehrt. Eine höhere Konzentration im Boden ließ den Gehalt in der Pflanze steigen. Trotz der hohen Aufnahme von Zn konnten keine Ertragsdepressionen festgestellt werden. Allerdings wirken sich zu hohe Cu-Gaben (>600 mg/kg) negativ auf das Wachstum aus. Aufgrund geringer pH-Werte kann es zur Destabilisierung löslicher metallorganischer Komplexe kommen, die das Cu-Ion bioverfügbar machen (PLANQUART et al. 1999). Weiterhin wurde ein Bioabfallkompost mit jährlicher Fracht von 32 t/ha über einen Zeitraum von 5 Jahren ausgebracht. Die angebauten Fruchtarten Dinkel und Hafer ließen erhöhte Gehalte an Cu und Zn erkennen (BARTL et al. 2002). Hingegen konnten ERHARTL et al. (2008) bei Ausbringung von 255 t/ha Bioabfallkompost nur geringe Verlagerungen in die

Pflanze feststellen. Durch zehnjährige Düngung mit Bioabfallkompost mit einer Gesamtmenge von 225 t/ha FM wurden von ERHART et al. (2009) festgestellt, dass die Aufnahme von Cu und Zn bei den angebauten Kulturen teilweise erhöht war, während Pb nicht nachgewiesen wurde. Der Gehalt an Cd sank durch Kompostzugabe in Hafer- und Dinkelkörnern im Vergleich zur Mineraldüngungsvariante.

Boden

Über den gesamten Versuchszeitraum von drei Vegetationsperioden ergab **Versuch 1**, dass die Variante 70cm-75Vol%KSK unabhängig von der angebauten Fruchtart die höchsten Gehalte an N_t, NO₃-N, NH₄-N, Na, P_t, P_{verf}, S, Mg_t, Mg_{verf}, Cu, Zn, Cd und Hg besaß. Bis auf NO₃-N und NH₄-N ließ sich für die Nähr- und Schadstoffparameter folgende Reihung festhalten: 70cm-75Vol%KSK > 100cm-75Vol%KSK > 70cm-50Vol%KSK > 100cm-50Vol%KSK. Für K_t, Fe und As gestaltet sich die Reihenfolge etwas anders: 100cm-50Vol%KSK > 70cm-50Vol%KSK > 70cm-75Vol%KSK > 100cm-75Vol%KSK. Des Weiteren hatte die Variante 100cm-50Vol%KSK das höchste Schadstoffpotential an Cr und Ni inne, während Pb bei 70cm-75Vol%KSK tendenziell erhöht vorlag. Beim Parameter Pb fiel weiterhin auf, dass 100cm-0Vol%KSK höhere Pb-Gehalte als 100cm-50Vol%KSK besaß. Beachtung muss auch Ca geschenkt werden. Hier wurde die Abfolge 100cm-75Vol%KSK > 70cm-75Vol%KSK > 100cm-0Vol%KSK > 70cm-50Vol%KSK > 100cm-50Vol%KSK > 70cm-0Vol%KSK festgestellt. Die Nullvariante der 100 cm Mächtigkeit konnte demzufolge ein hohes Ca-Potential vorweisen. Die C/N-Verhältnisse gestalteten sich auf den Varianten mit 75 Vol% Zumischung weiter als bei geringer Beimengungsrate. Bis auf die erwähnten Parameter Ca und Pb lagen die Gehalte der Nullvarianten immer unterhalb der KSK-Varianten. Insgesamt zeigte sich, dass die 70 cm mächtigen Varianten einen höheren Nährstoffpool besaßen. Jedoch lag bei Betrachtung der Parameter P_{verf}, Mg_{verf}, K_{verf} bei allen KSK-Varianten ein Luxuskonsum vor.

Zusammenfassend kann für **Versuch 2** ausgesagt werden, dass die KSK75-Varianten höhere Gehalte an N_t, C_t, P_t, P_{verf}, K_{verf}, Mg_t, Mg_{verf}, Ca, Na, S und Salzgehalte besaßen als KSK50 und die Nullv. Die durchschnittlichen NO₃-N und NH₄-N-Gehalte gestalteten sich in Abhängigkeit vom Feld different. Während diese auf Feld 2 bei KSK50 höher lagen, war NO₃-N auf Feld2 bei KSK75 höher und NH₄-N war identisch. Die C/N-Verhältnisse waren auf den KSK-Varianten generell niedriger als auf den Nullvarianten. Des Weiteren muss K_t gesondert erwähnt werden, da die Nullvarianten im Vergleich zu KSK hohe Werte besaß. Allerdings konnten bei KSK75 höhere Werte als bei KSK50 festgestellt werden. Weiterhin wurde deutlich, dass eine Zumischung an 75 Vol% KSK die höchsten Schwermetallgehalte an Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd und Pb innehatte, gefolgt von den KSK50-Varianten. Ausnahmen bildeten hier Hg und As.

Es konnte mit der Zugabe von KSK eine deutliche Steigerung der N_t-Vorräte im Substrat nachvollzogen werden. Dies steht in Einklang mit Untersuchungen von u.a. ZAMAN et al. (2002), ROS et al. (2006) sowie SONG und LEE (2010), die jedoch geringe Einsatzmengen für die Versuche verwendeten. Die eigenen Untersuchungen konnten das Vorliegen als vorwiegend organisch gebundener N beweisen, der demzufolge für die Pflanzenernährung

nicht sofort zur Verfügung steht. Die Mineralisierungsraten des eingesetzten KSK wurden eigens nicht untersucht, jedoch wurden in den angebauten Kulturen ab dem zweiten Anbaujahr geringe N_{\min} -Konzentrationen ermittelt, die auf eine mögliche ungenügende N-Mineralisierung der verschiedenen KSK-Varianten schließen ließen. In der Literatur finden sich etliche Hinweise über Mineralisierungsversuche mit KSK, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Zum Beispiel konnten KORBOULEWSKY et al. (2002) bei Zugabe von 10 t/ha KSK Mineralisationsraten von 5 kg/ha N_{\min} im ersten und von 2 kg/ha im zweiten Jahr feststellen, während bei Einsatz von 90 t/ha KSK die Mineralisation auf 26 kg/ha N_{\min} (1. Jahr) und 10 kg/ha (2. Jahr) erhöht vorlag. Bei Verwendung eines lehmigen Sandes und der Zumischung von 6 % KSK (135 t/ha) konnte TESTER et al. (1977) eine N-Mineralisierung innerhalb von 54 Tagen in Höhe von 6 % konstatieren. GIL et al. (2011) stellte fest, dass die Mineralisierung bei neutralen pH-Werten höher ist als bei basischen und saueren. Es wurde konstatiert, dass es zwei unterschiedliche Arten an N_{org} gibt: einen labilen Teil, der schnell mineralisiert, während der resistente Anteil sich langsam umsetzt. HERNÁNDEZ-APAOLAZA et al. (2000) stellte fest, dass 26,6 % des N_{org} bei Zugabe von 80 t/ha TM KSK zu einem sandigen Lehm in 60 d mineralisierten. Die Unterschiede in den Mineralisierungsraten von KS und KSK wurden von EPSTEIN et al. (1977) untersucht. Es wurden sehr große Differenzen festgestellt, da KS $\text{NO}_3\text{-N}$ schnell durch Denitrifikation und Immobilisierung verlieren, während KSK bodenähnliche Nettomineralisierungsraten aufweisen. Die Raten bei Zugabe von 300 kg/ha N als KSK wurden von INSAM und MERSCHAK (1997) als moderat eingestuft. Hingegen finden sich auch etliche Hinweise über ungenügende N-Mineralisierung. SIMS (1990) konnte bei Zugabe von 22 t/ha verschiedener KSK negative Nettomineralisierungsraten von -7 bis -39 mg/kg innerhalb von 20 Wochen ermitteln. Selbst maximale Einsatzmengen von 44 t/ha konnten folglich den N-Bedarf von Weizen nicht decken. Es traten Mangelsymptome auf, die eine mineralische Zudüngung empfehlenswert machten. Bei einer Gabe von 200 kg N / ha als KSK wurden negative Mineralisierungsraten von ZAMAN et al. (2002) innerhalb von zwei Jahren festgestellt, während bei Langzeitversuchen (22 Jahre –alle 2 Jahre KSK-Gabe) die Rate signifikant höher lag als bei mineralischer Düngung. Dabei wurde nur ein geringer Anteil des aufgebrauchten N mit KSK in der ersten Aufwuchsphase mineralisiert (ZAMAN et al. 2004). Von FRANCOU (2003) wird weiterhin der Hinweis gegeben, dass die Zumischungskomponente Grüngut einen entscheidenden Einfluss besitzt. Aufgrund des hohen gegebenen Ligningehaltes kommt es zu einer schnellen Stabilisierung der OS. Hinsichtlich der agronomischen Düngewirkung lässt sich folglich mit einer nur langsamen Mineralisierung des N rechnen. Ebenso unterstellten BELTRÁN et al. (2002) KSK ein Dünger mit langsamer Wirkung zu sein. Des Weiteren wird auf den Abwasserbehandlungsprozess verwiesen, da der Zusatz von Flockungsmitteln die Mineralisierungsraten von KSK verringern kann. WARMAN und TERMEER (2005a) stellten einen geringen Verfügbarkeitsindex von N fest, der bei nur 14 % im Vergleich zur mineralischen Düngung lag.

Im eigenen Versuch lag N_{\min} hauptsächlich in Form von $\text{NO}_3\text{-N}$ vor. Dies bestätigen auch TARRASÓN et al. (2008) und begründen dies mit dem aeroben Kompostierungsprozesses. Er stellte fest, dass bei geringer Einsatzmenge an KSK die wesentlichen Umsetzungsprozesse in den ersten drei Wochen stattfanden.

Auch zu den Themen KS und Abfallkompost hinsichtlich der N-Umsetzungsprozesse sind in der Literatur Angaben zu finden. Die Nettomineralisierungsrate von KS bei einer Gabe von 4,2 t/ha betrug in einem Inkubationsexperiment für 11 Monate 24 %, während ein Abfallkompost nur 2 % erreichte. Die Hauptmenge des N wurde in organischen Verbindungen stabilisiert. Aus KS wurde die N-Aufnahme folglich effizienter als aus dem Kompost eingeschätzt (DEBOSZ et al. 2002). Die N-Mineralisierung bei Zugabe von 270 t/ha kommunalem Abfallkompost wurde mit 3-6 % angenommen (MAMO et al. 1999). Von HAUBOLD-ROSAR und GAST (2005) wurden Mineralisationsraten bei KS in Höhe von 25 % und bei Bio/Grünkompost von nur 5 % angegeben. Weiterhin geben GARAU et al. (1991) Mineralisationsraten von 40 % bei Verwendung von 20 t/ha KS an. Die TLL (2007) gibt Mineraldüngeräquivalente (MDÄ) der N-Wirksamkeit für Bioabfallkompost kurzfristig in Höhe von 0-20 % und langfristig von 20-30 % an, während bei Klärschlamm (dick) Angaben von 40-50 % (kurzfristig) und 50-60 % (langfristig) gemacht werden.

Sowohl in Versuch 1 als auch 2 kam es durch Zugabe von KSK zu einer Steigerung des Gehaltes an **OS**, **C_{org}** und **C_t**. Ähnliches kann von AGGELIDES und LONDRA (2000), MORENO et al. (1999), KORBOULEWSKY et al. (2002), ZAMAN et al. (2002), ROS et al. (2006), SELIVANOVSKAYA und LATYPOVA (2006) und SONG und LEE (2010) bestätigt werden.

Ebenso wird dies bei Zugabe von KS oder Abfallkompost u.a. von STAMATIADIS et al. (1999), BARTL et al. (2002) und VEREESH et al. (2003) in Studien festgestellt.

Weiterhin wurde bei den eigenen Untersuchungen eine deutliche Steigerung der Gesamt- und pflanzenverfügbaren Gehalte an **P**, **K** und **Mg** durch die Zugabe von KSK ermittelt. Hier sei vergleichend auf Veröffentlichungen von TAYLOR et al. (1977), MC BRIDE et al. (2004) und LARCHEVÉQUE et al. (2006) verwiesen.

Die festgestellten **Schwermetallanreicherungen** bei allen Varianten mit Zugabe von KSK sind ebenfalls durch Literatur belegbar. Bereits jährliche Gaben von 15 t/ha innerhalb von 5 Jahren KSK ließen bei BRAGATO et al. (1998) geringfügige Erhöhung der Gehalte von Zn, Ni, Pb und Cu im Boden erkennen. Steigende Zn und Cu-Gehalte beobachteten auch PINAMONTI et al. (1997) bei Verwendung von 160 t/ha. Die Schwermetallkonzentrationen weiterer untersuchter Elemente wie Ni, Pb, Cd und Cr blieben jedoch von der KSK-Gabe unbeeinflusst. DÜRING und GÄTH (2002) verwiesen ebenfalls auf erhöhte Schwermetallgehalte aufgrund steigender KSK-Gaben. Durch Einsatz von 9 kg/m² KSK konnten CASADO-VELA et al. (2007) die Zunahme von Pb, Cr und Cd im Boden nachweisen. Die Cu und Zn-Gehalte korrelierten bei HUA et al. (2008) mit der zugegebenen KSK-Menge, wichtig ist jedoch auch die eingesetzte Bodenart. Durch Zugabe von 200 t/ha KS bzw. KSK zu einem tonigen Lehm wurde die Cu-Sorption der Böden erhöht, während die Cd-Sorption in Böden mit einem Konkurrenzmetallsystem sank. Es war kaum eine Verfügbarkeit der Elemente festzustellen (VACA-PAULÍN et al. 2006). Hingegen stellten ZHOU und WONG (2001) fest, dass durch Präsenz von gelöster organischer Substanz die Cu Sorption abnahm. Dieser Effekt war bei KS größer als bei KSK. Aufgrund von hohen pH-Werten, Carbonatgehalten, KAK und dem Vorhandensein von Tonmineralen war die Sorptionskapazität für Cu in Kalkböden höher als in Böden mit sauren Verhältnissen. Hohe pH-Werte und Carbonatgehalt führen zur Bildung von Cu(OH)₂ und CaCO₃. Der Reifegrad des Kompostes war für die Verfügbarkeit von Schwermetallen von entscheidender Bedeutung. Schwermetalle lagen

vorwiegend in der residualen, an Fe- und Mn-Oxiden-Fractionen sowie an die OS gebunden vor. Der „Mobilitätsfaktor“ änderte sich in der fünfjährigen Versuchsphase nicht.

Auch bei der Verwendung von KS und Abfallkompost konnte mit einer Anreicherung von Schwermetallen gerechnet werden (DELSCHEN 1999). 600 t/ha TM an kommunalem Abfallkompost wurden von ACHIBA et al. (2002) innerhalb von 5 Jahren aufgebracht. Es wurde ein Zunahme der Schwermetallgehalte festgestellt. KIDD et al. (2007) wiesen nach 10-jähriger KS Applikation nach, dass die Schadstoffparameter teils um ein Vielfaches erhöht vorlagen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schwermetalle in leichter verfügbaren Formen vorlagen (OBRADOR et al. 1997). Elf Jahre nach KS-Ausbringung von maximal 330 t/ha wurden von SCHAECKE et al. (2002) an einem Standort das Verhalten von Schwermetallen untersucht. Es konnte eine Verlagerung bis in 50 cm Tiefe aufgrund der Bindung an DOC festgestellt werden. Zn und Pb lagen an mobile Fraktionen gebunden vor, während Cu, Ni und Pb in den festen organischen Substanzen und Cr an Fe-Oxiden gefunden wurden. Nach der Zugabe von 836 t/ha KS innerhalb von 19 Jahren wurde ebenfalls von NYAMANGARA und MZEZEWA (1999) eine signifikante Erhöhung von Zn, Cu, Ni und Pb im Oberboden festgestellt.

Durch die Nutzung von KSK stiegen die gemessenen **Salzgehalte** in den eigenen Versuchen deutlich an. Auch HUA et al. (2008) konnten in Abhängigkeit von der Bodenart eine hohe elektrische LF bei Zumischung von 60 % KSK zwischen 1000 und 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ feststellen. Bereits ab einer Gabe von 9 kg/m^2 KSK konnten CASADO-VELA et al. (2007) Salzakkumulationen und eine signifikante Steigerung der elektrischen LF nachweisen. Zudem können im KSK vorhandene Salze den Abbau des Komposts, wenn er in den Boden eingebracht wird, verhindern (TESTER und PARR 1983).

HUA et al. (2008) stellten fest, dass die **pH-Werte** mit zunehmender KSK-Gabe abnahmen. Die Versauerung des Substrats kann erklärt werden durch das Vorhandensein von organischen Säuren, die während der Zersetzung von organischer Substanz und Nitrifikation gebildet werden (BAVEYE et al. 1999). Auch durch KS- und Abfallkompostgaben muss mit einer Bodenversauerung gerechnet werden (STAMATIADIS et al. 1999, ACHIBA et al. 2002).

4.2 Energetische Verwertung der Biomasse

Die zur Berechnung der Biogas- und Methanausbeuten erforderlichen Rohnährstoffe werden für die einzelnen Fruchtarten in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. In den Abbildungen sind jeweils nur Mittelwerte dargestellt. Die konkreten Zahlenwerte der ermittelten Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeuten in l/kg oTS sowie m³/ha finden sich in Anlage 17 bis Anlage 21. Es wurden die Standorte der Versuche gesondert betrachtet. Zur Einschätzung der Rohnährstoffgehalte wurden Literaturangaben der TLL (2011) und der DLG (2010) verwendet.

4.2.1 Versuch 1

4.2.1.1 Rohnährstoffgehalte, Biogas- und Methanausbeuten

Senf

Es lassen sich bei der Fruchtart Senf Unterschiede bei den KSK-Varianten bezüglich des Rohfett und -fasergehaltes feststellen. Die 70 cm mächtigen Varianten hatten mit 2,1 % und 2,2 % einen höheren Rohfettgehalt als die 100 cm-Varianten mit 1,9 % (Abbildung 6). Die Rohfasergehalte lagen auf den 70 cm-Varianten höher. Ebenfalls wirkte sich die Zumischung an KSK aus. Mit steigendem KSK-Anteil wurden höhere Rohfaserwerte ermittelt. Die Rohproteingehalte waren durch Zugabe an KSK erhöht, weil hohe Mengen verfügbarer N nach Aufbau der Kulturschicht vorhanden waren. Damit lagen sie über den Vergleichswerten der Literatur (DLG 2010 – 19,9 %). Die Rohfettgehalte der 70 cm mächtigen Varianten lagen vergleichbar zu den Angaben der DLG, die der höher mächtigen Variante waren im Schnitt niedriger. Die zur Berechnung der Biogaserträge erforderlichen Rohaschewerte wurden der DLG Futtermitteltabelle (2010) entnommen, da diese aus analytischen Gründen im Jahre 2007 nicht ermittelt wurden.

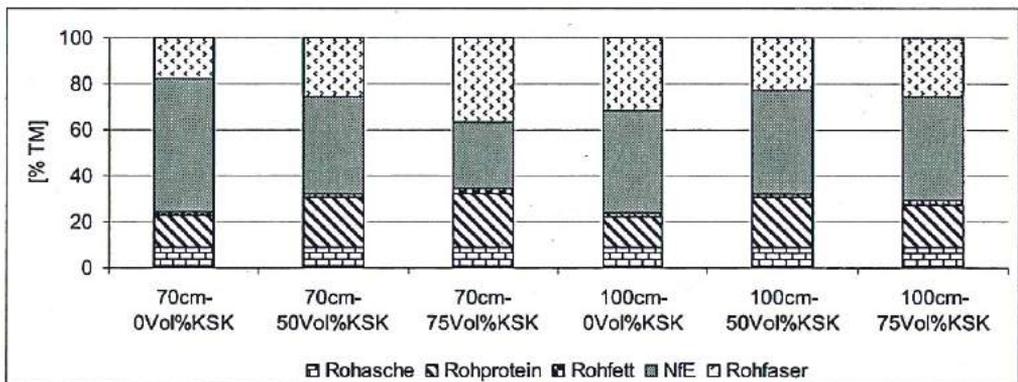


Abbildung 6 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Senf (Versuch 1)

Aufgrund erhöhter Rohfasergehalte der KSK-Varianten war die Biogas- und Methanausbeute in l/kg oTS geringer als die der Nullvarianten. Infolge höherer Ernteerträge der KSK-Varianten, wiesen diese jedoch auf den Hektar bezogen höhere Biogas- und

Methanausbeuten auf. Die höchsten Biogaserträge konnten bei der Variante 100cm-50Vol%KSK mit 2605 m³/ha festgestellt werden (Abbildung 7).

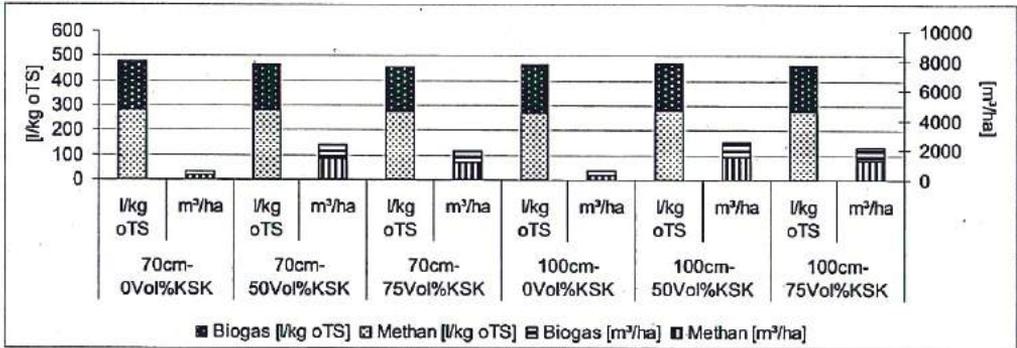


Abbildung 7 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Senf (Versuch 1)

Roggen / Weizen

Besonders bei 100cm-50Vol%KSK war ein hoher Rohaschegehalt vorzufinden, der zu den geringsten Biogasausbeuten führte (Abbildung 8). Diese Variante fiel ebenso durch den höchsten Rohprotein- (15,3 %) und Rohfettgehalt (2,3 %) sowie den geringsten Gehalt an Rohfaser (29 %) auf. Die 70cm-KSK-Varianten grenzten sich von den 100 cm-Varianten durch geringere Rohaschewerte ab. Die in Abbildung 8 dargestellten Rohaschegehalte der Nullvarianten wurden im Vergleich zu den KSK-Varianten als gering eingeschätzt. Identische Werte waren bei Rohfett und -faser bei den 70 cm-Varianten zu finden. Im Vergleich zur TLL lagen die Gehalte der KSK-Varianten an Rohfaser, - fett und -asche auf annähernd gleichem Niveau. Auffällig war nur die Variante 100cm-50Vol%KSK. Der Rohproteingehalt war hier im Vergleich zur TLL mit ca. 11 % wesentlich höher, wie auch der Gehalt an Rohasche, während sehr geringe Rohfasergehalte gemessen wurden.

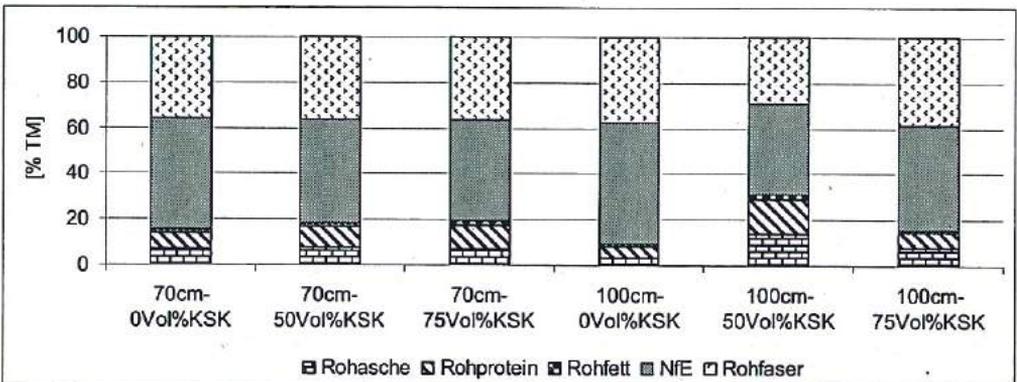


Abbildung 8 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Roggen / Weizen (Versuch 1)

Bedingt durch höhere oTS-Gehalte der 70 cm-Varianten konnte eine höhere Biogas- und Methanausbeute in l/kg oTS verzeichnet werden (Abbildung 9). Die Variante 70cm-75Vol%KSK konnte mit Abstand die höchsten Biogas- (4216 m³/ha) und Methanausbeuten

(2419 m³/ha) aufweisen, obwohl bei der Variante 100cm-50Vol%KSK mit 9 t/ha höhere Ernteerträge nachgewiesen wurden. Der hohe Rohaschegehalt dieser Variante wies sich als negativ für die Gasausbeute aus.

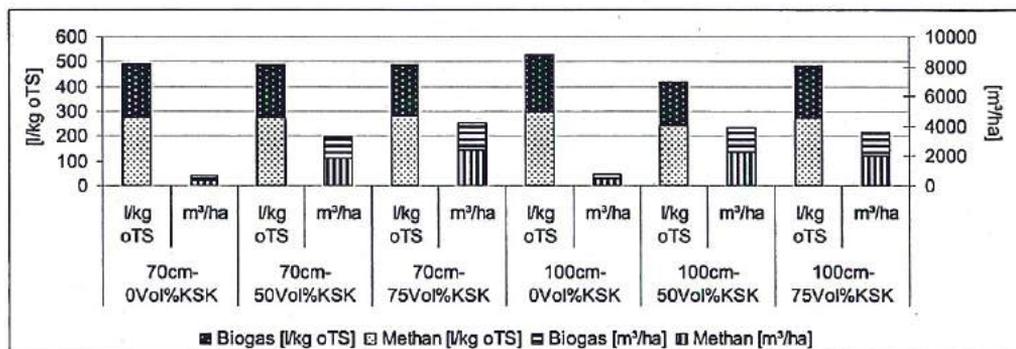


Abbildung 9 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Roggen/Weizen (Versuch 1)

Weizen

Bei Betrachtung der Fruchtart Weizen fiel wiederum die Variante 100cm-50Vol%KSK auf, die die geringsten Rohasche- und höchsten Rohfettgehalte aufweisen konnte (Abbildung 10). Der Rohproteingehalt bewegte sich auf den KSK-Varianten zwischen 5,9 % (100cm-75Vol%KSK) und 8,4 % (70cm-75Vol%KSK), während der Rohfasergehalt in einem großen Schwankungsbereich zwischen 18,9 % (100cm-50Vol%KSK) und 28,9 % (70cm-50Vol%KSK) lag. Bezüglich der Mächtigkeit und Zumischung ließen die Werte keinen Trend erkennen. Während die Rohaschegehalte der KSK-Varianten vergleichbar mit Werten der DLG waren, wurden generell niedrigere Gehalte an Rohprotein, Rohfett und Rohfaser gemessen.

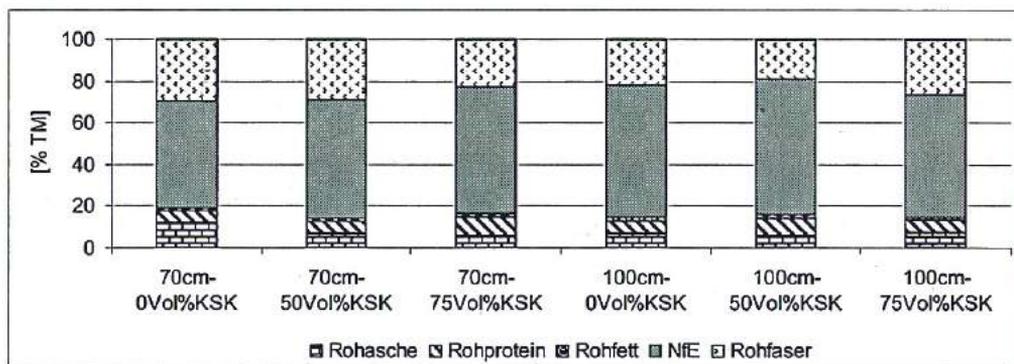


Abbildung 10 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Weizen (Versuch 1)

Die Biogasausbeute lag über alle Varianten hinweg betrachtet in einem Bereich zwischen 401 und 463 l/kg oTS und die von Methan zwischen 226 und 265 l/kg oTS (Abbildung 11). Insgesamt konnten die 100 cm-Varianten durch höhere Flächenerträge gesteigerte Biogas-

und Methanausbeuten in m³/ha verzeichnen. Erreicht wurden bei Weizen maximal 6953 m³/ha Biogas (100cm-75Vol%KSK).

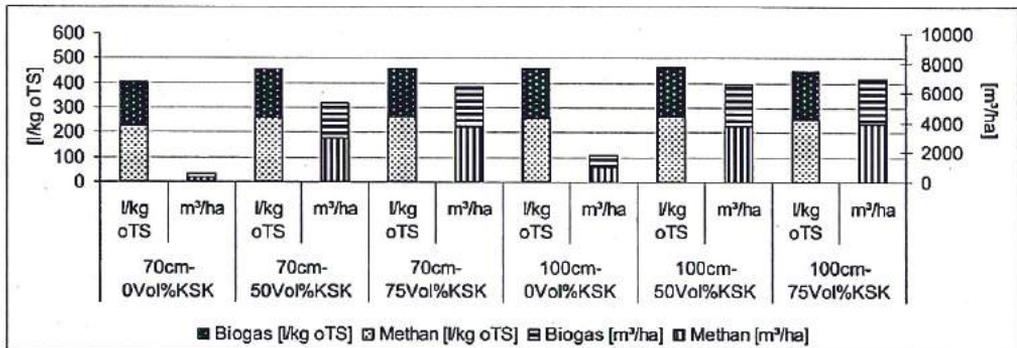


Abbildung 11 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Weizen (Versuch 1)

Sudangras

Der positive Einfluss der Zumischung an KSK ließ sich in sinkenden Rohfaser- und Aschegehalten erkennen (Abbildung 12). Allerdings lagen die Rohfettwerte der Zumischungen mit 0,8 bis 1,1% unter denen der Nullvarianten. Bezüglich der Zumischungsmenge konnte eine Abhängigkeit abgeleitet werden. Je höher der Anteil an KSK war, desto höhere Rohprotein- und geringere Rohfaserwerte waren vorzufinden. Die Mächtigkeit betreffende Unterschiede waren ebenfalls festzustellen. Mit zunehmender Mächtigkeit sanken die Rohfett und -proteingehalte und stiegen die Rohfasergehalte an. Während sich die Rohasche- und Rohproteingehalte im Bereich der Angaben von TLL und DLG bewegten, lagen die Werte an Rohfett und -faser niedriger.

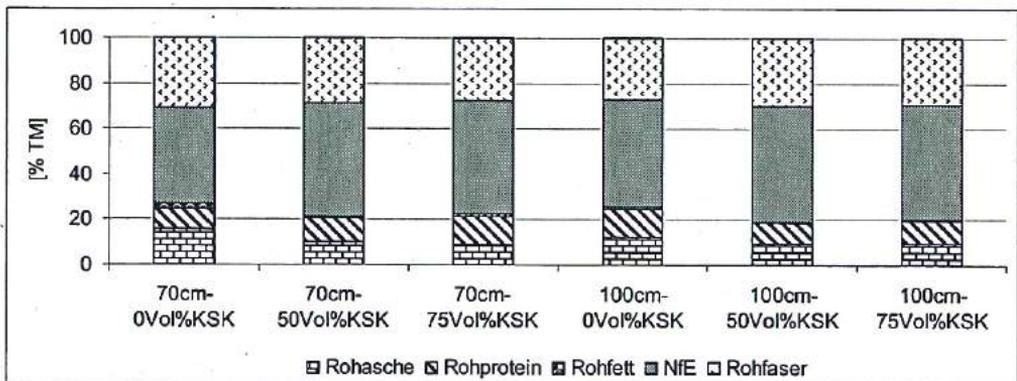


Abbildung 12 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Sudangras (Versuch 1)

Die Biogasausbeute der in Abbildung 13 dargestellten KSK-Varianten bewegte sich in einem engen Bereich zwischen 392 und 398 l/kg oTS (Methan von 223 bis 227 l/kg oTS). Bei Betrachtung der Werte in m³/ha war auf die höheren Biomasseerträge der 75 Vol% Zumischungen hinzuweisen. Hier konnten deutlich gesteigerte Ausbeuten zwischen 2733 m³/ha (100 cm) und 2836 m³/ha Methan (70 cm) verzeichnet werden. Bei einer

Zumischung von 50 Vol% KSK lagen die Methanerträge nur zwischen 1652 m³/ha (70 cm) und 2208 m³/ha (100 cm). Es ist jedoch auf die teilweise sehr hohen Standardabweichungen zu verweisen.

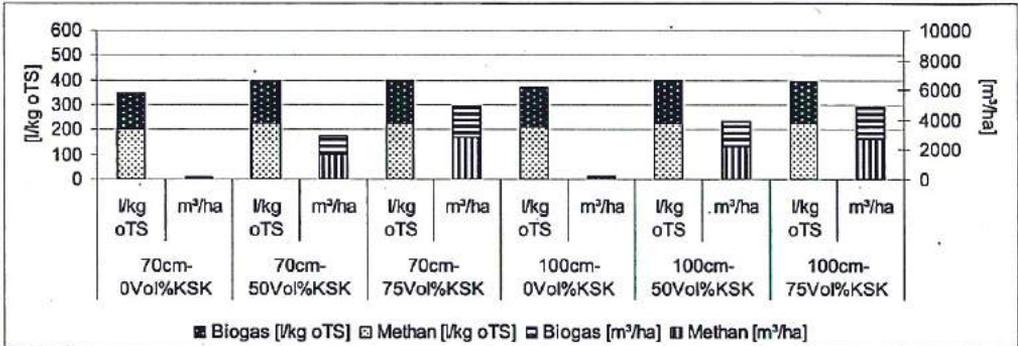


Abbildung 13 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Sudangras (Versuch 1)

Um die Berechnung der theoretischen Gasausbeute vergleichen zu können, wurde ein **Batchversuch** zur Ermittlung der tatsächlichen Methan- und Biogaserträge durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Es zeigten sich beträchtlich höhere Gasausbeuten im Vergleich zu den rechnerisch ermittelten Werten. Bei den KSK-Varianten wurden Werte in einem Bereich von 535 bis 545 l/kg oTS gemessen (Abbildung 14). Es konnten keine deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen KSK-Varianten bezüglich der oTS Werte in l/kg festgestellt werden. Ein Unterschied zu den Nullvarianten mit geringeren Ausbeuten konnte jedoch bestätigt werden. Die im Batchversuch ermittelten Gasausbeuten wurden ebenfalls mit den im Feld erzielten Biomasseerträgen verrechnet. Die Zumischung von 75 Vol% KSK ergab Ausbeuten von 6531 m³/ha und 6777 m³/ha Biogas (3633 und 3795 m³/ha Methan), während die 50 Vol%-Varianten auf niedrigerem Niveau zwischen 4018 und 5331 m³/ha (2253 und 2969 m³/ha Methan) lagen.

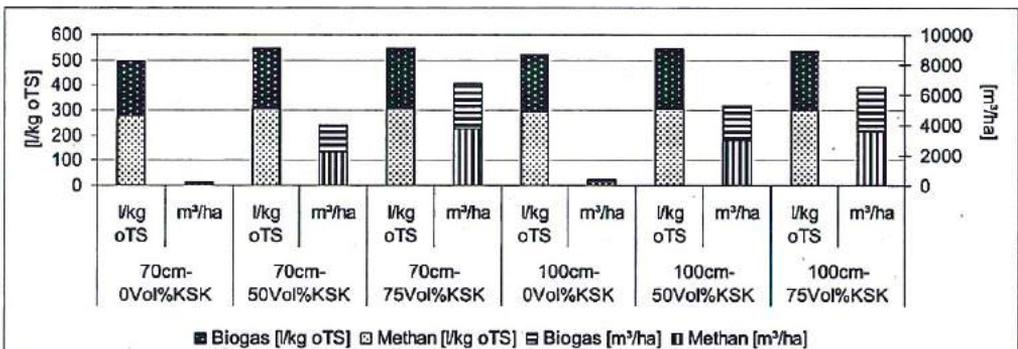


Abbildung 14 Im Batchversuch gemessene Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Sudangras (Versuch 1)

Mais

Die Rohasche und -proteingehalte der 75 Vol%-KSK-Varianten lagen über denen der 50 Vol%-Varianten. Die Rohfasergehalte waren auf den 100 cm-Varianten geringfügig höher. Es konnte jedoch kein allgemeiner Trend im Vergleich der KSK-Varianten festgestellt werden (Abbildung 15). Im Vergleich mit TLL und DLG wurden für Mais zu hohe Gehalte an Rohasche und -faser ermittelt, während die Werte für Rohfett auf zu niedrigem Niveau lagen. Die Rohproteingehalte waren jedoch bei Zumischung von 75 Vol% KSK vergleichbar.

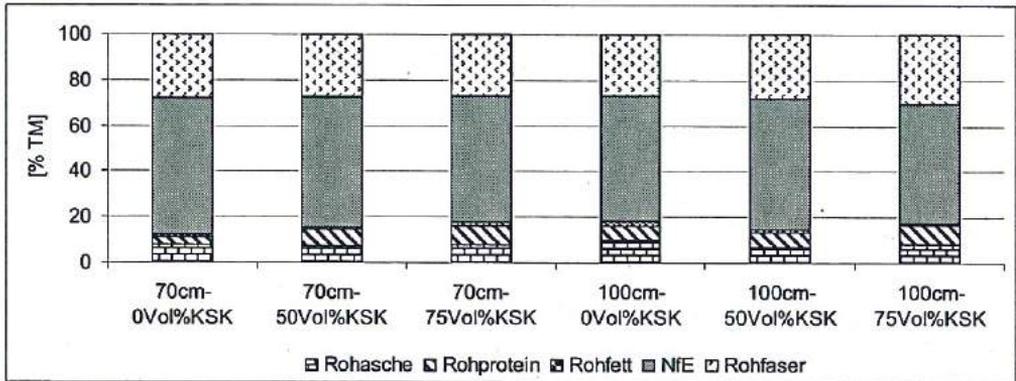


Abbildung 15 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Mais (Versuch 1)

Die Biogaserträge bewegten sich zwischen 500 und 524 l/kg oTS mit Methangehalten von 56 % (Abbildung 16). Differenzen waren wiederum durch die im Feld erzielten Erträge festzustellen. Die höchsten Gaserträge wies die 100cm-75Vol%KSK mit 5291 m³/ha Methan auf. Mit Abstand folgte die 70cm-75Vol%KSK-Variante mit 1000 m³/ha weniger Ertrag. Die Zumischungen von 50 Vol% KSK zeigten geringere Ausbeuten von 3295 m³/ha (70 cm) und 3510 m³/ha (100 cm) Methan.

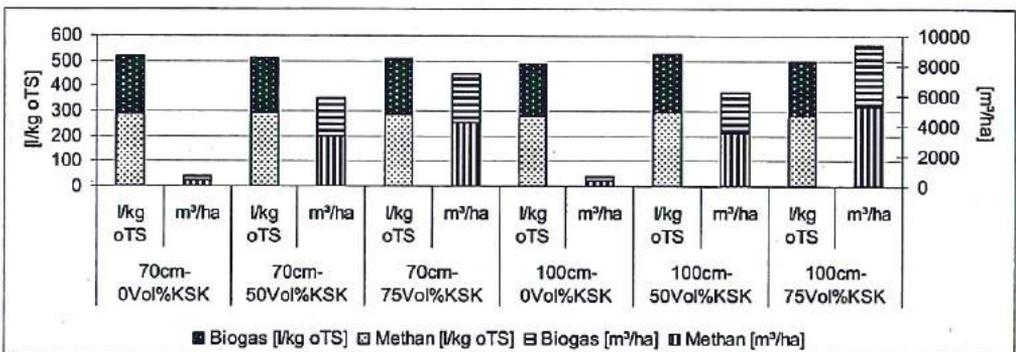


Abbildung 16 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Mais (Versuch 1)

Winterraps

Die Rohaschegehalte wiesen kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten auf. Es wurde ein zunehmender Rohproteingehalt mit Zunahme von KSK festgestellt. Auffällig waren

die bei den KSK-Varianten im Vergleich zur Nullvariante höheren Rohfaserwerte, die mit zunehmender Mächtigkeit anstiegen (Abbildung 17). Im Vergleich zur DLG machte sich der späte Erntezeitpunkt mit sehr hohen Rohfasergehalten deutlich bemerkbar. Die Gehalte an Rohprotein und -fett lagen sehr niedrig, während sich der Rohaschegehalt vergleichbar gestaltete.

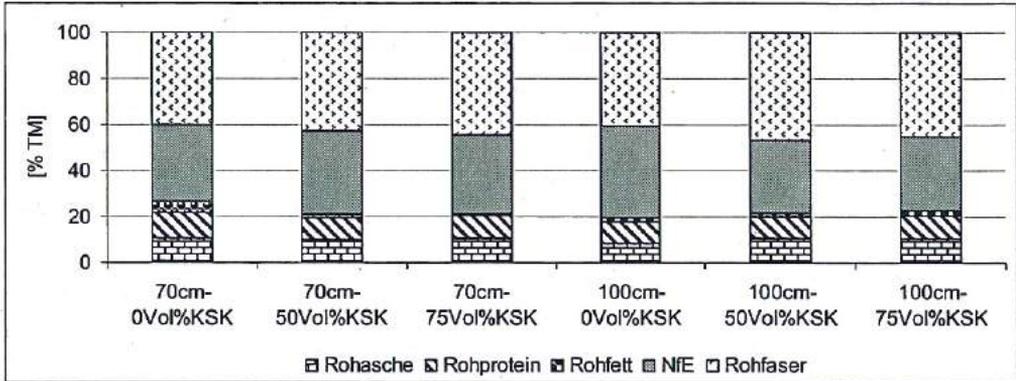


Abbildung 17 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Winterraps (Versuch 1)

Die Methanerträge bewegten sich bei den KSK-Varianten in einem relativ engen Rahmen von 238 bis 247 l/kg oTS (Abbildung 18). Die Nullvarianten lagen über diesen Werten. Die höchsten Methanerträge je Hektar konnten wiederum auf den 100cm-75Vol%KSK-Variante mit 1765 m³ erzielt werden. Schlechter schnitten die Mächtigkeiten von 70 cm mit 1114 m³/ha (50 Vol% KSK) und 1390 m³/ha (75 Vol% KSK) Methanausbeute ab. Auf den Nullvarianten konnte nur ein sehr geringes Biomassewachstum verzeichnet werden. Dadurch war es nicht möglich, Quadratmeterproben zu nehmen und Gasausbeuten zu berechnen.

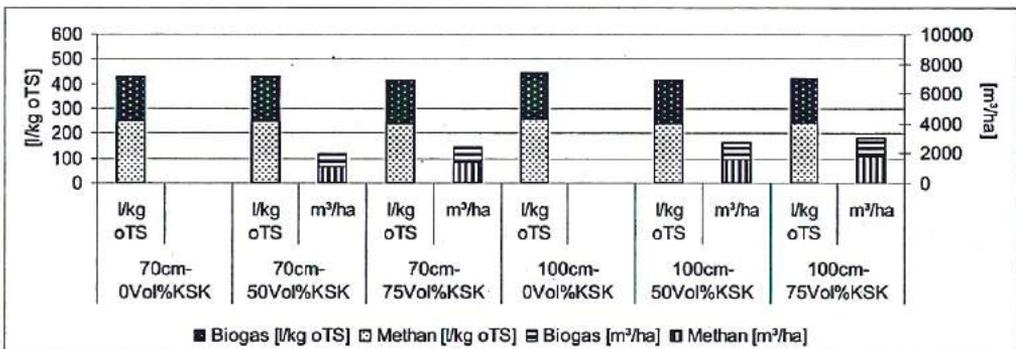


Abbildung 18 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Raps (Versuch 1)

Energiegras

Da die Gehalte an Rohasche, -protein, -fett und -faser im zeitlichen Verlauf eines Jahres in Abhängigkeit vom Schnittermin stark schwankten, wurden die Werte nicht zusammengefasst. Des Weiteren unterschieden sich die Werte der ersten Ernte 2007 nach

dem Aufbau der Kulturschicht aufgrund sehr hoher verfügbarer Nährstoffgehalte deutlich von den Folgenden. Der Vergleich der KSK-Varianten hinsichtlich der **Rohaschegehalte** zeigte eine Abhängigkeit von der Mächtigkeit, während sich die Zumischung innerhalb einer Mächtigkeit nicht unterschieden (Abbildung 19). Die 70 cm mächtigen Varianten wiesen geringere Werte auf. Sehr hohe **Rohproteingehalte** mit über 20 % besaß die erste Ernte 2007 der KSK-Varianten. Die folgenden Schnitte lagen im Durchschnitt um 10 % niedriger. Es war ein deutlicher Unterschied zwischen den Schnittzeitpunkten zu erkennen. Bei den KSK-Varianten lag der Rohproteingehalt beim ersten Schnitt jeden Jahres um 5 % niedriger. Die geringsten Gehalte wiesen mit Abstand die Nullvarianten auf. Es konnte kein deutlicher Unterschied zwischen den Zumischungsverhältnissen und Mächtigkeiten festgestellt werden. Ein ähnliches Verhalten zeigte der **Rohfettgehalt**. Der erste Schnittzeitpunkt des Jahres hatte jeweils geringere Rohfettwerte und die KSK-Varianten unterschieden sich nicht aufgrund der Zumischung und der Mächtigkeit. Ebenso wiesen die Nullvarianten die geringsten Gehalte auf. Bezüglich der **Rohfasergehalte** konnte konstatiert werden, dass der erste Aufwuchs der Jahre mit den höheren Rohfasergehalten einherging. Es konnte ein Unterschied aufgrund der Mächtigkeit festgestellt werden. Die 70 cm mächtigen Varianten besaßen im Vergleich zu den 100 cm Varianten leicht höhere Rohfasergehalte. Ein Unterschied zwischen einer Zumischung von 50 oder 75 Vol% KSK wurde hingegen nicht deutlich. Der Vergleich mit TLL- und DLG-Literaturangaben ergab, dass die Rohaschegehalte in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt vergleichbar waren. Hohe Rohprotein- und Rohfettgehalte konnten für die Ernten im November 2007 und 2009 festgestellt werden, während sich der Juni 2009 auf zu niedrigem Niveau bewegte. Hohe Rohfettgehalte wiesen die Pflanzen zusätzlich im August 2008 auf. Bei den Rohfasergehalten traten im jahreszeitlichen Verlauf starke Schwankungen auf.

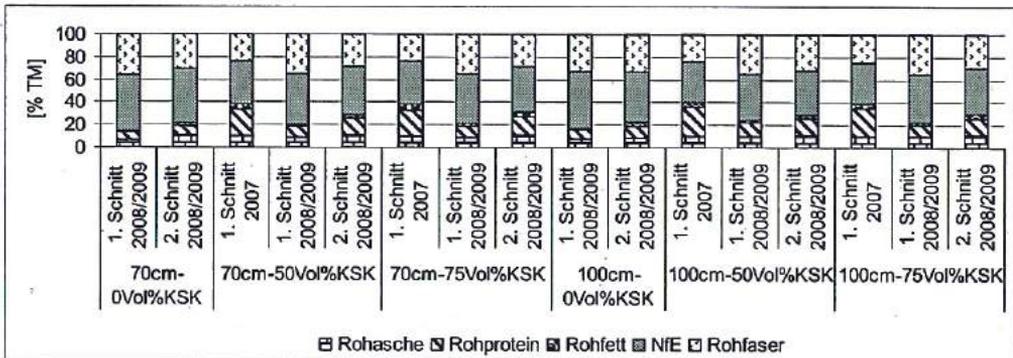


Abbildung 19 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 1)

Je geringer der Gehalt an Rohasche in der Biomasse war, umso höhere Ausbeuten konnten erzielt werden. Die Biogasausbeuten der 70 cm mächtigen KSK-Varianten lagen beim ersten Schnitt um 10 l/kg oTS höher als die der 100 cm mächtigen Varianten (Abbildung 20). Dies konnte beim zweiten Schnittzeitpunkt nicht bestätigt werden. Da sich die 50 und 75 Vol% KSK-Varianten innerhalb der Mächtigkeiten hinsichtlich der Rohnährstoffe nicht grundsätzlich unterschieden, konnten auch kaum Unterschiede in den Biogas- und Methanausbeuten

festgestellt werden. Die Ausbeuten bewegten sich in einem Bereich von 426 bis 457 l/kg oTS (Biogas) bzw. 252 und 261 l/kg oTS (Methan).

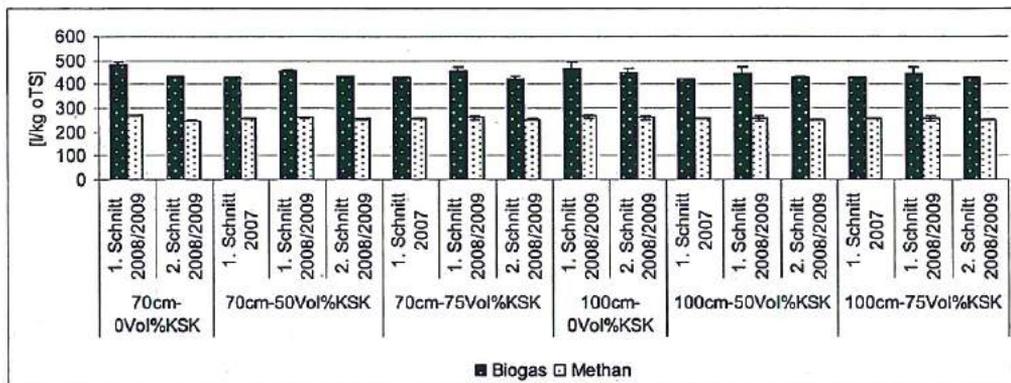


Abbildung 20 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 1)

Aufgrund der Unterschiede in den Ernteerträgen ergaben sich differente Biogas- und Methanausbeuten (Abbildung 21). Im ersten Jahr fand ein später Schnitt mit geringem Biomasseaufwuchs auf allen untersuchten Varianten statt. Bei der 100cm-75Vol%KSK-Variante konnte die höchste Ausbeute verzeichnet werden. In den folgenden Jahren war ebenfalls ein besseres Wachstum auf den 100 cm mächtigen Varianten zu beobachten, die sich in einer bis zu 26 % Steigerung der Methanerträge bemerkbar machte (Jahr 3 – 100cm-75Vol%KSK im Vergleich zu 70cm-75Vol%KSK). Ein deutlicher Ertragszuwachs wurde im Laufe der Jahre erfasst. Innerhalb der Mächtigkeit von 70 cm waren die Unterschiede nicht eindeutig auszumachen, während eine Steigerung der Zumischung bei der 100 cm mächtigen Variante im 3. Jahr deutlich sichtbar wurde. Die Nullvarianten wiesen in den Jahren 2 und 3 die geringsten Biogas- und Methanausbeuten auf. Die höchsten Biogasausbeuten mit 10186 m³/ha wurde durch die höchste Zumischung an KSK von 75 Vol% und 100 cm Mächtigkeit im 3. Versuchsjahr erbracht.

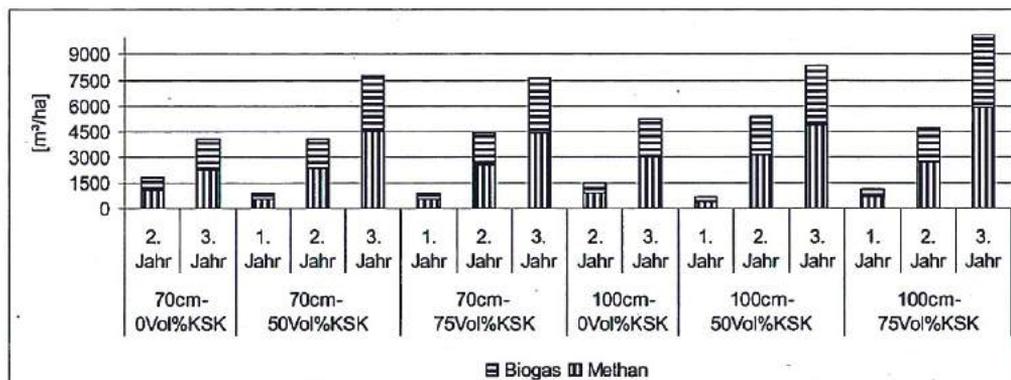


Abbildung 21 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [m³/ha] von Energiegras nach Jahren (Versuch 1)

4.2.1.2 Nährstoffverhältnisse

Die C/N Verhältnisse von **Senf** unterschieden sich deutlich zwischen der 70 und der 100 cm mächtigen Variante unabhängig vom Zumischungsverhältnis (Tabelle 47). Bei der 70 cm mächtigen Variante und einer Zumischung von 50 und 75 Vol% KSK war ein deutlicher N-Überschuss erkennbar, der in einem zu niedrigen C/N Verhältnis zum Ausdruck kam. Die Unterschiede zwischen den Mächtigkeiten der KSK-Variante sind nicht zu begründen. Bezüglich des C:N:P:S Verhältnisses ist Senf allgemein durch hohe Schwefelkonzentrationen infolge pflanzenphysiologischer Merkmale gekennzeichnet. Dies kann zur Bildung von H₂S führen. P stand mit Ausnahme der Nullvarianten in ausreichender Menge zur Verfügung.

Das C/N-Verhältnis bei **Roggen/Weizen** bewegte sich zwischen 17 und 60, wobei gerade die Nullvarianten durch einen Mangel an N auffielen. Allerdings war auch das Verhältnis bei der Variante 100cm-75Vol%KSK zu weit. Die restlichen Varianten bewegten sich in dem als optimal eingestuften Bereich. Bei Betrachtung der C:N:P:S-Verhältnissen konnte ein S- und P-Mangel bei den Nullvarianten konstatiert werden, der eine ungünstige Vergärung nach sich zieht.

Weizen wies bei allen Varianten ein eher ungünstiges C/N-Verhältnis auf. Hier spielte eventuell der späte Erntezeitpunkt als Faktor hinein. Die S und P-Gehalte lagen generell im Vergleich zu C in zu niedrigen Dimensionen vor.

Das C/N-Verhältnis des angebauten **Sudangras** lag bei allen untersuchten Varianten in einem als optimal bezeichneten Bereich zwischen 21 und 30. Allerdings konnte ein zu hoher C-Gehalt in den Pflanzen im Vergleich zu P und S festgestellt werden.

Bei den KSK-Varianten von **Mais** lag das C/N-Verhältnis im Grenzbereich, jedoch wiesen auch die Nullvarianten deutlich zu geringe N Werte auf. Wie auch in den vorher beschriebenen Pflanzenarten lagen P und S bei allen untersuchten Varianten nicht in einem Optimalbereich.

Raps war gekennzeichnet durch seine hohe Aufnahme von P und S. Dadurch wurde das C:N:P:S-Verhältnis zugunsten von P und S verschoben und konnte nicht mehr als günstig eingestuft werden. Die C/N-Verhältnisse lagen auf allen KSK-Varianten zwischen 25 und 30 und damit in dem als optimal angegebenen Bereich.

Tabelle 47 C:N:P:S-Verhältnisse und C/N-Verhältnisse der untersuchten Fruchtarten (Versuch 1)

Fruchtart	Mächtigkeit	Zumischung KSK	C/N-Verhältnis	C :	N:	P:	S
	[cm]	[Vol%]					
Senf	70	0	17	500	29	4	8
	70	50	9	500	54	6	11
	70	75	9	500	54	6	12
	100	0	8	500	60	4	9
	100	50	19	500	27	6	9
	100	75	11	500	44	7	13
Weizen/Roggen	70	0	41	500	12	2	1
	70	50	32	500	16	4	2
	70	75	28	500	18	3	2
	100	0	60	500	8	3	1
	100	50	17	500	29	5	4
	100	75	44	500	11	4	1
Weizen	70	0	44	500	11	3	2
	70	50	43	500	12	2	1
	70	75	33	500	15	3	2
	100	0	42	500	12	2	1
	100	50	33	500	15	3	1
	100	75	46	500	11	3	1
Sudangras	70	0	27	500	18	3	2
	70	50	25	500	20	3	1
	70	75	23	500	22	3	2
	100	0	21	500	23	4	2
	100	50	30	500	17	3	1
	100	75	27	500	18	1	1
Mais	70	0	72	500	7	2	2
	70	50	41	500	12	2	1
	70	75	33	500	15	2	2
	100	0	44	500	11	3	4
	100	50	40	500	12	2	1
	100	75	35	500	14	2	1
Raps	70	0	23	500	21	6	9
	70	50	27	500	18	6	9
	70	75	26	500	19	7	9
	100	0	30	500	17	4	5
	100	50	30	500	17	7	11
	100	75	25	500	20	7	9

In Tabelle 48 sind die untersuchten C/N-Verhältnisse des **Energiegrases** dargestellt. Aufgrund hoher Gehalte an verfügbarem N auf den KSK-Varianten im ersten Anbaujahr lagen auch in der Pflanze hohe Gehalte vor, die sich im C/N-Verhältnis widerspiegelten. Die KSK-Varianten wiesen bei Vergleich der Mittelwerte ähnliche C/N-Verhältnisse im Bereich von 22 bis 28 für den ersten Schnittzeitpunkt 2008-2009 auf. Der zweite Schnitt war gekennzeichnet durch niedrigere C/N-Werte in einem Bereich zwischen 18 und 19. Die Nullvarianten zeigten unabhängig von der Mächtigkeit die weitesten C/N-Verhältnisse. Bezüglich des C:N:P:S-Verhältnisses unterschieden sich die KSK-Varianten kaum. Der zweite Schnitt ging mit höheren S-Gehalten einher. Grundsätzlich konnte das Makronährstoffverhältnis für P als zu niedrig eingestuft werden, während es für den Parameter S in einem noch optimalen Bereich lag.

Tabelle 48 C/N-Verhältnis und C:N:P:S-Verhältnis des Energiegrases (n=5) über 3 Versuchsjahre (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]		C/N	C:	N:	P:	S
70	0	1. Schnitt 2008/09	45,5 ± 18,7	500	12,0 ± 4,9	1,7 ± 0,4	1,2 ± 0,1
		2. Schnitt 2008/09	33,4 ± 0,1	500	15,0 ± 0	2,1 ± 0,6	2,0 ± 0,2
70	50	1. Erntetermin 2007	10,8	500	46,3	5,2	3,7
		1. Schnitt 2008/09	28,4 ± 2,9	500	17,7 ± 1,8	2,8 ± 0,2	1,8 ± 0,6
		2. Schnitt 2008/09	18,8 ± 5,2	500	27,7 ± 7,6	3,1 ± 0,6	2,7 ± 0,5
70	75	1. Erntetermin 2007	11,6	500	43,1	4,9	3,3
		1. Schnitt 2008/09	26,2 ± 1,7	500	19,1 ± 1,2	2,9 ± 0,5	2,0 ± 0,1
		2. Schnitt 2008/09	17,7 ± 3,1	500	28,6 ± 4,9	2,9 ± 0,2	2,8 ± 0,4
100	0	1. Schnitt 2008/09	37,9 ± 15,5	500	14,4 ± 5,9	2,3 ± 0,8	1,6 ± 0,5
		2. Schnitt 2008/09	26,0 ± 3,1	500	19,4 ± 2,3	2,2 ± 0,0	2,1 ± 0,1
100	50	1. Erntetermin 2007	10,1	500	49,6	5,5	3,7
		1. Schnitt 2008/09	22,4 ± 6,9	500	23,4 ± 7,2	3,2 ± 1,0	2,1 ± 0,2
		2. Schnitt 2008/09	18,8 ± 3,1	500	27,0 ± 4,4	3,1 ± 0,3	2,8 ± 0,4
100	75	1. Erntetermin 2007	10,3	500	48,5	5,9	3,6
		1. Schnitt 2008/09	26,5 ± 3,9	500	19,1 ± 2,8	3,1 ± 0,9	2,1 ± 0,1
		2. Schnitt 2008/09	18,4 ± 3,5	500	27,6 ± 5,2	2,8 ± 0	2,8 ± 0,3

4.2.2 Versuch 2

4.2.2.1 Rohrnährstoffgehalte, Biogas- und Methanausbeuten

Sonnenblume

Die Rohaschegehalte der KSK-Varianten bewegten sich zwischen 12,4 und 12,9 % und damit mindestens 1,6 % über denen der Nullvariante. Eine höhere Zumischung an KSK wirkte sich mit einer Steigerung der Rohproteingehalte aus. Dies war ebenfalls für die Rohfettgehalte zu konstatieren. Hingegen lagen die Rohfasergehalte der KSK-Varianten

gleichauf mit der Nullvariante in einem Bereich von ca. 29 %. Während die Rohprotein- und Rohaschegehalte vergleichbar mit DLG-Angaben waren, lagen die Gehalte an Rohfett bei Zumischung von 75 Vol% KSK deutlich über den Vergleichswerten. Ebenso waren die Rohfasergehalte der KSK-Biomasse deutlich erhöht.

Die Methanausbeuten der Nullvariante und der Zumischung von 75 Vol% KSK lagen auf einem Niveau von 248 l/kg oTS. Die KSK50-Variante lag 12 l/kg unter diesem Wert (Abbildung 22).

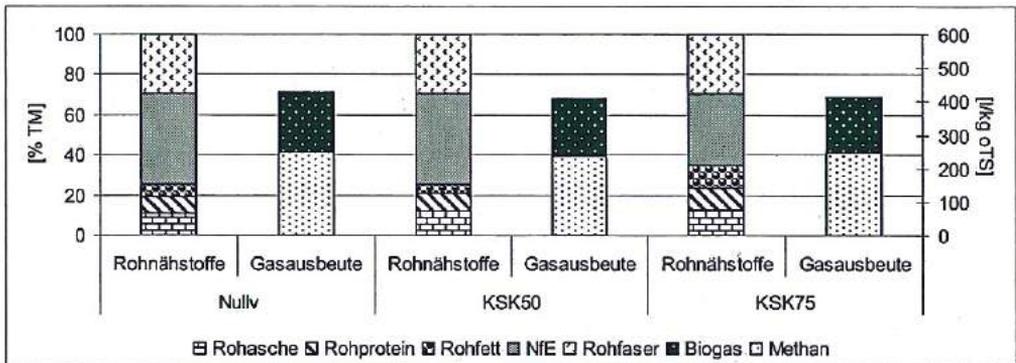


Abbildung 22 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS und m³/ha] von Sonnenblume (Versuch 2)

Mais

Die Rohaschegehalte der KSK50-Variante lagen mit 9,5 % am höchsten, gefolgt von KSK75 (7,1 %) und der Nullv (6,7 %). Sowohl der Rohprotein- als auch Rohfettgehalt stieg mit zunehmender Beimengung an KSK an, jedoch erreichte die Nullv jeweils höhere Werte (Abbildung 23). Ebenso konnten durch KSK-Einsatz erhöhte Rohfasergehalte analysiert werden, die sich zwischen 24,2 % (KSK75) und 29 % (KSK50) bewegten. Die Rohasche- und Rohfasergehalte lagen im Vergleich zu den Daten von TLL und DLG zu hoch, die Rohproteinwerte waren vergleichbar, wie auch teilweise die Gehalte an Rohfett.

Die Methanausbeuten bewegten sich auf ähnlichem Niveau wie in Versuch 1 und erreichten 277 (KSK50) bis 295 (KSK75) l/kg oTS.

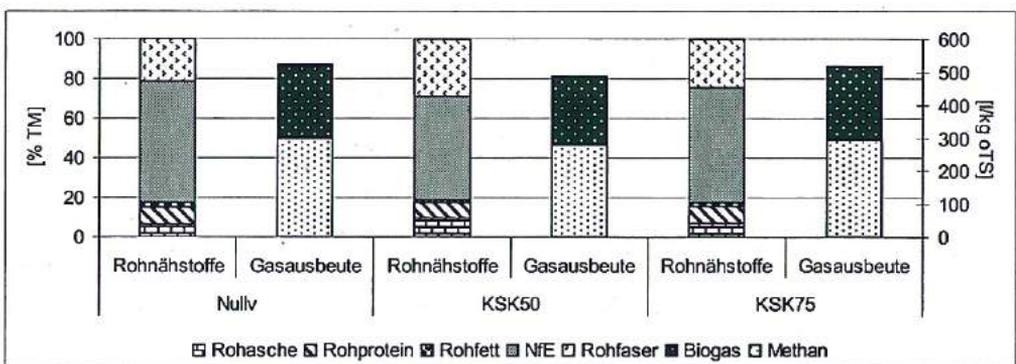


Abbildung 23 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Mais (Versuch 2)

Sudangras

Während sich die Rohaschegehalte für KSK50 und Nullv auf einem Niveau von 7,7 % bewegten, stiegen sie für KSK75 auf 8,9 %. Den höchsten Rohproteingehalt konnte die KSK50-Variante mit 10,1 % nachweisen. Der Rohfett- und Rohfasergehalt stieg mit zunehmender Beimengung an KSK an. Im Vergleich zur Nullv konnten jedoch bei diesen Parametern sinkende Werte konstatiert werden. Die Rohasche-, Rohprotein- und Rohfettgehalte der auf KSK angebauten Biomasse lagen im Bereich der Angaben von TLL und DLG. Für Rohfaser wurden unabhängig vom eingesetzten Substrat geringere Gehalte ermittelt, was für die Vergärung als positiv zu beurteilen ist.

Die im Versuch 2 erzielten Methanausbeuten lagen bei den KSK-Varianten über denen von Versuch 1 und erreichten 229 (KSK75) bis 234 (KSK50) l/kg oTS.

Auch für Versuch 2 wurden mittels Hohenheimer Biogasertragstest die tatsächlichen Ausbeuten im **Batchversuch** ermittelt. Diese sind ebenfalls in Abbildung 24 dargestellt. Es konnten bei allen untersuchten Varianten deutlich höhere Methanausbeuten in l/kg oTS im Vergleich zu den berechneten Werten erzielt werden. Diese lagen bei Betrachtung der gemessenen Werte von KSK50 bei 334 l/kg oTS und leicht niedriger bei KSK75 in Höhe von 318 l/kg oTS.

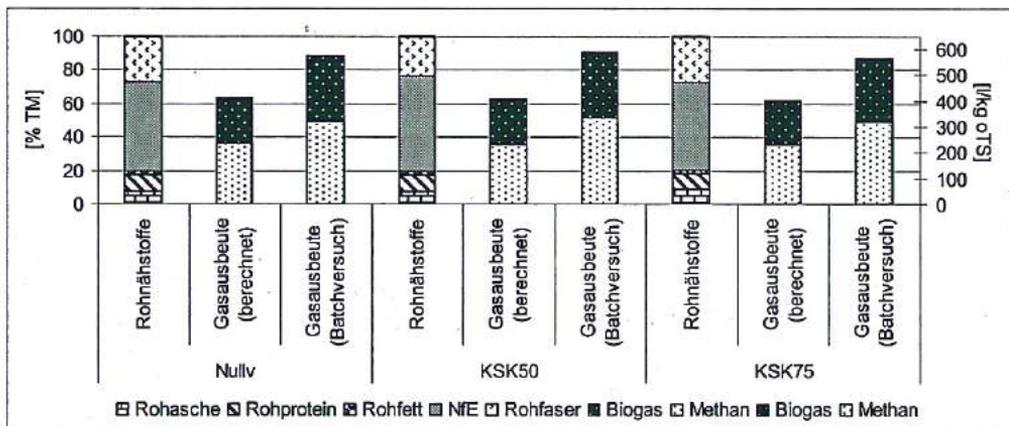


Abbildung 24 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute (berechnet und Batchversuch) [l/kg oTS] von Sudangras (Versuch 2)

Sommerraps

Sinkende Rohasche- und Rohproteingehalte sowie steigende Rohfett- und Rohfasergehalte wurden bei Sommerraps im Vergleich zur Nullvariante beobachtet (Abbildung 25). Weiterhin konnten mit steigender Zumischung an KSK erhöhte Rohasche-, Rohprotein- und Rohfettgehalte, hingegen niedrigere Rohfaserwerte konstatiert werden. Die Rohfasergehalte lagen deutlich und die Rohaschegehalte geringfügig über den Literaturwerten. Die Rohprotein und -fettwerte waren vergleichbar. Der angebaute Sommerraps konnte wesentlich höhere Rohfett-, -asche und -proteingehalte vorweisen als der Winterraps in Versuch 1. Zusätzlich waren die Rohfaserwerte im Durchschnitt geringer.

In den berechneten Methanausbeuten ließen sich keine Unterschiede aufgrund der Höhe der Zumischung feststellen; 247 l/kg oTS (KSK50) und 248 l/kg oTS (KSK75). Die Nullv erreichte hingegen nur 231 l/kg oTS.

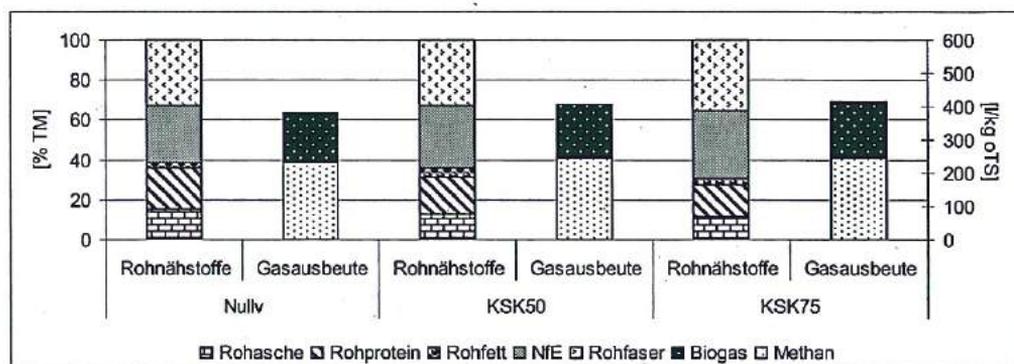


Abbildung 25 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Raps (Versuch 2)

Zuckerhirse

Die KSK50-Variante wies mit 8,0 % im Vergleich zu KSK75 höhere Rohaschegehalte auf. Hingegen konnte mit zunehmender Zumischung eine Abnahme der Gehalte an Rohprotein und Rohfett festgestellt werden (Abbildung 26). Die Rohfaserwerte lagen zwischen 29,4 % (KSK75) und 29,7 % (KSK50). Die Nullvariante ging mit den höchsten Gehalten an Rohnährstoffen einher. Dies galt v.a. für die Rohprotein- und fettwerte. Die gesamten Rohnährstoffgehalte auf allen KSK-Varianten lagen im Schwankungsbereich der Literaturwerte. Einzig die Rohproteingehalte waren leicht erhöht.

Die KSK-Varianten hatten höhere Biogas- und Methanausbeuten als die Nullv. Diese lagen in einem engen Bereich von 405 bis 410 l/kg oTS Biogas und 233 bis 237 l/kg oTS Methan.

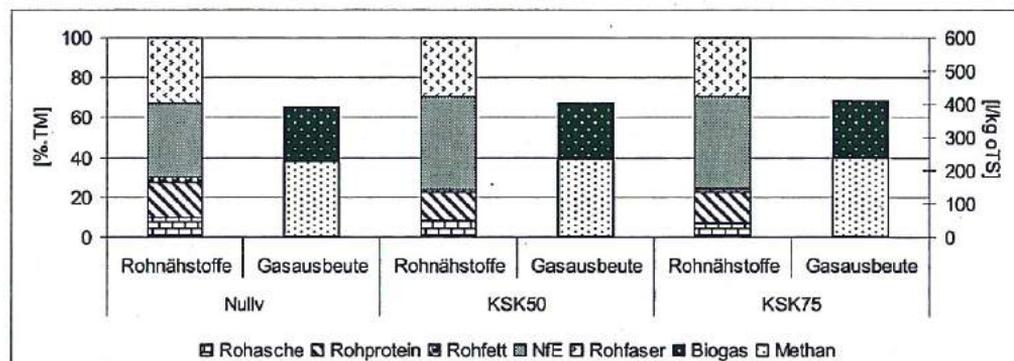


Abbildung 26 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Zuckerhirse (Versuch 2)

Sommergerste

Auch bei Sommergerste war eine Erhöhung der Rohaschegehalte mit zunehmender Bemengung an KSK zu verzeichnen; Nullv (7,3 %), KSK50 (7,4 %), KSK75 (8,2 %). Der Rohproteingehalt erreichte maximal 11,7 % (KSK75). Der Wert von Rohfett und Rohfaser sank durch Zumischung an KSK (Abbildung 27). Es konnte für Rohfaser eine Abnahme von 3 % im Vergleich zur Nullv gemessen werden. Die Gehalte an Rohfett und Rohfaser waren auf allen KSK-Varianten vergleichbar mit den Daten von TLL und DLG, während der Rohaschewert erhöht war.

Die Methanausbeuten bewegten sich folglich zwischen 248 l/kg oTS (KSK75) und 254 l/kg oTS (KSK50), während sich die Nullvarianten dazwischen einordneten.

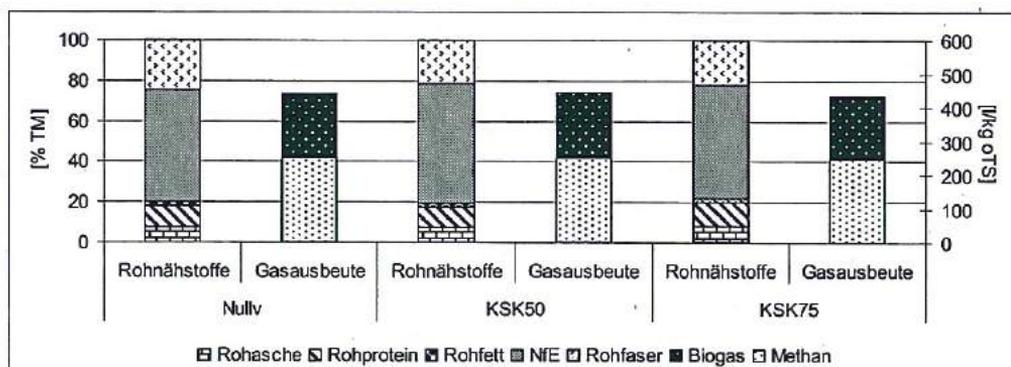


Abbildung 27 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Sommergerste (Versuch 2)

Sommertriticale

Wie bei fast allen Fruchtarten, die vorher betrachtet wurden, lagen auch bei Sommertriticale die Rohaschegehalte der KSK-Varianten über denen der Nullvariante. Die Gehalte der KSK-Biomasse bewegten sich sowohl bei einer Zumischung von 50 Vol% als auch bei 75 Vol% bei einem Wert von 5,7 % (Abbildung 28). Ebenso konnten bei Rohprotein keine Unterschiede aufgrund der Zumischungshöhe festgestellt werden. Durch Zugabe von KSK sank der Rohfettgehalt und stieg der Rohfasergehalt um mindestens 1,9 % an. Die Rohasche-, Rohfett- und Rohfasergehalte lagen vergleichbar mit den Werten der TLL, während die Rohproteingehalte 3-4 % höher waren.

Die KSK-Biomasse zeigte fast identische Methanerträge von 257 l/kg oTS (KSK50) und 258 l/kg oTS (KSK75).

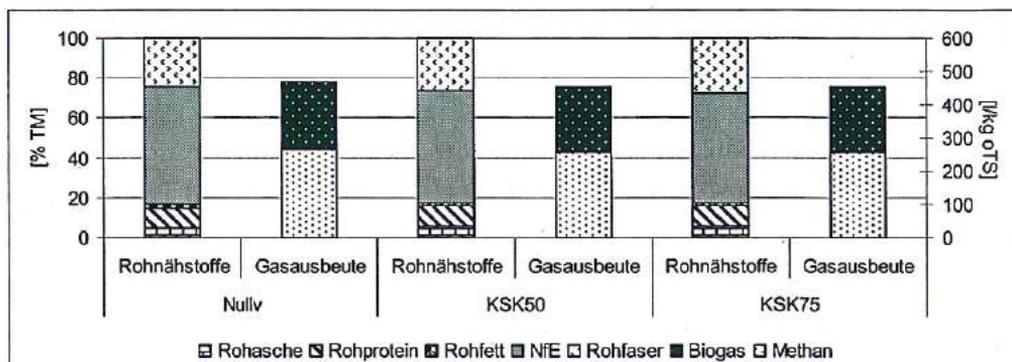


Abbildung 28 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe, Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Sommertriticale (Versuch 2)

Energiegras

In der gesamten Versuchszeit konnten durch KSK-Zusatz steigende Rohaschegehalte im Vergleich zur Nullv analysiert werden (Abbildung 29). Dabei wurden generell die höchsten Werte 2008 bestimmt. Eine Abhängigkeit von der Höhe der Zumischung an KSK war nicht erkennbar. Steigende Rohproteingehalte aufgrund KSK als Rekultivierungssubstrat wurden ebenso konstatiert. Diese erreichten im Jahr 2008 und zum ersten Schnittzeitpunkt 2009 Werte zwischen 12,3 % (KSK50) und 14 % (KSK50 und KSK75). Hingegen lagen die Rohproteingehalte der Ernte im November 2009 mit 17,3 % (KSK75) und 20,9 % (KSK50) deutlich höher. Wiederum konnten auf den KSK-Substraten im Vergleich zur Nullv steigende Rohfettwerte verifiziert werden, dabei lag der höchste Gehalt bei 6,9 % (KSK75, 2008). Jedoch ist die Aussage über die Zumischungshöhe nicht eindeutig, da KSK75 im August 2008 und Juni 2009 die höchsten Werte erreichte, doch KSK50 im November 2009. Die Rohfasergehalte des Energiegrases sanken durch KSK-Zugabe im Vergleich zur Nullv zu jedem Schnittzeitpunkt. Jedoch ließen sich deutliche Unterschiede allein aufgrund des Schnittzeitpunktes ableiten. KSK75 besaß Gehalte von 24,9 % (August 2008), 30,7 % (Juni 2009) und 26,3 % (November 2009).

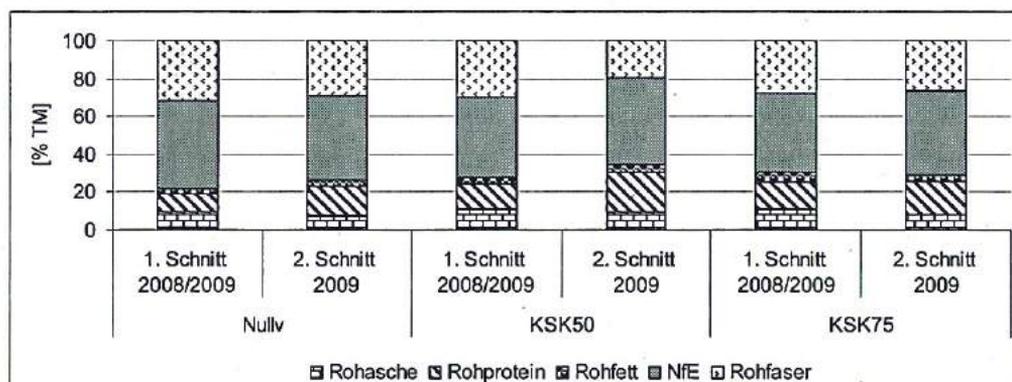


Abbildung 29 Prozentuale Gehalte der Rohnährstoffe von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 2)

Im zeitlichen Versuchsverlauf stiegen die Methanausbeuten der jeweiligen Varianten an. Bei KSK50 lagen diese anfangs bei 240 l/kg oTS und stiegen auf 264 l/kg oTS im November 2009. Die KSK75-Varianten besaßen 249 l/kg oTS im August 2008 und 270 l/kg oTS im November 2009 geringfügig höhere Methanerträge. Jedoch fiel auf, dass die Methanwerte der Nullv der jeweiligen Erntetermine geringfügig über denen der KSK-Varianten lagen (Abbildung 30).

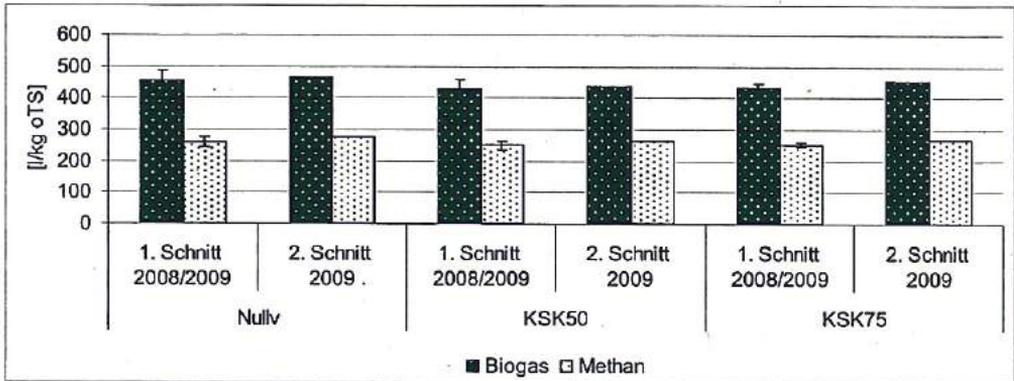


Abbildung 30 Theoretische Biogas- und Methanausbeute [l/kg oTS] von Energiegras nach Schnittzeitpunkt (Versuch 2)

4.2.2.2 Nährstoffverhältnisse

Bei der Fruchtart **Sonnenblume** lagen die C/N-Verhältnisse im als optimal bezeichneten Bereich. KSK50 hatte im Vergleich zu KSK75 jedoch geringere P- und S-Gehalte (Tabelle 49).

Das C/N-Verhältnis von **Mais** lag hingegen nicht in einem Optimalbereich, es konnte als zu weit beschrieben werden. Wie auch bei der vorher beschriebenen Pflanzenart konnte für P und S kein Optimum angenommen werden. Unterschiede zwischen KSK50 und KSK75 wurden nicht deutlich.

Bei **Sudangras** lag das C/N-Verhältnis bei allen untersuchten Varianten in dem ausgewiesenen Optimalbereich zwischen 27 und 30. Allerdings wurde ein zu hoher C-Gehalt in den Pflanzen im Vergleich zu P und S festgestellt.

Die C/N-Verhältnisse von **Raps** lagen auf allen Varianten zwischen 12 und 17 und waren damit als geeignet einzustufen. Die Biomasse war wie in Versuch 1 gekennzeichnet durch eine hohe Aufnahme von P und S. Dies verschob das C:N:P:S-Verhältnis in eine als ungünstig zu bezeichnende Richtung.

Die KSK-Varianten der **Zuckerrhirse** besaßen C/N-Verhältnisse von 19 (KSK75) und 20 (KSK50) und lagen folglich im optimalen Bereich.

Das C/N-Verhältnis (24 bis 27) konnte auch bei **Sommergerste** als optimal eingeschätzt werden. Gerste wies im Vergleich zu den anderen Fruchtarten, mit Ausnahme von Raps, einen höheren Gehalt an P auf. Die P- und S-Gehalte unterschieden sich jedoch nicht innerhalb der KSK-Varianten.

Aufgrund der Zumischungshöhe an KSK ließen sich für **Triticale** keine Unterschiede in den Nährstoffverhältnissen feststellen. Das C/N-Verhältnis konnte wiederum als geeignet für die Vergärung eingestuft werden.

Tabelle 49 C:N:P:S-Verhältnisse und C/N-Verhältnisse der untersuchten Fruchtarten (Versuch 2)

Fruchtart	Zumischung KSK C/N-Verhältnis		C :	N:	P:	S
	[Vol%]					
Sonnenblume	0	32	500	16	2	2
	50	31	500	16	1	1
	75	26	500	19	3	2
Mais	0	33	500	15	2	1
	50	35	500	14	2	1
	75	34	500	15	1	1
Sudangras	0	29	500	17	3	1
	50	27	500	18	2	1
	75	30	500	17	2	2
Sommerraps	0	12	500	43	6	13
	50	15	500	34	6	14
	75	17	500	30	6	14
Zuckerhirse	0	14	500	36	4	3
	50	20	500	26	3	3
	75	19	500	26	3	2
Sommergerste	0	25	500	20	4	2
	50	27	500	19	4	2
	75	24	500	21	4	2
Sommertriticale	0	29	500	17	2	2
	50	28	500	18	3	2
	75	29	500	17	3	2

Ein anderes Bild als in Versuch 1 zeigte sich bei Betrachtung des Standortes ROMONTA für **Energiegras**. Hier lagen die C/N-Verhältnisse im Vergleich sowohl beim ersten (20-23) als auch beim zweiten Schnittzeitpunkt (14-17) bedeutend niedriger (Tabelle 50). Allerdings konnte allen analysierten Biomasseproben der KSK-Varianten ein für die Vergärung optimales Verhältnis von C/N unterstellt werden. Es lagen am zweiten Schnittzeitpunkt 2009 unabhängig von der Zumischungshöhe steigende N-, P- und S-Gehalte im Pflanzenmaterial vor. Während KSK50 zum ersten Schnitt 2008/09 geringere Gehalte an N, P und S im Vergleich zu KSK75 innehatte, verlief dies zum zweiten Schnitt konträr. Hingegen besaß die Nullv die weitesten C/N-Verhältnisse und die geringsten Gehalte an N und P.

Tabelle 50 C/N-Verhältnis und C:N:P:S-Verhältnis des Energiegrases von (n=3) über 2 Versuchsjahre (Versuch 2)

Zumischung KSK		C/N	C:	N:	P:	S
[Vol%]						
0	1. Schnitt 2008/09	29,0 ± 6,5	500	17,7 ± 3,9	2,1 ± 0,9	2,8 ± 1,0
	2. Schnitt 2008/09	18,5	500	27,0	3,1	2,5
50	1. Schnitt 2008/09	22,9 ± 4,1	500	22,2 ± 4,0	2,5 ± 0,1	2,5 ± 0
	2. Schnitt 2008/09	13,7	500	36,4	4,4	3,2
75	1. Schnitt 2008/09	19,8 ± 0,2	500	25,2 ± 0,2	2,6 ± 0,1	2,6 ± 0,2
	2. Schnitt 2008/09	16,7	500	30,0	3,8	2,6

4.2.3 Diskussion

Rohnährstoffe

Da Standortunterschiede in den untersuchten Rohnährstoffen erkennbar waren, wurden die Versuche 1 und 2 in der Zusammenfassung gesondert betrachtet.

Die **Rohasche**gehalte von **Versuch 1** bei Roggen unterschieden sich hinsichtlich der Zumischung und der Mächtigkeit. Mit zunehmender Zumischung an KSK und steigender Mächtigkeit erhöhten sich die Gehalte in der Pflanze. Sinkende Gehalte im Vergleich zur Nullvariante waren bei Sudangras, Weizen und Mais (Mächtigkeit 100 cm) festzustellen. Die KSK-Varianten untereinander ließen keine Unterschiede bei Sudangras, Weizen und Raps erkennen. Der **Rohproteingehalt** stieg bei Senf, Mais und Weizen bei allen Mächtigkeiten im Vergleich zur Nullvariante. Für die 70 cm-Varianten von Roggen und Sudangras ließ sich dies ebenfalls bestätigen. Nur bei Raps waren keine Unterschiede zwischen den Mächtigkeiten und Zumischungen an KSK festzustellen. Der **Rohfett**gehalt ließ einen leichten Anstieg bei den Fruchtarten Roggen und Weizen erkennen, während bei Sudangras sinkende Gehalte im Vergleich zur Nullvariante beobachtet wurden. Keine Unterschiede hinsichtlich Zumischung und Mächtigkeit waren bei Senf zu beobachten. Bei Betrachtung der **Rohfaser**gehalte fiel die Variante 100cm-50Vol%KSK auf, die sowohl bei Senf als auch bei Roggen und Weizen die geringsten Gehalte erkennen ließ. Bei Senf, Raps und Weizen besaßen jeweils die 70 cm Varianten steigende Gehalte im Vergleich zur Nullvariante, während diese bei Sudangras und Mais sanken. Die 100 cm mächtige Variante konnte auf steigende Gehalte bei Sudangras, Mais und Raps verweisen.

Die einzelnen Schnittzeitpunkte des **Energiegrases** wurden gesondert betrachtet, da Unterschiede zwischen den Ernteterminen bestanden. Es wurden bei der ersten Ernte 2007 sehr hohe Rohprotein- und fettwerte, sowie geringe Rohfasergehalte bei den KSK-Varianten gemessen. Durch Zugabe von KSK stiegen die Gehalte von Rohasche und -protein bei allen untersuchten Varianten an beiden Schnittzeitpunkten 2008 und 2009 im Vergleich zur Nullvariante an. Dies ließ sich ebenso für den zweiten Schnitt 2008/09 für Rohfett bestätigen. Am ersten Schnittzeitpunkt 2008/09 wurden keine Veränderungen im Vergleich zur Nullvariante festgestellt. Der Rohfasergehalt ließ keine Veränderungen zum ersten

Schnittzeitpunkt 2008/09 erkennen, während er am zweiten Erntetermin 2008/09 durchweg sinkende Gehalte aufwies. Die Gehalte an Rohasche, -protein und -fett lagen am zweiten Erntetermin 2008/09 stets über den Werten des ersten Schnittzeitpunktes jeden Jahres. Konträr verhielt sich der Rohfasergehalt.

Bei Mais, Sonnenblume und Triticale des **Versuches 2** waren durch eine Zumischung an KSK im Vergleich zur Nullvariante höhere **Rohaschegehalte** zu verzeichnen, allerdings gab es keinen Unterschied zwischen KSK50 und den Nullvarianten von Sudangras und Gerste. Bei Raps und Zuckerhirse waren sinkende Gehalte bei zunehmender Zumischung an KSK zu verzeichnen. Eine höhere KSK-Beimengung beeinflusste die **Rohproteingehalte** von Sonnenblume und Sudangras mit erhöhten Werten. Keine Differenzen zwischen Null- und KSK-Varianten wurden bei Triticale und Mais nachgewiesen. Sinkende Rohproteinwerte waren für Raps und Zuckerhirse bei allen KSK-Varianten zu verzeichnen. Die geringsten Auswirkungen der Zumischungen an KSK waren auf den **Rohfettgehalt** zu beobachten. Bei Gerste und Triticale blieben die Gehalte unabhängig von der Zumischungshöhe auf einem Niveau. Sinkende Gehalte waren bei Zuckerhirse und Mais festzustellen. Die höchsten **Rohfasergehalte** wurden generell bei Raps beobachtet. Niedrigere Gehalte an Rohfaser wurden bei Zumischung an KSK im Vergleich zur Null bei Sudangras, Gerste und Zuckerhirse verzeichnet. Unterschiede zwischen 50 und 75 Vol% waren hier allerdings wenig betont. Gleichbleibende Rohfasergehalte im Vergleich zur Nullvariante waren bei Raps und Sonnenblume zu finden.

Biogas- und Methanausbeuten

Über alle Fruchtarten hinweg betrachtet kann gesagt werden, dass der entscheidende Einflussfaktor auf die Biogas- und Methanausbeute in dem vorgestellten Versuch der im Feld erzielte Biomasseertrag ist. Die Rohnährstoffe der einzelnen Pflanzen unterscheiden sich zumeist nur minimal und bedingen somit nur geringe Unterschiede in der Berechnung der theoretischen Gasausbeute in l/kg oTS. Des Weiteren ist der Standorteinfluss nicht zu negieren. Es konnten Unterschiede in den angebauten Fruchtarten zwischen Versuch 1 und 2 aufgezeigt werden.

Die theoretischen Methanausbeuten der verschiedenen Fruchtarten an beiden Standorten in l/kg oTS sind aufgelistet nach ihrer Höhe in Tabelle 51 dargestellt. Grundlage war die Rangfolge der Varianten 100cm-50Vol%KSK sowie nachgeordnet KSK50. Es zeigte sich, dass Sudangras unabhängig vom Standort und den Zumischungsverhältnissen an KSK die geringsten Ausbeuten erbrachte, während Mais die höchsten Methanerträge lieferte.

Tabelle 51 Methanausbeuten in l/kg oTS der angebauten Fruchtarten von Versuch 1 und 2

	Versuch 1					Versuch 2		
	70/100cm-	70cm-	100cm-			Nullv	KSK50	KSK75
	0Vol%KSK	50Vol%KSK	75Vol%KSK	50Vol%KSK	75Vol%KSK			
	[l/kg oTS]							
Sudangras	205	223	227	226	224	236	234	229
Zuckerhirse						229	233	237
Sonnenblume						248	236	237
Raps	255	247	238	241	244	231	247	248
Roggen / Weizen	288	278	281	244	272			
Sommergerste						252	254	248
Sommertriticale						266	258	258
Weizen	243	258	262	265	254			
Senf	274	280	275	282	277			
Mais	282	290	288	296	283	298	277	295

Allerdings wurde im Batchversuch, aufgezeigt, dass wesentlich höhere Biogas- und Methanausbeuten in l/kg oTS auf den Standorten erreicht werden können. Im Vergleich zu den Literaturwerten wurden in Versuch 1 und 2 bei allen untersuchten Fruchtarten geringe Biogas- und Methanausbeuten in l/kg oTS erzielt. Eine mögliche Ursache liegt in der theoretischen Berechnung der Ausbeuten, da diese mit Einschränkungen zu betrachten ist (FRITZ 2008). Die Verdaulichkeiten, die durch Fütterungsversuche ermittelt wurden, sind der Futterwertabelle der DLG (DLG 2010) entnommen und beziehen sich demzufolge auf Verdauungsvorgänge beim Wiederkäuer. In diversen Literaturangaben wurde beschrieben, dass die Verweilzeit im Pansen nur eingeschränkt mit der in der Biogasanlage vergleichbar ist (FNR 2006): 144 h im Pansen stehen 30 Tage im Fermenter gegenüber. Durch diese erhöhte Verweilzeit im Biogasprozess kann von deutlich verbesserten Verdauungskoeffizienten ausgegangen werden (KAISER 2007). Hinzuweisen ist zusätzlich auf differente Verdaulichkeiten zu den Schnitzeitpunkten von Energiegras.

Des Weiteren wird von AMON et al. (2007) eine unterschiedliche Mikroorganismenpopulation im Pansen und Fermenter beschrieben. Nach OHLY (2006) ist ein weiteres Problem, dass keine Durchschnittswerte für Nährstoffe aufgrund von Reifegrad und Konservierung angenommen werden können, sondern jedes Substrat der „Weender Futtermittelanalytik“ unterzogen werden muss. Die Berechnung unterstellt eine optimale Vergärung, die allerdings in der Praxis durch Synergieeffekte, Raumbelastung und Verweilzeit nicht gegeben ist. Diverse andere Modelle zur Schätzung der Biogasausbeute sind bekannt (KOCH et al. 2010, AMON et al. 2007, SCHIEVANO et al. 2008, KAISER 2007). Eine gute Zusammenstellung der bisher entwickelten Modelle wird in der Dissertation von GERBER (2009) gegeben. WEIßBACH (2008) zum Beispiel beschreibt eine Methode, die den Parameter „fermentierbare organische Trockensubstanz“ einführt. Es wird als Bezugsgröße zur Biogasberechnung nicht der oTS-Gehalt genutzt, sondern „der Anteil an nicht nutzbarer oTS“ abgezogen.

Um die gesamte Biogas- und Methanausbeute in Bezug auf den Hektar besser einschätzen zu können, dient Tabelle 52. Es zeigte sich, dass die geringsten Ausbeuten pro Hektar für Senf und Raps zu erwarten waren. Die höchsten Erträge lieferten Weizen < Mais <

Energiegras im dritten Anbaujahr. Weiterhin wurde hier nochmals deutlich, dass sich eine höhere Schichtmächtigkeit durchaus positiv auswirkte.

Tabelle 52 Mittelwerte der Biogas- und Methanausbeuten in m^3/ha der angebauten Fruchtarten im Versuch 1 (sortiert nach Biogasausbeuten)

Fruchtart	70cm Mächtigkeit			Fruchtart	100cm Mächtigkeit		
	Zumischung KSK [Vol%]	Biogas [$\text{m}^3/\text{ha}^*\text{a}$]	Methan		Zumischung KSK [Vol%]	Biogas [$\text{m}^3/\text{ha}^*\text{a}$]	Methan
Raps	50	1933	1114	Senf	75	2172	1292
Senf	75	1973	1199	Senf	50	2605	1568
Senf	50	2321	1398	Raps	50	2768	1592
Raps	75	2428	1390	Raps	75	3049	1765
Sudangras	50	2898	1652	Roggen/Weizen	75	3597	2032
Roggen/Weizen	50	3320	1899	Roggen/Weizen	50	3872	2272
Energiegras 2. Jahr	50	4056	2324	Sudangras	50	3897	2208
Roggen/Weizen	75	4216	2419	Energiegras 2. Jahr	75	4687	2707
Energiegras 2. Jahr	75	4392	2530	Sudangras	75	4811	2733
Sudangras	75	4957	2836	Energiegras 2. Jahr	50	5358	3128
Weizen	50	5286	2994	Mais	50	6224	3510
Mais	50	5836	3295	Weizen	50	6579	3753
Weizen	75	6386	3643	Weizen	75	6953	3935
Mais	75	7475	4241	Energiegras 3. Jahr	50	8378	4819
Energiegras 3. Jahr	75	7589	4366	Mais	75	9354	5291
Energiegras 3. Jahr	50	7787	4482	Energiegras 3. Jahr	75	10186	5871

Da eine ganze Reihe von Faktoren auf die Biogas- und Methanausbeuten Einfluss besitzen, werden diejenigen in der Folge diskutiert, die bei den Versuchen zu berücksichtigen waren. Oft in der Literatur erwähnt wird der Erntezeitpunkt. Bei den eigenen Versuchen wurden die Erntetermine nach pflanzenbaulichen Gesichtspunkten gewählt. Die Eignung wird von AMON et al. (2006, 2007) bestätigt, die Untersuchungen zum Einfluss der Biogasausbeute durch den Erntezeitpunkt anstellten. Das Entwicklungsstadium Teigreife bei Getreide wird aufgrund der Ertragsbildung (maximale TS-Erträge werden erreicht) und Silierfähigkeit als optimal betrachtet. Winterroggen und Triticale können durch hohes Biomasseentwicklungspotential in der Jugend als Vorfrucht zu Sommerkulturen wie Mais eingesetzt werden. Diese Fruchtarten erreichen ihre maximalen Methanerträge bereits während des Ährenschiebens und der Milchreife. HEIERMANN und PLÖCHL (2004) stellten hingegen bei Gerste, Roggen und Triticale die geringsten Biogasausbeuten der Frischmassen während des Stadiums der Teigreife fest. Die Methangehalte bei Gerste und Roggen lagen bei 59 Vol%, während Triticale nur 50 Vol% erreichte. In Untersuchungen von RÖHRICHT und ZANDER (2008) konnten als optimale Erntezeitpunkte für Mais die Teigreife (31-37 % TS), für Zuckerhirse die Milchreife (20-27 % TS) und für Sudangras das volle Rispschieben (26-35 % TS) beobachtet werden. Hierdurch wurden TS-Gehalte erzielt, die für eine Silierung und die Umsetzung im Biogasprozess günstig sind. Generell sollten die TS-Gehalte von Mais aufgrund des Silierprozesses bei mindestens 28 % liegen. Von LENZEMO (2008) konnte in

Untersuchungen von unterschiedlichen Maissorten festgestellt werden, dass es „einen signifikanten Unterschied zwischen den Faktoren Sorte und Erntezeitpunkt sowohl in Bezug auf den TM-Ertrag als auch bezüglich der chemischen Komponenten (RP, RF, ADF, NDF)“ gab. Durch einen späteren Erntezeitpunkt konnte zwar der TM-Gehalt und -Ertrag gesteigert werden, jedoch war damit keine optimale Methan- und Biogasausbeute zu erzielen. Bei der Vergärung günstig sind TS-Gehalte bis zu 30 %, da sonst eine Zersetzung des Substrats nicht in gewünschtem Umfang stattfinden kann. Mit zunehmenden TS- und Rohproteingehalten wurden sinkende Gaserträge bestätigt (KAISER 2007).

Der Schnittzeitpunkt hat ebenfalls bei Grünland großen Einfluss auf die Biogas- und Methanausbeute. Je später der Erntezeitpunkt desto geringer sind die Rohprotein- und Rohfettgehalte und damit auch die Methangehalte (PROCHNOW et al. 2007). Des Weiteren wurde konstatiert, dass der Rohfaser- und der TS-Gehalt wie auch das C/N-Verhältnis zunehmen (HEIERMANN et al. 2009).

Einen weiteren Einfluss auf die geringe Biogasausbeute in l/kg oTS kann in den gewählten Grasarten (Knautgras, Rotschwingel und Glatthafer) gesehen werden. Jedoch wurde von MÄHNERT et al. (2002, 2005) ein derartiger Einfluss unterschiedlicher Grasarten (u.a. Knautgras, Deutsches Weidelgras, Wiesenschwingel, Wiesenlieschgras) auf das Gasbildungspotential negiert. Dabei spielte es ebenfalls keine Rolle, ob es sich um Frischgräser oder Silagen handelte. Die gemessenen Biogaspotentiale lagen hier jedoch wesentlich höher. Es wurden Ausbeuten zwischen 678 und 929 l/kg oTS gemessen. PROCHNOW et al. (2005) gaben bei Untersuchungen von Landschaftspflegegras Methangehalte von 48-55 Vol% an. Die Gehalte von Rohfett und -protein sanken bei diesen Untersuchungen im Laufe der Vegetationsperiode. Dies konnte bei den eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Sowohl der Rohprotein- als auch der Rohfettgehalt stiegen im Vegetationszeitraum an. Auch STRAUß et al. 2010 gaben an, dass sich die Nährstoffgehalte im zeitlichen Verlauf ändern. Je später die Ernte erfolgt, desto geringer sind die Gehalte in der Biomasse. Es wurde ebenso konstatiert, dass eine Abnahme der Biogasausbeute im zeitlichen Verlauf stattfand (PROCHNOW et al. (2005). Dies konnte bei den eigenen Versuchen ebenfalls nachvollzogen werden.

Sowohl bei Versuch 1 als auch Versuch 2 wurde Energiegras nur zweimal im Jahr gemäht. Die FNR (2010) untersuchte, dass Ackergräser für die Biogasproduktion nicht häufiger geschnitten werden sollten als diejenigen zur Futterproduktion. Eine „Nutzung mit verminderter Schnittfrequenz liefert insgesamt höhere TM-Erträge pro Hektar und Jahr.“

Weiterhin kann ein hoher Ligningehalt der angebauten Biomasse die Abbaurate bei der Vergärung stark beeinflussen (WEILAND 2010, AMON et al. 2005). Ab Ende der Teilgreife erhöht sich der Ligningehalt der Pflanzen und die Biogasausbeute ging zurück (FNR 2010). Bei Landschaftspflegegras und Weizenstroh konnten aufgrund hoher Faseranteile nur energetische Wirkungsgrade bis 60 % festgestellt werden. Diejenigen von Mais lagen zum Vergleich bei 80 % und Triticale als GPS bei 66 % (OHLY 2006). Hohe Rohfasergehalte wurden v.a. bei Sommerraps und Roggen analysiert (HEIERMANN et al. 2009). Bei den eigenen Versuchen wurden ebenfalls die höchsten Rohfasergehalte bei Raps mit über 40 % konstatiert. Durch Zumischung von KSK wurden abhängig von der Zumischungshöhe und der Pflanzenart teilweise erhöhte Rohfasergehalte festgestellt, die sich in der Folge negativ auf den Vergärungsprozess auswirken können. Auf den Versuchsstandorten konnten durch

eine Zumischung an KSK die geringsten Auswirkungen auf den Rohfettgehalt festgestellt werden. Theoretisch erbringen Fette hohe Biogausausbeuten, allerdings bedarf es aufgrund geringer Bioverfügbarkeit einer langen Verweilzeit (WEILAND 2010). Die höchsten Rohfettgehalte wurden bei Sonnenblume analysiert. Dies bestätigen HEIERMANN et al. (2009) mit der Aussage, dass Sonnenblumensilagen im Vergleich zu anderen Fruchtarten hohe Rohfettgehalte von 8 % besitzen. Bei Sonnenblumen wurden zudem sehr hohe Rohaschegehalte festgestellt, die hauptsächlich aus K, Ca und Cl bestanden (STÜLPNAGEL et al. 2009). Eine Schädigung auf den Vergärungsprozess ist demnach nicht auszuschließen. Dies kann allerdings durch die eigene Versuchsanstellung nicht belegt werden. Es wurden durch Zumischung an KSK im Vergleich zur Nullvariante in einigen Pflanzen (Mais, Roggen und Hafer) erhöhte Rohaschegehalte analysiert. Hohe Rohaschegehalte wirken sich negativ auf den Gasbildungsprozess aus, da sie nicht zur Bildung von Biogas beitragen. Mit sinkenden Gehalten an NfE konnten höhere Methangehalte im Biogas nachgewiesen werden (HEIERMANN et al. 2009). Ein weiterer, noch zu betrachtender Punkt ist die Sortenspezifität der Pflanzen. Bei untersuchten Maispflanzen wurde u.a. von KAISER (2007) eine Sortenspezifität hinsichtlich der Biogausausbeute unterstellt.

Nährstoffverhältnisse

Im Versuch 1 wirkte sich weder die Mächtigkeit noch das Zumischungsverhältnis eindeutig auf das C:N:P:S-Verhältnis aus. Es spielten eher pflanzenspezifische Parameter eine Rolle. Generell konnten die C/N-Verhältnisse bei fast allen untersuchten Fruchtarten als optimal eingeschätzt werden. Es waren keine negativen Auswirkungen aufgrund der Zumischungen an KSK oder in Bezug auf eine Änderung der Mächtigkeit zu erkennen. Einzig nach dem Aufbau der Kulturschicht wurden bei den erstangebauten Kulturen erhöhte N-Gehalte im Pflanzenmaterial bestätigt, die in der Folge zur Bildung von NH_3 im Biogasprozess führen können. Bei N-Steigerungsversuchen konnte festgestellt werden, dass die Fruchtarten Zuckerhirse und Sudangras durch erhöhte N_{min} -Gaben mit steigenden N- bzw. Rohproteingehalten in der Biomasse reagieren, welches zu negativen Folgen im Gärprozess führen kann. Des Weiteren beeinflusst der Erntezeitpunkt das C/N-Verhältnis. Je früher der Zeitpunkt liegt, desto N-reicher ist das Material und das Verhältnis verschiebt sich in Richtung N. Es kommt verstärkt zur NH_3 -Bildung. Die Summe der Biogas- und Methanausbeute wurde jedoch nicht verändert (RÖHRICHT und ZANDER 2008). Zu bemerken bleibt noch, dass Senf und Raps infolge von pflanzenphysiologischen Merkmalen durch sehr hohe Konzentration an S im Pflanzenmaterial auffielen. Dies kann bei der Vergärung eine H_2S -Bildung auslösen.

4.3 Sickerwasser

4.3.1 Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität

Unter Nutzung der experimentell ermittelten Daten mit Hilfe des Vegetationstests für die einzelnen Bodenarten und KSK-Varianten wurden polynomische Funktionen (Trendlinie mit Funktion im jeweiligen Diagramm ersichtlich) erstellt, um den Behörden ein Instrument zur Bemessung der nFK bei Abdeckschichten aus Rekultivierungsmaterial mit hohen Anteilen an organischer Substanz zu liefern. Die Zahlenwerte mit Standardabweichung sind in Anlage 25 zu finden. Des Weiteren wurde auf Unterschiede im Vergleich der Methoden des Sonnenblumenvegetationstest und der DIN 11274 hingewiesen.

Sand – Ss

Es zeigte sich bei Sand mit steigender Zumischung von KSK eine stetige Erhöhung sowohl der FK als auch der nFK. Bei einer Zumischung von 80 Vol% KSK war ein Anstieg der FK um 112 % zu verzeichnen. Dies bedeutet, dass die Wasserspeicherfähigkeit des Substrates von 17,8 auf 37,8 mm je dm Bodentiefe zunahm. Die nFK stieg bei einer realistischen Zumischung von 40 Vol% KSK auf einen Wert von 24 Vol% an. Bei Betrachtung des PWP des reinen Sandes (0 Vol% KSK) lagen diese bei 6 Vol% und stiegen mit zunehmender Zumischung an KSK bis auf einen Wert von 11 Vol% (80 Vol% KSK) an. Die polynomisch angepasste Gleichung mit Bestimmtheitsmaß für die nFK ist in Abbildung 31 dargestellt.

Die DIN-Methode lieferte keine verwertbaren Ergebnisse (Anlage 22). Je höher der Anteil an KSK war, desto geringer wurde die nFK und überstieg hierbei nicht 7 Vol%, da der Wert für den PWP überproportional zunahm.

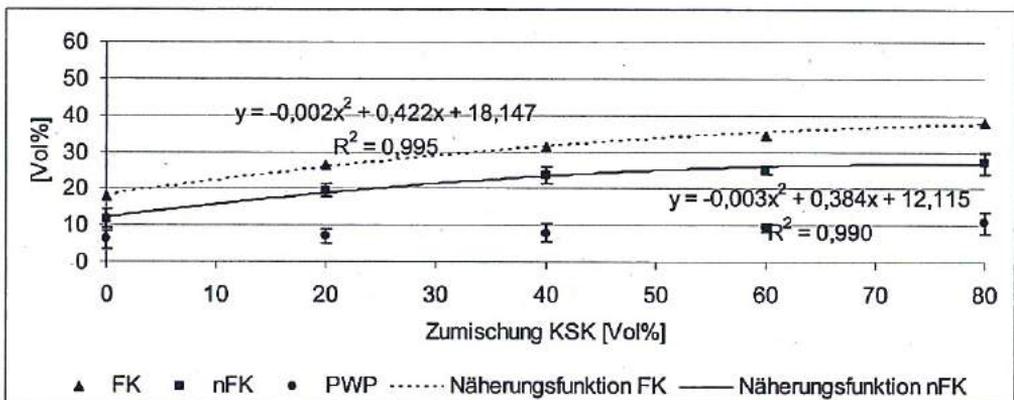


Abbildung 31 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Ss bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest

Schwach schluffiger Sand – Su2

Der schwach schluffige Sand war bei Betrachtung des Vegetationstests in der Abbildung 32 in seiner Ausprägung bezüglich der nFK vergleichbar mit dem reinen Sand. Durch eine Zumischung von KSK stiegen die Wassergehalte der nFK und FK an. Allerdings wurde eine

Art Plateau bei einer Zumischung von 40 Vol% KSK erreicht. Die Werte dieser Zumischung betragen 44 Vol% (FK) und 34 Vol% (nFK). Ab diesem Punkt nahmen die Werte sowohl für nFK als auch FK kaum noch zu bzw. waren für die nFK bei 80 Vol% Zumischung sogar rückläufig. Die PWP bewegten sich bei allen Varianten in einem relativ engen Bereich zwischen 8 und 14 Vol%. Die mit der DIN-Methode bestimmten Gehalte der nFK lagen um ein Fünffaches unter denen mit dem Vegetationstest ermittelten Werten (Anlage 23). Hier überstiegen die Werte des PWP die der nFK deutlich.

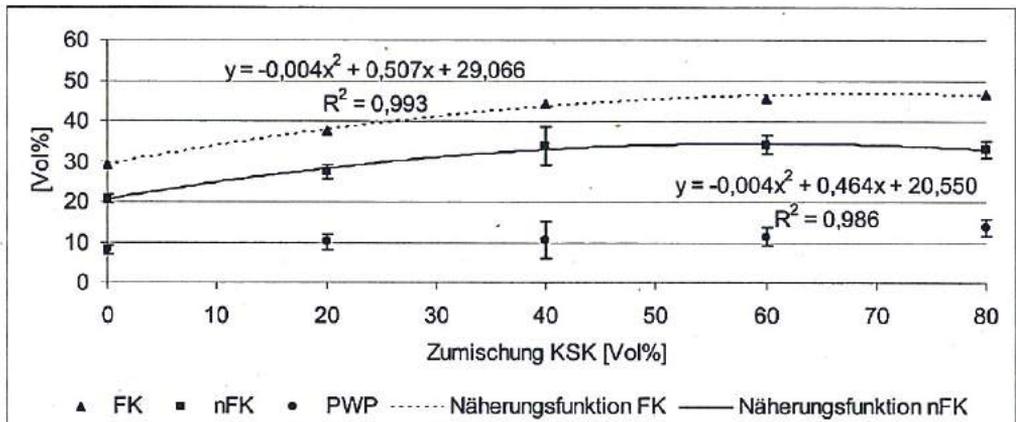


Abbildung 32 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su2 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest

Stark schluffiger Sand – Su4

Im Gegensatz zu den beiden vorher betrachteten Bodenarten war beim stark schluffigen Sand trotz hoher Glühverluste kaum eine Erhöhung der nFK durch Zumischung an KSK festzustellen, weil durch den hohen Anteil von 43 % Schluff bereits eine ausreichende Wasserspeicherfähigkeit des Bodens vorlag. Die nFK-Werte des Vegetationstests (Abbildung 33) der KSK-Varianten bewegten sich in einem Bereich zwischen 33 und 43 Vol%. Allerdings stieg die FK von 34 Vol% (0 Vol% KSK) bis auf einen Wert von 55 Vol% (60 Vol% KSK) an. Dies ließ auf höhere Werte des PWP als bei den vorher betrachteten Bodenarten schließen. Auch bei dieser Bodenart waren die mit der DIN-Methode (Anlage 24) gemessenen Gehalte der Wasserhaushaltsgrößen nicht nachzuvollziehen. Die Werte des PWP nahmen mit zunehmender Zumischung an KSK kontinuierlich zu. Somit ergaben sich aus der Differenz von FK und PWP sehr geringe nFK-Werte.

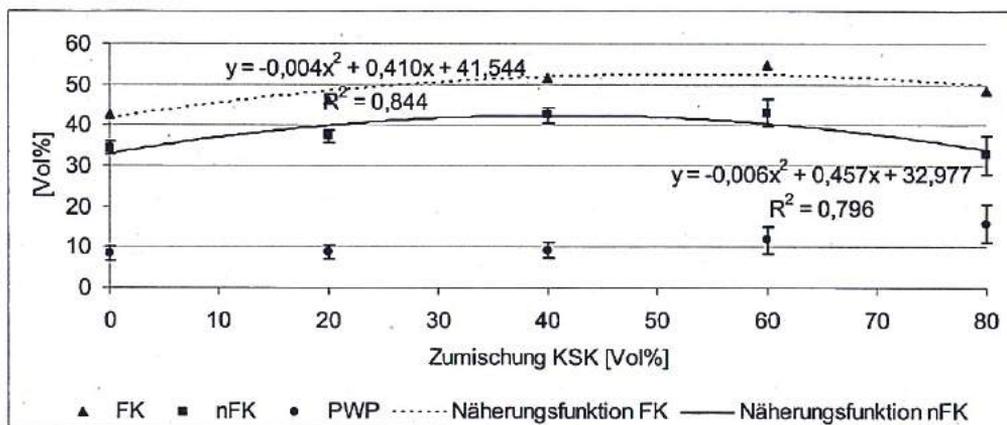


Abbildung 33 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest

Diskussion

Um exakte Aussagen über den Wasserhaushalt treffen zu können, wurde ein Vegetationstest als sinnvoll erachtet, der bei Verwendung von Sonnenblumen die maximale Ausnutzung des pflanzenverfügbaren Wassers gewährleistet. Sonnenblumen wurden als geeignete Indikatorpflanzen zum Anzeigen einer Welkeerscheinung am PWP erachtet (KIRKHAM 2004). Am PWP liegt ein Matrixpotential von $-1,5 \cdot 10^{-4}$ hPa vor (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). Von TOLK (2003) wurde ein Literaturüberblick betreffend der Methodik des Sonnenblumenvegetationstests gegeben. Es sind nur wenige Erkenntnisse zu physikalischen Eigenschaften wie Wasserhaushaltsparameter von KSK aus der Literatur bekannt. Häufig wurde nur reiner Klärschlamm untersucht. Zunehmende Bodenfeuchtegehalte wurden nach Schlammapplikation von NAVAS et al. (1998), ROS et al. (2003) sowie VEERESH et al. (2003) analysiert. Die mit Hilfe des Vegetationstests ermittelten Ergebnisse stimmen mit Erkenntnissen von AGGELIDES und LONDRA (2000) überein, die bei Untersuchungen von lehmigen und tonigen Böden ebenfalls steigende Wasserrückhaltevermögen bei sinkender Porosität feststellten. Aufgrund steigender nFK und Porosität können KSK die physikalischen Eigenschaften von Böden deutlich verbessern (PINAMONTI 1998). Auch FUCHS et al. (2004) konstatierten, dass Komposte aufgrund der Steigerung der OS und des Porenvolumens eine höhere Wasserkapazität verbunden mit einem besseren Infiltrationsvermögen besitzen. Durch die Erhöhung der Anzahl der mittleren Poren nimmt die Wasserspeicherfähigkeit zu. OJEDA und ALCANIZ (2010) stellten fest, dass KSK das Wasserhaltevermögen aufgrund verminderter Wasserbewegung durch schnelles Austrocknen der oberflächlichen Poren erhöhen. Ebenso stellten GAGNON et al. (1998) durch hohe Mengen an Kompost erhöhte Bodenfeuchten in sandigem Lehm um 3-5 % fest. Allerdings sind in der Literatur auch gegenteilige Aussagen zu finden. LIËBHARD und WRIESSING (2005) wie auch HUBER-HUMER (2004) unterstellten, dass bei Zugabe von KSK zwar die FK ansteigt jedoch die nFK sinkt. GOMISCEK (1999) stellte bei Zugabe von 40 % KSK zu einem sandigen Lehm nFK-Werte von nur 11,2 Vol% fest. Bei höherer Zugabe von 60 % KSK erniedrigte sich der Wert auf 10,2 Vol%. Durch Zugabe von OS mit abfallbürtigen

Substraten stieg sowohl die FK als auch der PWP, folglich blieb die nFK unbeeinflusst, da auch die Dichte abnahm (KHALEEL et al. 1981).

Insgesamt ist die Bestimmung der Wasserhaushaltsparameter von Rekultivierungsmaterialien mit hohen Anteilen an organischer Substanz nach DIN ISO 11274 durch die gegebene Struktur des KSK als problematisch zu bewerten. Der Vergleich zwischen DIN-Methode und Vegetationstest zeigte bei Betrachtung aller Varianten eine Unterschätzung der Werte der FK bei der DIN um maximal 80 %. Je höher die Zumischung an KSK war, desto größer wurde die Abweichung der nFK zwischen der DIN-Methode und dem Vegetationstest. Während bei der DIN-Methode durch KSK-Beimengung maximale nFK-Werte von 7 Vol% bei Su2 erreicht wurden, lagen diese bei Betrachtung des Vegetationstests auf einem deutlich höheren Niveau von 27 bis 34 Vol%. Diese Unterschiede können u.a. durch methodisch bedingte Auswirkungen, wie die Gefäßgröße und Entmischungseffekte erklärt werden. Weitere Ursachen sind der fehlende kapillare Kontakt der hydrophilen grobstrukturierten organischen Bestandteile im KSK und die meist sehr inhomogene Verteilung zwischen den mineralischen Bodenbestandteilen (FREDE et al. 1983). Auch TAUCHNITZ (2006) stellte fest, dass bei der DIN-Methode die Wassergehalte des PWP um mehr als 100 % überschätzt werden. Weiterhin zu beachten war, dass die Saugspannungen für charakteristische Bodenwassergehalte im Labor an gestörten Bodenproben ermittelt wurden. Die Ergebnisse entsprachen kurzzeitigen Versuchsbedingungen. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Bezeichnung Feldkapazität streng genommen nur für Bodenfeuchten bei stau- und grundwasserfreien Böden im Gelände gilt. Die im Labor bei pF 1,8 bestimmten Wasserkapazitäten sind somit als Äquivalentwerte für die FK anzusehen. In übertragenem Sinne gilt dieser Hinweis gleichermaßen für den PWP und die nFK, die für die Laborwerte ebenfalls als Synonyme Verwendung finden.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass durch die Verwendung von KSK die Wasserspeicherfähigkeit von Böden deutlich erhöht werden kann, dies gilt besonders für die sorptionsschwachen sowie ton- und schluffarmen Sande. Weiterhin wurde konstatiert, dass sich ein Vegetationstest besser zur Darstellung der Bodenwasserhaushaltsparameter von Rekultivierungsmaterialien mit hohem organischen Substanzanteil eignet als die bei Mineralböden bewährten Verfahren nach DIN ISO 11274, da hier die Wassergehalte am PWP deutlich überschätzt werden. Zur Vergleichbarkeit bedarf es der Standardisierung des Vegetationstests und der Klärung, inwiefern sich die DIN-Methode bei Substraten mit hohen Gehalten an organischer Substanz eignet.

4.3.2 Wasserhaushaltsmodellierung mit BOWAHALD

Um den Wasserhaushalt von KSK auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen nicht nur durch praktische Ergebnisse auszuweisen, sondern auch langjährige Aussagen bezüglich des Bodenwasserhaushaltes zu treffen, wurden mit dem von DUNGER (2002, 2006, 2010) entwickelten Deponie- und Wasserhaushaltsmodell BOWAHALD die wesentlichen hydrologischen Prozesse in der wasserungesättigten Wasserhaushaltsschicht simuliert.

In Tabelle 53 sind die mit Hilfe des Modells ermittelten mittleren Restdurchsickerungsmengen dargestellt. Es zeigte sich, dass eine Kulturschicht mit KSK-

Zumischung wesentlich geringere Sickerwassermengen aufwies als die Nullvariante. Bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 596 mm wurden ohne KSK-Einsatz bis 142 mm als Sickerwasser berechnet, während sich dieser Wert durch KSK-Beimengung auf maximal 42 % reduzierte. Dies war auf die hohe Evapotranspiration infolge der hohen nFK zurückzuführen. Es war festzustellen, dass sich eine Zunahme der Mächtigkeit bei allen KSK-Varianten als positiv erwies und zu einer Reduzierung der Durchsickerung von 59 % (50 Vol% KSK) und 57 % (75 Vol% KSK) führt. Hingegen wirkte sich die höhere Zumischung von 75 Vol% kaum aus.

Die Sickerwassermengen stiegen in normalen und extremen Nassjahren deutlich an. Jedoch kann auch hier der Einfluss von KSK als positiv hinsichtlich der Restdurchsickerungsmengen eingeschätzt werden. In normalen Nassjahren mit Niederschlägen von 659 mm konnte bei 100cm-75Vol%KSK mit nur 11 % Durchsickerung gerechnet werden. Bei den extremen Nassjahren wurde ein Jahresniederschlag von 823 mm angenommen, der im untersuchten Zeitraum ab 1990 kein einziges mal auftrat. Bei Annahme dieses Extremniederschlages stiegen die Sickerwassermengen bei Betrachtung der günstigsten Variante (100cm-75Vol%KSK) auf 23 % des Niederschlages an. Weiterhin kann es unter der Kulturschicht aufgrund der darunterliegenden Bauschuttschicht zu Stauwasserbildung in Nassjahren kommen, welche nur langsam einen lateralen Abfluss findet.

In normalen Trockenjahren mit 533 mm Niederschlag konnte nur bei den Nullvarianten eine Restdurchsickerung festgestellt werden, diese reduzierte sich in den extremen Trockenjahren (Niederschlag 369 mm) nochmals deutlich.

Tabelle 53 Simulierte langjährige mittlere Restdurchsickerungsmengen der Varianten – Vergleich zwischen normalen/extremen Nass- und Trockenjahren

Variante	Mittleres Jahr	Normales Nassjahr	Extremes Nassjahr [mm/a]	Normales Trockenjahr	Extremes Trockenjahr
70cm-0Vol%KSK	142	189	353	42	5
70cm-50Vol%KSK	59	130	239	0	0
70cm-75Vol%KSK	54	123	235	0	0
100cm-0Vol%KSK	126	188	341	15	0
100cm-50Vol%KSK	35	83	204	0	0
100cm-75Vol%KSK	31	71	191	0	0

Die Betrachtung der durchschnittlichen Restdurchsickerungsmengen bezugnehmend auf die monatlichen Werte in Abbildung 34 lieferte eindeutige Erkenntnisse und liess die sommerliche Ausnutzung der Niederschläge durch die Vegetation und die winterliche Auswaschungsperiode bei allen untersuchten Varianten erkennen. Gerade in den Monaten von November bis März waren sehr hohe Sickerwassermengen bei den Nullvarianten zu erwarten, wobei die geringere Mächtigkeit sich negativ zeigte. Bei den KSK-Varianten war von Mai bis Oktober kaum mit einer Sickerwasserbildung zu rechnen.

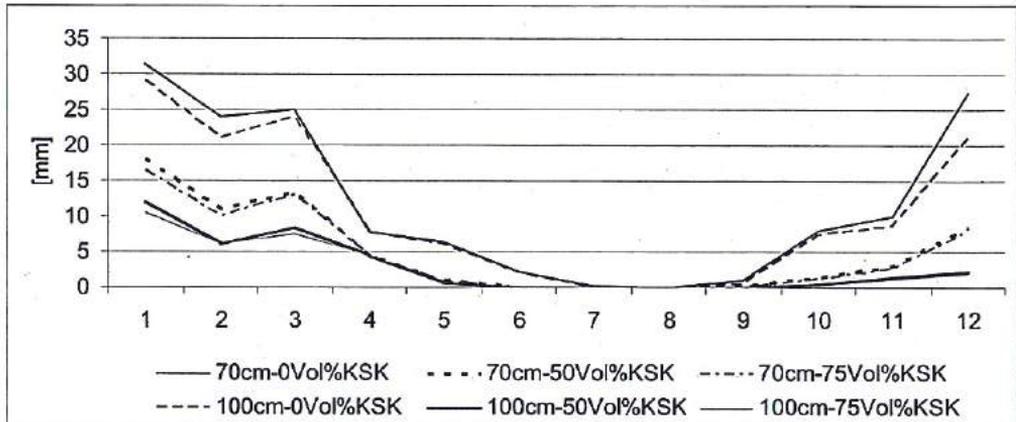


Abbildung 34 Simulierte langjährige mittlere Restdurchsickerungsmengen der Varianten im Jahresverlauf

Zusätzlich wurden die sommerlichen Trockenstresssituationen geprüft und in Tabelle 54 dargestellt. Als kritisch wurden Wassergehalte unterhalb des PWP erachtet. Durch die sehr hohen nFK-Werte der KSK-Varianten konnte der Vegetation auch bei sommerlicher Trockenheit genügend Wasser zur Verfügung gestellt werden. Bei den Nullvarianten wirkte sich die durch das spärliche Bewuchsverhalten hervorgerufene geringe Verdunstungsleistung in wenigen Austrocknungstagen aus. Eine höhere Mächtigkeit der Kulturschicht kann die Vegetation länger mit Wasser versorgen.

Tabelle 54 Häufigkeit des Austrocknungsverhaltens der Varianten

Variante	Häufigkeit	
	Anzahl Tage in 20 Jahren	% der Sommertage
70cm-0Vol%KSK	113	1,6
70cm-50Vol%KSK	158	2,2
70cm-75Vol%KSK	122	1,7
100cm-0Vol%KSK	60	0,8
100cm-50Vol%KSK	96	1,3
100cm-75Vol%KSK	56	0,8

4.3.3 Sickerwassermengen und -qualitäten

Untersuchte Parameter waren $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, pH-Wert, LF, Cl und Schwermetalle. In den dargestellten Diagrammen sind die Konzentrationen als Mittelwerte in Halbjahreszeiträumen erfasst. Die zugehörigen statistischen Analysen (deskriptive Statistik und Tukey-Test) befinden sich für beide Versuchsanlagen in Anlage 27 bis Anlage 41. Des Weiteren wurden bei Versuch 2 zusätzlich die Sickerwassermengen bei Einsatz der unterschiedlichen Substrate sowie Fruchtarten ausgewertet.

4.3.3.1 Versuch 1

N_{min}-Konzentrationen

Im ersten Zeitabschnitt fiel die Variante mit 70cm-50Vol%KSK durch sehr hohe **NO₃-N**-Konzentrationen mit durchschnittlich 396 bis 827 mg/l bei allen angebauten Fruchtarten auf (Abbildung 35). Signifikante Unterschiede wurden bei dieser Variante von Feld 1 und 2 zu allen anderen KSK-Varianten und Mächtigkeiten festgestellt. Alle anderen Varianten lagen im Durchschnitt unter einer Konzentration von 306 mg/l. Weiterhin gab es statistisch gesicherte Differenzen zwischen 70cm-75Vol%KSK-F2/F3 und den Nullvarianten. Bei den 100 cm mächtigen Varianten konnte nur bei der Variante 100cm-50Vol%KSK-F3 ein Unterschied zu den Nullvarianten nachgewiesen werden. Dies machte deutlich, dass sich in diesem Zeitraum eine höhere Schichtmächtigkeit positiv auf die NO₃-N-Gehalte durch eine verzögerte Auswaschung bemerkbar machte. Aus den Nullvarianten wurde im gesamten Zeitraum kaum NO₃-N ausgetragen. Die Werte lagen während des gesamten Versuchszeitraumes unter 50 mg/l.

Während des zweiten Zeitabschnittes fielen die Varianten 100cm-75Vol%KSK-F2/F3 auf. Es konnten durchschnittliche NO₃-N-Konzentrationen von 349 bis 370 mg/l festgestellt werden. Grund hierfür waren NO₃-N-Konzentrationen von durchschnittlich 600 mg/l im 4. Halbjahr. Demzufolge wurden statistische Unterschiede gegenüber allen anderen Varianten nachgewiesen. Das Feld 1 dieser Variante lag mit 66 mg/l hingegen deutlich darunter. Darüber hinaus gab es Differenzen zwischen den Nullvarianten und 70cm-75Vol%KSK-F2 (179 mg/l). Die NO₃-N-Konzentrationen der weiterhin untersuchten KSK-Varianten bewegten sich zwischen 36 und 117 mg/l. Es ließ sich demzufolge eine deutliche Verringerung der Konzentrationen über den Zeitraum auch statistisch belegen. Zum Ende des Versuches lagen alle Konzentrationen unter 200 mg/l.

Eine Abhängigkeit von der angebauten Kultur konnte mit Hilfe der Statistik im ersten Zeitraum nicht herausgestellt werden, obwohl sich andeutete, dass der auf Feld 1 im ersten Jahr angebaute Senf die NO₃-N-Konzentrationen reduzierte.

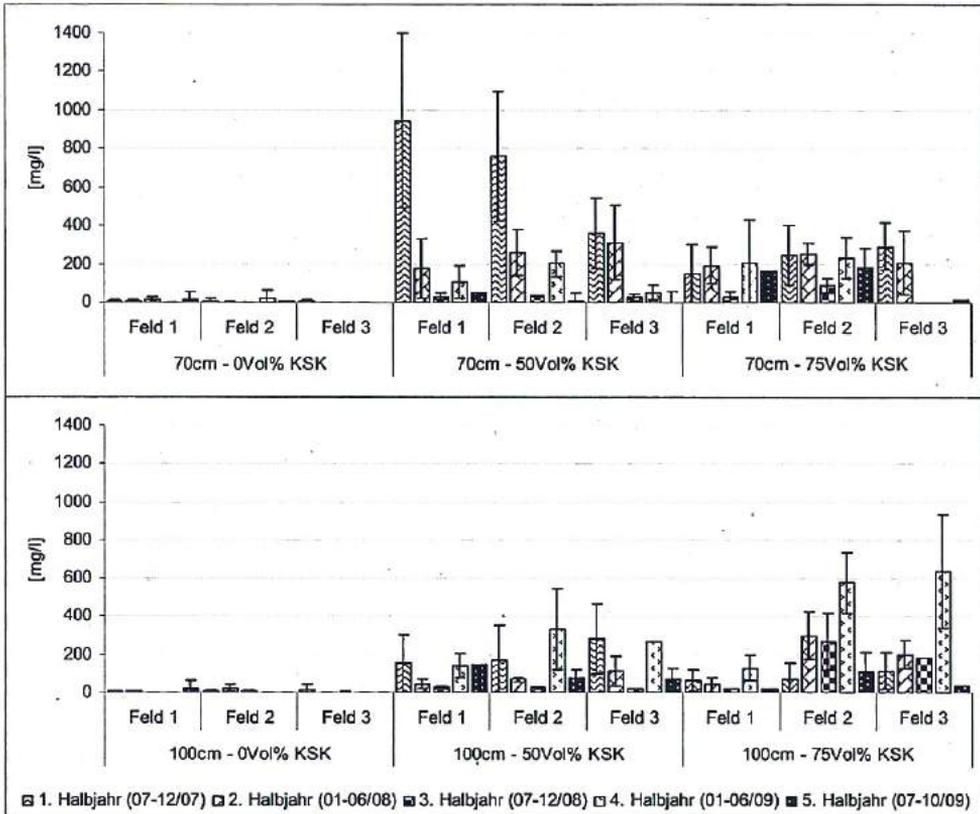


Abbildung 35 Verlauf der NO₃-N-Konzentrationen im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1)

Aus der Abbildung 36 geht hervor, dass bei allen Varianten nur innerhalb des ersten Jahres relevante NH₄-N-Gehalte im Sickerwasser vorlagen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Bei der Betrachtung vernachlässigbar waren die durch geringe Konzentrationen auffallenden Nullvarianten. Während bei einer Mächtigkeit von 70 cm und einer Zumischung von 50 Vol% KSK NH₄-N in Größenordnungen bis maximal 90 mg/l im Sickerwasser gefunden wurde, waren dies bei den anderen Zumischungen und Mächtigkeiten anfänglich über 200 mg/l. Die höchsten Konzentrationen wurden bei der größten Mächtigkeit von 100 cm und höchsten Zumischung von 75 Vol% KSK gemessen. Generell konnte festgestellt werden, dass eine Zumischung von 75 Vol% KSK im ersten Zeitraum bis Juni 2008 höhere Konzentrationen an NH₄-N als 50 Vol% KSK im Sickerwasser nach sich zog. Dies konnte auch statistisch belegt werden. Die Varianten 70cm-75Vol% KSK-F1/F2 (449 bzw. 395 mg/l) und 100cm-75Vol% KSK-F1/F2/F3 (249/437/361 mg/l) besaßen signifikante Unterschiede zu den Nullvarianten und 70cm-50Vol%KSK-F1/F2. Hingegen erreichte 70cm-75Vol%KSK-F3 mit 175 mg/l vergleichsweise geringere Konzentrationen. Es wurde deutlich, dass sich 70cm-50Vol%KSK nicht signifikant von den Nullvarianten unterschied. Die durchschnittlichen Konzentrationen lagen in einem niedrigen Bereich zwischen 13 und 48 mg/l. Die Variante 100cm-50Vol%KSK nahm mit Werten zwischen 108 und 248 mg/l eine Mittelposition ein. Im Vergleich der unterschiedlichen Fruchtarten konnte kein eindeutiger Trend ausgemacht werden. Die KSK-

Zumischungsverhältnisse und Mächtigkeiten übten prägnanteren Einfluss aus. Eine dauerhafte Begrünung führte im ersten Jahr zu einer Abnahme der Konzentrationen bei den Varianten 70cm-75Vol%KSK und 100cm-50Vol%KSK, dies konnte allerdings für 100cm-75Vol% KSK nicht bestätigt werden. Im zweiten Untersuchungszeitraum fiel nur die Variante 100cm-50Vol% KSK mit durchschnittlichen Werten von 26 mg/l auf. Bei allen anderen Varianten wurden nur durchschnittliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen zwischen 0,17 und 5,6 mg/l gemessen. Dies führte zu keinen statistischen Unterschieden.

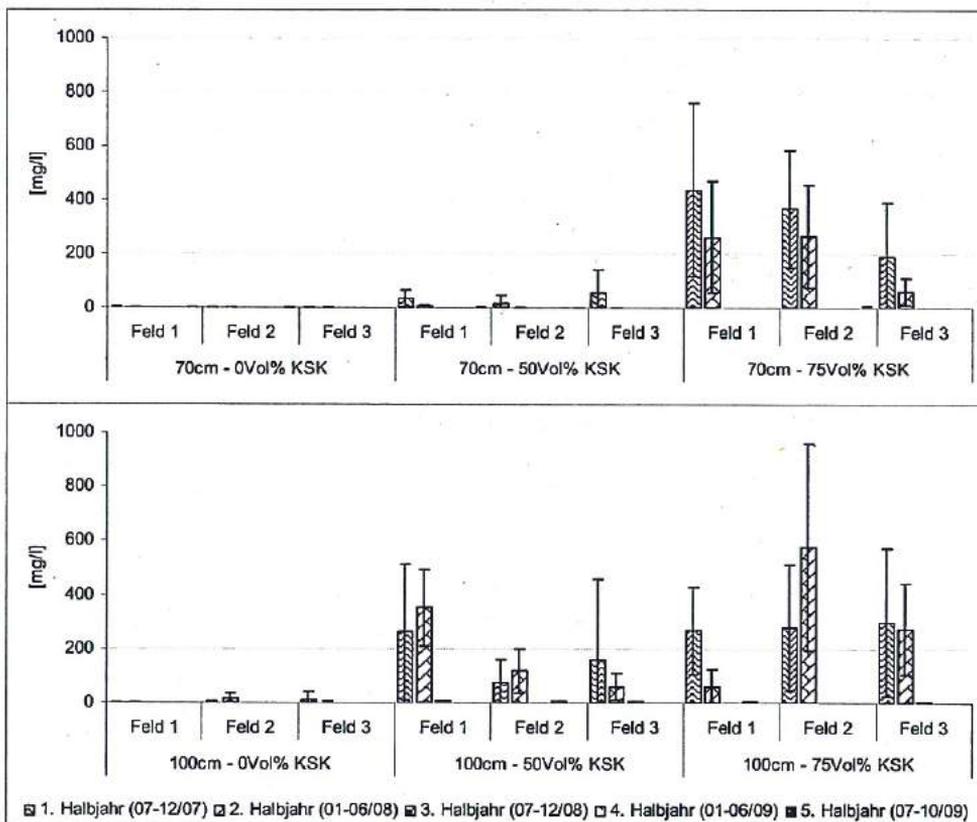


Abbildung 36 Verlauf der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1)

Die höchsten durchschnittlichen N_{min} -Konzentrationen im ersten Jahr besaßen folglich die 70 cm-Varianten mit Werten zwischen 443 und 851 mg/l (50 Vol% KSK) bzw. 480 und 664 mg/l (75 Vol% KSK). Die mächtigeren Varianten hatten deutlich geringere N_{min} -Austräge in einem Bereich von 241 bis 561 mg/l vorzuweisen. Dabei unterschieden sich die Zumischungen von 50 und 75 Vol% KSK nicht voneinander. Ein deutlich verändertes Bild zeigte sich bei Betrachtung der 70 cm mächtigen KSK-Varianten ab dem zweiten Untersuchungszeitraum. Bei der Variante 70cm-50Vol%KSK lagen die durchschnittlichen N_{min} -Konzentrationen zwischen 36 und 100 mg/l, während eine höhere Zumischung mit teilweise höheren Gehalten im Bereich von 18 bis 180 mg/l einher ging. Die mächtigeren Varianten ließen mit steigender KSK-Gabe höhere N_{min} -Auswaschungen erkennen. Während die 50 Vol%-Sickerwassersammler bei 106 bis 139 mg/l lagen, stieg der N_{min} -Austrag bei einer

Zumischung von 75 Vol% auf Feld 2 (352 mg/l) und 3 (375 mg/l) durch einen Mineralisierungsschub im vierten Halbjahr an. Zum Ende des Versuches lagen jedoch alle untersuchten N_{\min} -Konzentrationen der Varianten auf einem Niveau unter 200 mg/l.

N_{\min} -Frachten

Die N_{\min} -Frachten wurden auf Grundlage von Sickerwassermengen, die mit Hilfe des Modells BOWAHALD berechnet wurden, bestimmt sowie durch zusätzlich eingebrachte Sickerwassersammler am Standort gemessen.

Mit dem Modell BOWAHALD wurden lediglich die Sickerwassermengen für die Sickerwassersammler mit Grasbewuchs berechnet. Aus Tabelle 55 geht hervor, dass sich eine Mächtigkeit von einem Meter positiv auf die Minimierung des $\text{NO}_3\text{-N}$ -Austrages auswirkte. Bei den 70 cm mächtigen Varianten wurden mit über 200 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ / ha innerhalb von zweieinhalb Jahren die höchsten Mengen ausgetragen. Die Variante 100cm-75Vol%KSK hatte im Vergleich nur eine Fracht von 54 kg/ha. Die Nullvarianten wiesen aufgrund geringer $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen die niedrigsten Austräge auf.

Bei Betrachtung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten fiel auf, dass aus den Grasvarianten 70cm-0Vol%KSK, 70cm-50Vol%KSK und 100cm-0Vol%KSK kaum $\text{NH}_4\text{-N}$ mit dem Sickerwasser ausgetragen wurde. Die Versuchsanlage 100cm-50Vol%KSK lag mit einer Fracht von 27 kg/ha innerhalb von 2 Jahren in einem niedrigen Bereich. Die höchsten Werte wiesen die Zumischungen von 75 Vol% KSK auf, wobei eine Mächtigkeit von 100 cm die Fracht nochmals deutlich steigerte. Im Vergleich dazu war es möglich, aufgrund neu angelegter Sickerwassersammler im April 2009 die N_{\min} -Frachten direkt zu bestimmen. Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen lagen bei der Variante 70cm-50Vol%KSK mit durchschnittlich 154,7 mg/l im einjährigen Versuchszeitraum am höchsten, gefolgt von der Zumischung von 75 Vol% KSK (Anlage 37). Die 100 cm mächtigen Varianten lagen hingegen zwischen 78,0 und 93,1 mg/l. Da die Sickerwassermengen korrekt bestimmt wurden, war es möglich, die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten auszuwerten. Innerhalb eines Jahres wurden 41,6 kg/ha (70cm-50Vol%KSK) bzw. 61,7 kg/ha (70cm-75Vol%KSK) ausgetragen. Eine höhere Mächtigkeit machte sich mit geringeren Sickerwassermengen bemerkbar. Somit konnten auch die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten im Vergleich zur geringer mächtigen Variante auf 18,6 kg/ha (100cm-50Vol%KSK) und 19,4 kg/ha (100cm-75Vol%KSK) reduziert werden. Bezüglich des $\text{NH}_4\text{-N}$ ließen sich bei allen Varianten nur geringe Konzentrationen bis maximal 7,3 mg/l (70cm-50Vol%KSK) im Sickerwasser nachweisen. Die Werte der 70 cm mächtigen Varianten lagen geringfügig über denen der 100 cm Sickerwassersammler. Demzufolge waren die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten äußerst gering. Die Frachten der Nullvarianten überstiegen durch höhere Sickerwassermengen diejenigen der KSK-Varianten.

Da die Versuchszeiträume unterschiedlich waren, ist ein Vergleich der absoluten Höhe der berechneten und gemessenen Austräge nicht möglich. Eine Aussage bezüglich der Varianten konnte jedoch getroffen werden. In beiden Fällen wurde deutlich, dass eine Mächtigkeit von 1 m den N_{\min} -Austrag reduzierte. Weiterhin zeigte sich bei einer höheren Zumischung an KSK eine steigende Fracht.

Tabelle 55 NO₃-N und NH₄-N-Frachten des Sickerwassers bei Energiegrasanbau im Vergleich gemessener sowie modellierter Werte (Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	berechnet (BOWAHALD)		gemessen	
		Juli 2007 - Oktober 2009		April 2009 - März 2010	
		NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N
		[kg/ha]			
70	0	11,7	0,9	20,7	1,5
70	50	278,5	1,2	41,6	0,5
70	75	216,7	63,3	61,7	1,4
100	0	22,8	1,6	4,4	3,1
100	50	45,4	27,3	18,6	0,4
100	75	53,6	148,3	19,4	1,0

pH-Werte

Um die Schwankungen der pH-Werte in den zweieinhalb Versuchs Jahren zu verdeutlichen, werden die niedrigsten (1. Versuchszeitraum) und höchsten (2. Versuchszeitraum) Werte der Mittelwertvergleiche im Folgenden aufgelistet: 70cm-50Vol%KSK (7,4-8,5), 70cm-75Vol%KSK (7,8-8,5), 100cm-50Vol%KSK (7,7-8,6), 100cm-75Vol%KSK (7,9-8,3). Es wurden somit pH-Wert-Anstiege deutlich (Abbildung 37). Im 3. Halbjahr konnte bei allen KSK-Varianten ein pH-Wert Maximum festgestellt werden, danach fielen die gemessenen Werte wieder leicht ab, erreichten allerdings nicht das Ausgangsniveau. Eine Ausnahme bildete die Variante 100cm-75Vol%KSK. Die Werte der Nullvarianten unterlagen im Versuchszeitraum nicht den Schwankungen wie dies bei den mit KSK versetzten Varianten ersichtlich war. Die Werte bei 100cm-0Vol%KSK lagen im gesamten Versuchszeitraum durchschnittlich zwischen 7,51 und 7,75. Die Nullvarianten der 70cm Varianten lagen im ersten Zeitraum demgegenüber um 0,2 bis 0,3 erhöht, glichen sich jedoch nach einem Jahr an. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten im ersten Jahr wiesen 70cm-50Vol%KSK-F1/F2 (geringste pH-Werte) im Gegensatz zu 70cm-75Vol%KSK-F1/F2 und 100cm-75Vol%KSK-F1/F2 (höchste pH-Werte) auf. Ab Juli 2008 waren nur noch signifikante Unterschiede der KSK-Varianten zu den Nullvarianten ersichtlich.

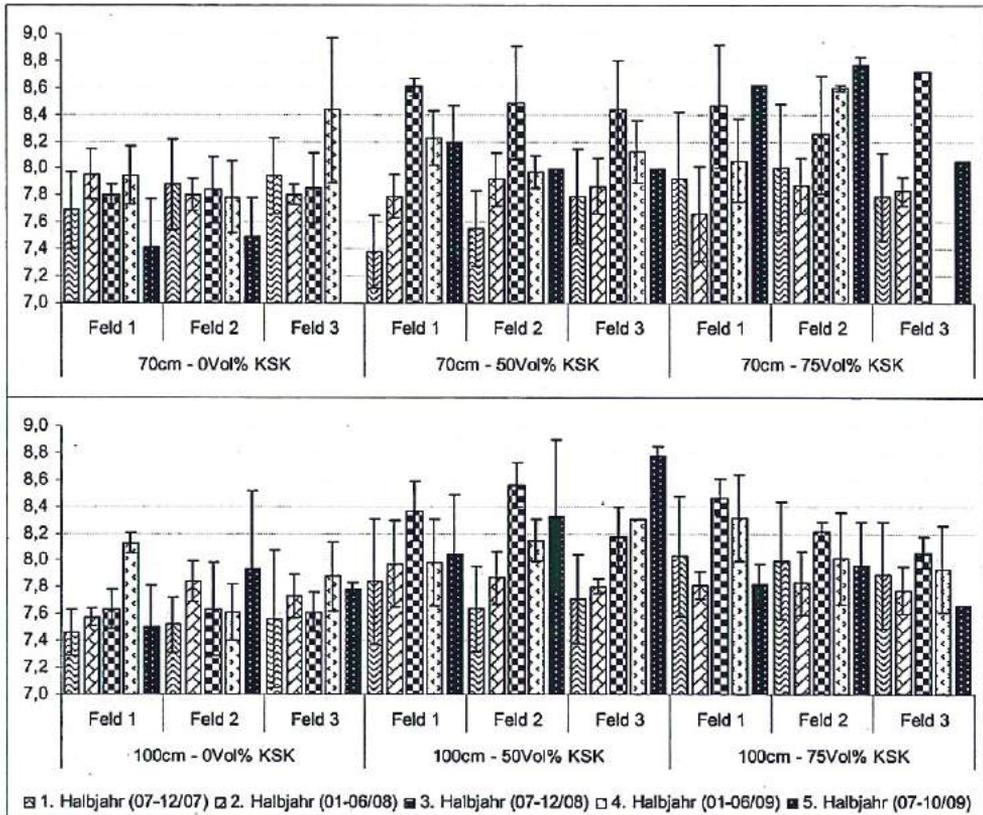


Abbildung 37 Verlauf der pH-Werte im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1)

Elektrische Leitfähigkeit

In Abbildung 38 sind die gemessenen Elektrischen Leitfähigkeiten über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt. Die absolut höchsten LF über den ersten Zeitraum wies die Variante 100cm-75Vol%KSK mit 17,8 mS/cm auf Feld 3 auf. Dennoch bewegten sich auch die restlichen KSK-Varianten in einem sehr hohen Bereich zwischen 8,5 und 14 mS/cm. Die Nullvarianten wiesen die geringsten Leitfähigkeiten über die gesamte Zeit mit <3 mS/cm auf. Im ersten Jahr waren bis auf 100cm-50Vol%KSK-F2/F3 signifikante Unterschiede zwischen den KSK-Varianten und den Nullvarianten feststellbar. Ab dem zweiten Versuchsjahr waren Unterschiede zwischen den Mächtigkeiten abzuleiten. Während auf der 70 cm mächtigen Variante die Leitfähigkeit auf unter 5,2 mS/cm sank, konnte nur eine geringfügigere Abnahme bei den 100 cm Varianten festgestellt werden. Wiederum wurde eine Differenzierung der Zumischungshöhe an KSK deutlich. Mit steigender Mächtigkeit und steigender Zumischungshöhe war eine Zunahme der LF zu beobachten. Wiederum war bei der Variante 100cm-75Vol%KSK-F3 die durchschnittlich höchste LF mit 10,9 mS/cm zu beobachten. Dies ließ sich auch anhand des Mittelwertvergleiches bestätigen, da signifikante Unterschiede zu den anderen KSK-Varianten und Mächtigkeiten bestanden. Keine signifikanten Differenzen waren zwischen den Nullvarianten und 70cm-50Vol%KSK auszumachen, während alle anderen KSK-Varianten sich noch signifikant von ihnen

unterschieden. Auf allen Zumischungsflächen konnte im 3. Halbjahr ein Rückgang der LF beobachtet werden, der jedoch von einem Wiederanstieg gefolgt war. Ein Unterschied zwischen den angebauten Fruchtarten war nicht feststellbar. Eindeutig war, dass die LF anfangs auf einem sehr hohen Niveau lagen und im zeitlichen Verlauf zurückgingen.

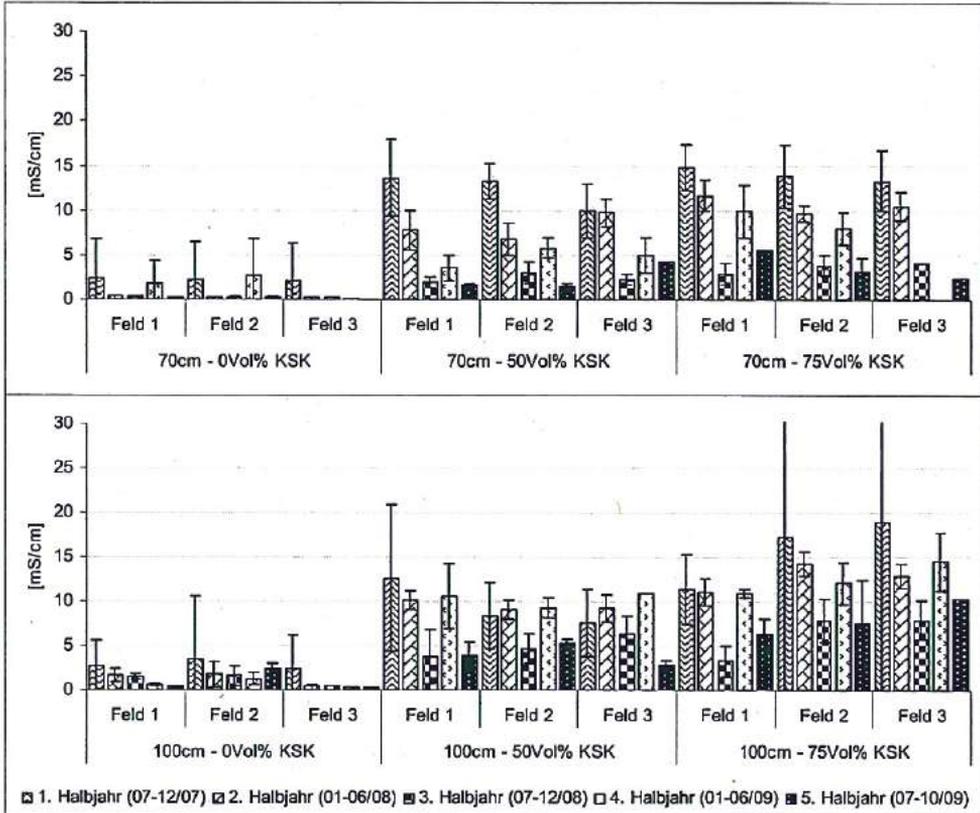


Abbildung 38 Verlauf der Elektrischen Leitfähigkeit im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1)

Chlorid

Die höchsten Cl-Konzentrationen wies die Zumischung von 75 Vol% KSK mit einer Mächtigkeit von 70 cm auf. Es wurden Gehalte von durchschnittlich 1699 mg/l auf Feld 3 erreicht. Damit lagen zum Teil auch signifikante Unterschiede gegenüber einer Zumischung von 50 Vol% KSK vor. Die anderen KSK-Varianten erreichten ebenfalls hohe Werte zwischen 1034 und 1296 mg/l (Abbildung 39). Damit lagen diese signifikant über den Nullvarianten. Während die Werte auf den 70 cm Varianten im 2. Untersuchungszeitraum um mindestens 2/3 abnahmen, konnten auf der mächtigeren Variante immer noch sehr hohe Konzentrationen nachvollzogen werden, die geringfügiger abnahmen. Signifikante Unterschiede wurden besonders bei der Variante 100cm-75Vol%KSK-F3 gegenüber allen Varianten deutlich (Ausnahme: 100cm-50Vol%KSK-F3). Auch bei diesem betrachteten Parameter war es nicht möglich, Unterschiede zwischen den untersuchten Fruchtarten festzustellen.

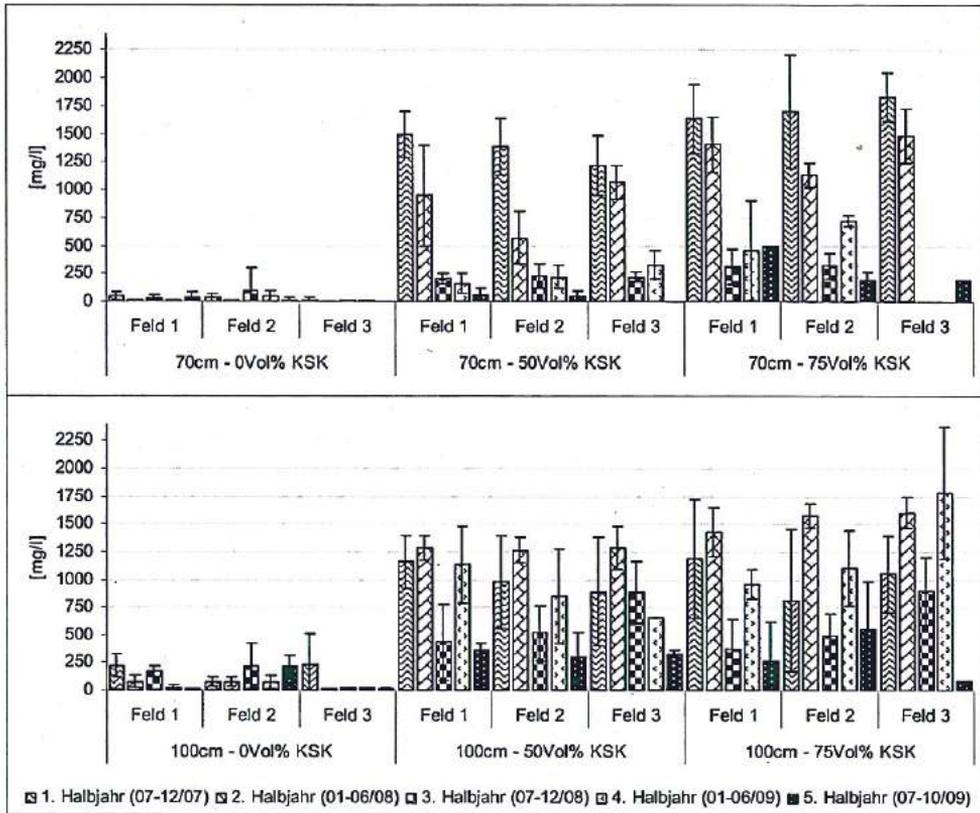


Abbildung 39 Verlauf der Chloridkonzentration im Sickerwasser (halbjährliche Darstellung, Versuch 1)

Schwermetallgehalte

Eine Erhöhung der Schwermetallgehalte im Sickerwasser aufgrund von KSK-Zumischung war bei den Parametern Pb, Cd und Hg nicht festzustellen (Tabelle 56). Ein Einfluss von KSK wurde bei Zn, Ni, Cr und Cu deutlich, besonders Fe fiel mit erhöhten Werten auf. Eine Mächtigkeit von 70 cm wies höhere Schwermetallgehalte als die 100 cm mächtigen Varianten auf. Dabei stieg mit zunehmender Zumischung an KSK die Schadstoffkonzentration an. Die Untersuchung fand einmalig statt.

Tabelle 56 Schwermetallgehalte im Sickerwasser (einmalige Probenahme, Versuch 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Cu	Fe gel.	Hg
					mg/l				µg/l
70	0	<0,01	<0,020	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	0,17	<0,03
70	50	0,05	<0,020	<0,005	0,034	0,0075	0,07	3,22	<0,03
70	75	0,04	<0,020	<0,005	0,056	0,0095	0,11	4,03	<0,03
100	0	0,02	<0,020	<0,005	<0,005	<0,005	0,02	0,27	<0,03
100	50	0,03	<0,020	<0,005	0,035	0,007	0,06	0,46	<0,03
100	75	0,04	<0,020	<0,005	0,038	0,007	0,11	1,51	<0,03

4.3.3.2 Versuch 2

Sickerwassermenge

In der Tabelle 57 sind die kumulierten Sickerwassermengen der einzelnen Varianten nach Fruchtarten im jahreszeitlichen Verlauf über den gesamten Versuchszeitraum aufgezeigt. Der Niederschlag im Untersuchungszeitraum betrug in der Summe 770,4 mm.

Bei Anbau von **Sonnenblume** (2008) und **Raps** (2009) reduzierte KSK50 die Sickerwasserbildung am effektivsten. Die Perkolation lag hier bei 66 mm. KSK75 konnte eine kumulierte Summe von 85 mm erbringen. Die höchsten Mengen konnten bei der Nullv mit 110 mm gemessen werden.

Die dargestellten Sickerwassermengen bei Anbau von **Mais** und **Zuckerhirse** variierten stark zwischen den einzelnen Varianten. Mit 80 mm Sickerwasser konnte wiederum die KSK50-Variante den Niederschlag am besten speichern. Die höchste Sickerwassermenge war bei der Nullvariante zu verzeichnen, wobei jedoch auch die KSK75-Variante hohe Sickerwassermengen von 116 mm zeigte. Mais und Zuckerhirse gehören zu den Pflanzen mit einer späten Entwicklung. Dies spiegelte sich in der Sickerwasserentwicklung wider.

Die KSK-Varianten bei Kultivierung von **Sudangras** und **Sommergerste** minimierten den Sickerwasseranfall im Vergleich zur Nullvariante um mindestens 38 % (KSK50). Nur 95 mm Perkolat hatte die KSK75-Variante zu verzeichnen. Auch in dieser Fruchtfolge war die auswaschungsgefährdete Zeit eindeutig zu erkennen.

Es wird deutlich, dass die Nullvariante von **Hafer** und **Triticale** mit 129 mm die geringste Perkolation aufwies. Bei einem kumulierten Wert von 135 mm lag die KSK50-Variante geringfügig über derjenigen der Nullvariante. Währenddessen wurde bei KSK75 ein Wert von 148 mm bestimmt.

Die **Energiegrasmischung** wies aufgrund des ganzjährigen Bewuchses im Vergleich zu den anderen Fruchtarten mit maximal 83 mm bei der Nullvariante die geringsten Sickerwassermengen auf. Auch zu Beginn des Versuches waren die Sickerwassermengen minimal. Die Zumischung KSK50 zeigte in der Summe die geringsten Mengen von 39 mm, auch die kumulierte Sickerwassermenge von KSK75 in Höhe von 57 mm lag ebenfalls in einem niedrigen Bereich.

Tabelle 57 Kumulierte Sickerwassermenge der Varianten (Versuch 2)

Fruchtart		Mai - Jul	Aug - Okt	Nov 2008 -	Feb - Apr	Apr - Aug
		2008	2008	Jan 2009	2009	2009
		[mm]				
Sonnenblume - Raps (F1)	Nullv	3	8	54	98	110
	KSK50	0	0	27	59	66
	KSK75	1	5	31	74	85
Mais - Zuckerhirse (F2)	Nullv	34	56	109	165	182
	KSK50	27	27	38	71	80
	KSK75	37	51	66	106	116
Sudangras - Sommergerste (F3)	Nullv	8	26	85	148	164
	KSK50	0	5	47	91	101
	KSK75	2	6	35	81	95
Hafer - Triticale (F4)	Nullv	0	14	64	115	129
	KSK50	0	0	63	122	135
	KSK75	4	17	81	138	148
Energiegras (F5)	Nullv	1	4	26	71	83
	KSK50	15	15	22	29	39
	KSK75	1	2	19	49	57

Es wurde deutlich, dass die Varianten der Zumischung auf die Sickerwassermenge einen geringeren Einfluss als die angebauten Fruchtarten ausübten. Hier konnte als positiv die Energiegrasmischung herausgestellt werden, die auf allen Varianten die geringsten Sickerwasserausträge aufwies. Die Menge konnte im Vergleich zum Sudangras – Sommergerste Anbau meist um die Hälfte reduziert werden. Jedoch war festzustellen, dass es Unterschiede im Pflanzenaufwuchs der Varianten gab. Auf den Nullvarianten wurden generell geringere Wuchshöhen gemessen, die sich in der Verdunstungsleistung der Pflanzen bemerkbar machten. Über die Varianten hinweg betrachtet konnte folgende Sickerwasseraustragsreihe festgehalten werden: Energiegrasmischung < Sonnenblume / Raps < Sudangras / Sommergerste < Mais / Zuckerhirse < Hafer / Triticale (Tabelle 58). Bei Betrachtung der Variantenunterschiede fielen die positiven physikalischen Eigenschaften der KSK mit hohen FK ins Gewicht. Dies wirkte sich v.a. bei einer Zumischung von 50 Vol% aus. Bei einer höheren Zumischung konnte es durch die groben Bestandteile im Kompost verstärkt zu präferentiellen Flüssen kommen, die das Sickerwasservolumen erhöhten. Starke Niederschläge von Oktober bis Dezember ließen bei allen Varianten einen schnellen Anstieg des Sickerwasseranfalls erkennen. Bei Betrachtung des in dieser Zeit von 16 Monaten gefallenen Niederschlages von 770,4 mm wurden somit maximal 182,4 mm (23,7 %) von der Nullvariante mit Anbau von Mais-Zuckerhirse – F2 und minimal 38,7mm (5,0 %) von der Variante KSK50 mit Anbau von Grasmischung – F5 ausgetragen.

Tabelle 58 Kumulierte Sickerwassermengen innerhalb von 16 Monaten (Mai 2008 bis August 2009, Versuch 2)

	Nullv	KSK50	KSK75	Mittelwert
		[mm]		
Sonnenblume - Raps (F1)	110,4	66,4	84,6	87,1
Mais - Zuckerhirse (F2)	182,4	80,4	116,2	126,3
Sudangras - Sommergerste (F3)	163,9	100,8	95,4	120,0
Hafer - Triticale (F4)	128,6	134,7	148,4	137,2
Energiegras (F5)	83,4	38,7	56,7	59,6
Mittelwert	133,7	84,2	100,3	

*Sickerwasserqualität**N_{min}-Konzentrationen*

Die höchsten durchschnittlichen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen wiesen die Varianten KSK50-F4 mit 737 mg/l und KSK50-F5 mit 660 mg/l auf (Anlage 39). Hier lagen statistisch signifikante Unterschiede gegenüber allen Nullvarianten vor (Anlage 40 und Anlage 41). Bei KSK50-F4 konnte dies zusätzlich für KSK50-F2 bewiesen werden. Um den zeitlichen Konzentrationsverlauf der KSK-Zumischung besser beurteilen zu können, wurden alle Fruchtarten einer Variante zusammen betrachtet. Anfänglich besaß die Variante KSK75 die höchsten Konzentrationen mit 604 mg/l. Nach viermonatiger Versuchsdauer lagen bei allen Varianten die Konzentrationen unter 450 mg/l. Allerdings konnte innerhalb des Versuchszeitraumes von einem Jahr keine stete Abnahme der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen bei den untersuchten Varianten nachgewiesen werden, weil die Schwankungen im jahreszeitlichen Verlauf die gemessenen Werte zu stark beeinflussten. Um Aussagen hinsichtlich der Fruchtart liefern zu können, wurden die Mittelwerte betrachtet. Bei den KSK-Varianten fiel auf, dass jeweils die Fruchtart 2 (Mais-Zuckerhirse) die geringsten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Austräge besaß, während Fruchtart 4 (Hafer-Triticale) bei KSK50 die höchsten Konzentrationen im Sickerwasser hatte. Es war demzufolge eine gewisse Abhängigkeit von der Fruchtart gegeben, die jedoch statistisch nicht belegt werden konnte.

Im Vergleich zu den $\text{NO}_3\text{-N}$ -lagen die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser auf bedeutend niedrigerem Niveau (Anlage 39) und erreichten bei den KSK-Varianten durchschnittliche Werte von 1,1 mg/l bis 4,3 mg/l. Die Nullvariante konnte maximale Konzentrationen von 1,3 mg/l vorweisen. Bei den untersuchten Varianten ließen sich keine statistischen Unterschiede feststellen. Ein Einfluss der angebauten Fruchtarten konnte nicht bewiesen werden.

Die höchsten durchschnittlichen N_{min} -Konzentrationen besaßen folglich zu Beginn die Varianten KSK75 mit über 600 mg/l, gefolgt von den KSK50-Varianten. Der Hauptteil des N_{min} wurde in Form von $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgewaschen. Zum Ende des Versuches wurden Konzentrationen in allen Varianten unter 450 mg/l ermittelt. Eine deutliche Abnahme war somit innerhalb eines Jahres nicht zu verzeichnen.

N_{min}-Frachten

Die mit dem Sickerwasser ausgetragenen NO₃-N-Frachten waren bei den KSK50 und KSK75 Varianten und dem Anbau von Hafer / Triticale am höchsten, da diese Fruchtarten hohe Sickerwassermengen besaßen (Tabelle 59). Unter Nutzung der Variante KSK50 mit dem Anbau von Energiegras ließ sich die Fracht deutlich reduzieren und war folglich mit den Frachten der Nullvariante vergleichbar. Bei Anbau von Sonnenblume / Raps fiel auf, dass trotz enormer Reduzierung der Sickerwassermenge die NO₃-N Fracht höher war als bei Mais / Zuckerhirse und Sudangras / Sommergerste. Aus der Nullvariante wurden mit 22 kg/ha die geringsten NO₃-N-Mengen ausgetragen.

Aus den unterschiedlichen Varianten wurde wie im vorangegangenen Abschnitt und aus Tabelle 59 ersichtlich, kaum NH₄-N ausgetragen. Die Austräge der KSK-Varianten lagen in einem Bereich zwischen 0,6 und 3,3 kg/ha. Auffällig waren die höheren Frachten bei Anbau von Mais / Zuckerhirse. Die NH₄-N-Frachten stellten somit kein Problem hinsichtlich einer Umweltbelastung dar.

Die geringsten N_{min}-Frachten in 16 Monaten wurden somit aus der Variante KSK50 mit 26 kg/ha mit Energiegrasbewuchs ausgetragen. Durch den ganzjährigen Grasbewuchs wurden die Frachten durch verringerte Sickerwassermenge reduziert. Unabhängig von der Fruchtart konnte folgende Reihenfolge für die durchschnittlichen N_{min}-Frachten festgestellt werden: Nullv < KSK75 < KSK50, wobei festzuhalten ist, dass die Unterschiede zwischen KSK50 und KSK75 minimal waren.

Tabelle 59 NO₃-N, NH₄-N-Frachten der Varianten nach angebauten Fruchtarten (Versuch 2)

	NO ₃ -N			NH ₄ -N		
	Nullv	KSK50	KSK75	Nullv	KSK50	KSK75
	[kg/ha]					
Sonnenblume - Raps (F1)	9,9	276,0	329,7	0,4	0,6	2,8
Mais - Zuckerhirse (F2)	44,7	166,4	193,6	7,1	3,3	3,3
Sudangras - Sommergerste (F3)	19,9	223,9	189,4	0,6	2,6	1,8
Hafer - Triticale (F4)	10,8	884,9	529,6	0,3	1,4	2,2
Energiegras (F5)	22,4	25,3	217,8	0,3	0,8	1,3
Mittelwert	21,5	315,3	292,0	1,7	1,8	2,3

pH-Werte

Die pH-Werte der KSK-Varianten bewegten sich in den folgenden Bereichen: bei KSK50 (7,4 – 8), bei KSK75 (7,6 – 8,0) und die Nullvariante (7,7 – 8,2). Bei der Betrachtung des zeitlichen Verlaufes war bei den KSK-Sickerwässern eine Tendenz des pH-Wert-Anstieges zu erkennen (Anlage 39). Hinsichtlich der Fruchtarten konnte statistisch kein Unterschied belegt werden. Auffällig war nur, dass jeweils die Sickerwassersammler mit Energiegrasanbau die geringsten pH-Werte der Varianten aufwiesen.

Leitfähigkeit

Die KSK50-Variante besaß Leitfähigkeiten von 5,9 bis 10,6 mS/cm (Anlage 39). Die Nullvarianten erreichten Werte zwischen 1,0 und 7,7 mS/cm.

4.3.3.3 Diskussion

Die Angaben über Sickerwassermengen und Qualitätsparameter von N, Cl, pH-Werten, LF und Schwermetallen in Sickerwässern bei Verwendung von KSK sind unvollständig und schwer vergleichbar. Aus diesem Grund werden zum Vergleich KS und Abfallkomposte in die Auswertung einbezogen. Auch finden sich häufig nur geringe Einsatzmengen an KSK oder KS, die nicht mit den eigenen Zumischungsverhältnissen vergleichbar sind. Die in Versuch 1 ermittelten Konzentrationsbereiche, gerade in Bezug auf N_{\min} , lagen somit meist deutlich über den in der Literatur gefundenen Angaben. In der folgenden Literaturrecherche werden anfänglich Untersuchungen mit einem hohen Einsatz an KSK betrachtet, folgend diejenigen mit geringen Einsatzmengen.

Bei einem Jahresniederschlag von 850 mm konnten LIEBHARD et al. (2004) bei Bewuchs mit einer Gräsermischung, 70 cm Mächtigkeit und einer Zumischung von 40 % KSK innerhalb von vier Jahren einen Sickerwasseranfall von circa 300mm beobachten, der sich auf ca. 380 mm bei einer höheren Zumischung von 60 % KSK steigerte. Mit steigendem Kompostanteil verringerte sich jedoch die nFK. NO_3 -N-Konzentrationen in Höhe von 126 mg/l im Frühjahr und 565 mg/l bei Zumischung von 40 %KSK im Herbst wurden festgestellt. Diese Konzentrationen erhöhten sich auf 214 mg/l (Frühjahr) und 903 mg/l (Herbst) bei Nutzung von 60 % KSK. Die EL betragen circa 0,3 mS/cm (40 % KSK) und 0,33 mS/cm (60 % KSK) nach einer Versuchsdauer von 2 Jahren. Es wurde bei Zumischung von 40 % KSK unterstellt, dass keine zusätzliche Belastung des Deponiesickerwassers im Vergleich zum Ackerboden auftrat (LIEBHARD und WRIESSING 2005).

Ähnliche Untersuchungen sind von GOMISCEK (1999) bekannt. Sie wies für KSK als Rekultivierungsmaterial höhere Wasserspeicherfähigkeiten als für Biokompost nach. Allerdings waren kaum Unterschiede zwischen einer Zumischung von 40 und 60 % KSK zu verzeichnen. Der Anbau von Gras zeigte auch hier den geringsten Sickerwasseraustrag. Bei einer Schichtmächtigkeit von 70 cm und KSK-Einsatz wurde die Sickerwassermenge um 50 % (Brache) und 90 % (mit Bewuchs) reduziert. Um eine hohe Sickerwasserminimierung zu erreichen, sollte das Gras ab Spätsommer nicht mehr geschnitten werden. Es war ebenso ein tendenzieller Anstieg der pH-Werte im zeitlichen Verlauf zu beobachten: 7,5 - 7,8 (Anfang der Untersuchung) und 7,8 - 8,2 (Ende der Untersuchung). Die LF sanken bei Zumischung von 60 % KSK von 8 mS/cm auf 2 mS/cm. Die Auswaschung von N erfolgte vorrangig als NO_3 -N und N_{org} . Für die Zumischung von 40 % KSK wurden jährliche NO_3 -N-Austräge von 13,1 kg/ha und bei höherer Zumischung 18,9 kg/ha angegeben. Nach zwei Jahren, so wurde auch hier konstatiert, war mit keiner zusätzlichen Belastung des Deponiesickerwassers mehr zu rechnen.

Auch TAUCHNITZ (2006) beschäftigte sich mit dem Einsatz von KSK im Landschaftsbau. Er wies bei einer Schichtmächtigkeit von 100 cm und einer Zumischung von 50 Vol% KSK zu einem St2 innerhalb eines Jahres Sickerwassermengen von 4 mm (begrünt) und 47 mm (unbegrünt) bei einem Niederschlag von 475 mm nach. Die NO_3 -N-Konzentrationen

bewegten sich im Fall der unbegrünten Variante anfangs auf einem sehr hohen Niveau von 3497 mg/l. Nach zwei Jahren wurden noch Werte von 573 mg/l erzielt. Damit lag die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Fracht innerhalb von knapp zwei Jahren bei 603 kg/ha. Durch einen Bewuchs mit Weidelgras wurden nur noch 27 kg/ha ausgetragen. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen bewegten sich demgegenüber auf deutlich niedrigerem Niveau und erreichten maximale Werte von 0,66 mg/l. Es wurde somit nur eine Fracht von 0,19 kg/ha im gesamten Untersuchungszeitraum nachgewiesen.

Untersuchungen zur Rekultivierung von Kalirückstandshalden mit Hilfe von KSK und KS sind von LÜCKE (1997) bekannt. Er setzte KSK bzw. KS bis 400 t/ha ein. Die verwendeten Kompostmengen konnten die Wasserrückhaltefähigkeit des Standortes jedoch nicht ausreichend verbessern. Bei Lysimeteruntersuchungen wurden anfänglich $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationen von maximal 345 mg/l bei einer Gabe von 200 t/ha festgestellt. Ab dem zweiten Jahr lagen sie unter 2 mg/l. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration wurde mit maximal 73 mg/l und einem Rückgang auf unter 0,1 mg/l nach einem Jahr angegeben. Cl zeigte eine schnelle Auswaschung. Auch die Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser waren erhöht, jedoch nicht bedenklich.

LIEBMANN et al. (2004) untersuchten den Einsatz von Rekultivierungssubstraten (KSK, Papierschlamm, Boden) bei einer Mächtigkeit von 50 cm hinsichtlich des Schwermetallaustrages und der N-Komponenten. N_{\min} lag zu Beginn des Feldversuches hauptsächlich als $\text{NH}_4\text{-N}$ vor. Nach drei Monaten war eher ein Austrag von $\text{NO}_3\text{-N}$ zu beobachten. Theoretisch wurde die Auswaschungsfahrer der N-Parameter als hoch aufgrund geringer Lagerungsdichte und folgend optimaler Sauerstoffversorgung bewertet. Praktisch lagen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte jedoch unter 60 mg/l und $\text{NH}_4\text{-N}$ unter 20 mg/l. Die LF nahmen Werte zwischen 1- 1,9 mS/cm ein. Es wurden folgende SM im Sickerwasser gemessen: Cd: <0,001 mg/l; Cr: 0,001 - 0,005 mg/l; Cu: 0,01 – 0,05 mg/l; Zn: 0,01 – 0,1 mg/l; Ni: 0,005 – 0,001 mg/l; Hg: <0,001 mg/l und Pb: <0,005 mg/l.

Bei Einsatz von 300 kg/ha N als KSK konnten keine $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser über 50 mg/l und keine erhöhten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Werte festgestellt werden. Die Schwermetallgehalte im Sickerwasser betragen 4,1 mg/l Ni; 0,6 mg/l Cr; 5,2 mg/l Pb; 0,75 mg/l Cd und 78,5 mg/l Zn (INSAM und MERSCHAK 1997).

MANTOVI et al. (2005) brachten in einem schluffig lehmigen Boden mit pH-Werten von 7,8 über einen Zeitraum von 12 Jahren 10 t KSK jährlich aus.

Bei KORBOULEWSKY et al. (2002) wird angeführt, dass bereits ab Mengen von 10 t/ha KSK ein Auswaschungsrisiko für $\text{NO}_3\text{-N}$ besteht.

CORRÊA et al. (2006) untersuchten die Zugabe von KSK und KS bis 8 t/ha zu einem sandigen Podsol. Der KS hatte eine deutlich höhere Nitrifikation vorzuweisen. Jedoch lag auch die Auswaschung von $\text{NO}_3\text{-N}$ bei KS doppelt so hoch wie bei KSK. Durch KSK-Zugabe ab 8 t/ha wurde die FK um das 2-3fache im Vergleich zum unberührten Boden und der Zumischung von KS gesteigert. Der PWP blieb ungefähr konstant, sodass auch die nFK deutlich gesteigert wurde. Erklärt wurde dies durch die Wasseradsorption durch die OS.

Um auch über andere Rekultivierungssubstrate einen Überblick der Konzentrationsbereiche der N-Parameter und Schwermetallen zu erlangen, werden in Anlage 42 einige Untersuchungen vorgestellt, in denen KS, Abfall- und Grünkompost verwendet wurde. Es wird ersichtlich, dass bereits bei Einsatz von geringen Mengen an KS zum Teil hohe $\text{NO}_3\text{-N}$ -

Konzentrationen und –Frachten nachgewiesen wurden (SHEPHERD 1996, MCLAREN et al. 2003, VOGELER et al. 2006, BRENNER 2008). Allerdings ist bemerkenswert, dass von QUIANG et al. (2004) bei einer Einsatzmenge von 1100 t/ha KS nur 10 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ im Sickerwasser ermittelt wurden.

Die Sickerwassermengen waren im eigenen Versuch 2 im Vergleich zu TAUCHNITZ (2006) um einiges höher. Im Gefäßversuch lagen die Sickerwassermengen der höheren KSK-Zumischung über denen der 50 Vol% Beimengung. Dieser Fakt ließ sich von LIEBHARD et al. (2004) bestätigen. Auch hier waren höhere Sickerwassermengen bei zunehmender Kompostzumischung von 60 % im Vergleich zu 40 % feststellbar. Ein möglicher Grund sind präferentielle Flüsse durch grobes Strukturmaterial.

Wie aus den Literaturangaben ersichtlich, lagen die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in Versuch 1 und 2 im vorgegebenen Rahmen. Während bei TAUCHNITZ (2006) die Werte deutlich oberhalb lagen, wurden durch LIEBHARD et al. (2004), LIEBHARD und WRIESSING (2005) und GOMISCEK (1999) bei einem Einsatz vergleichbar hoher Mengen an KSK geringere Konzentrationen im Sickerwasser ermittelt. Die berechneten $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten lagen in Versuch 1 innerhalb von 28 Monaten zwischen 73 und 280 kg/ha und waren damit vergleichbar mit den Angaben der oben genannten Literatur. Allerdings lagen die gemessenen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser bei Versuch 1 anfänglich deutlich über denjenigen von TAUCHNITZ (2006). Dadurch ergab sich auch eine höhere Fracht. In Versuch 2 waren die Werte jedoch vergleichbar. Es wird häufig beschrieben, dass N aus KSK und KS vorrangig als $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgetragen wird (GOMISCEK 1999, TAUCHNITZ 2006, DIMITRIOU 2005, EGIARTE et al. 2006). Auch dies ließ sich bestätigen, da ab dem zweiten Versuchsjahr im Versuch 1 kein $\text{NH}_4\text{-N}$ im Sickerwasser mehr nachgewiesen werden konnte. Es wurde festgestellt, dass je höher der Anteil an $\text{NH}_4\text{-N}$ im KS war, umso größere Mengen an N wurden ausgewaschen. Es findet eine schnelle Nitrifikation von $\text{NH}_4\text{-N}$ statt (SHEPHERD 1996). Weiterhin wurde bei Versuchen mit industriellem und kommunalem Abwasser auf Weiden festgestellt, dass N vorwiegend in Form von $\text{NO}_3\text{-N}$ ausgetragen wurde, obwohl im Abwasser hauptsächlich $\text{NH}_4\text{-N}$ vorlag. Dies deutet auf eine schnelle Nitrifikation hin. Es findet wahrscheinlich eine höhere Sorption des $\text{NH}_4\text{-N}$ an Bodenpartikel statt, da ein hoher C_{org} -Gehalt vorgefunden wurde (DIMITRIOU 2005).

Des Weiteren wurden sowohl in Versuch 1 als auch in Versuch 2 bei Zugabe von KSK im zeitlichen Verlauf steigende pH-Werte beobachtet. Ähnliches kann von GOMISCEK (1999) bestätigt werden. Auch bei Zugabe von KS wurden diese Erkenntnisse weitergegeben (EGIARTE et al. 2006). Ursache für die anfangs niedrigeren pH-Werte kann in hohen Nitrifikationsraten gesehen werden, die verstärkt zur Bildung von H^+ führen (EGIARTE et al. 2006).

Ein weiterer zu beachtender Aspekt sind die erhöhten Schwermetallgehalte, die sowohl in den eigenen Untersuchungen als auch in einer Vielzahl in der Literatur angegebenen Ergebnissen bestätigt werden. Für die Schwermetallgehalte im KSK sind an dieser Stelle LIEBMANN et al. (2004) sowie INSAM und MERSCHAK (1997) genannt, während die Literatur zu genannter Problematik für andere Substrate in Anlage 42 aufgeführt werden. Zum Beispiel belegen Lysimeterstudien, wie die von FJÄLLBORG et al. (2005), dass durch den Einsatz von KS, in diesem Fall 50 cm KS eingebracht, der Parameter Zn im Sickerwasser den höchsten Beitrag zur Toxizität leistet. Es wurde jedoch auch unterstellt, dass Ca diese Toxizität

reduzieren kann. Innerhalb eines Jahres wurden relativ zum aufgebrauchten KS folgende Elemente ausgewaschen: Zn>Ni>Cd>Cr>Cu (AHLBERG et al. 2006). Durch 65 t/ha kommunalem Abfallkompost auf einem sandigen Boden wurden im Sickerwasser erhöhte Konzentrationen an Cu, Ni und Zn gefunden. Geringer waren die Gehalte bei einem lehmigen Boden. Bei Cd, Pb und Hg konnten keine Bewegungen festgestellt werden. Cu lag z.B. mobil durch seine Bindung an DOM vor. Ebenso wurden Schwermetalle aus Rieselfeldern sowohl an DOC gebunden als auch in ionischer Form ausgewaschen. Eine Abhängigkeit von der Bodenart in Bezug auf die Höhe des Schwermetallaustrages wurde hier ebenso deutlich (HOFFMANN et al. 2002). Des Weiteren müssen lösliche metallorganische Komplexe in Betracht gezogen werden. Bei Cd kann es zusätzlich durch vorhandene hohe Mengen an Cl zur Bildung von Chloro-Cadmium-Komplexen kommen, die die Cd-Adsorption minimiert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2002). In den eigenen Untersuchungen nicht beachtet wurden die Auswaschungen weiterer An- und Kationen. Hier sei auf Publikationen von KASCHL et al. (2002), MCBRIDE et al. (1997) oder AHLBERG et al. (2006) verwiesen.

5 Schlussfolgerungen

Handlungsempfehlung

Auf Grundlage der Untersuchungserkenntnisse können Empfehlungen für den Praxiseinsatz von KSK als Rekultivierungsmaterial sowie dem Anbau von Energiepflanzen auf diesen Flächen gegeben werden.

Hinsichtlich des **Aufbaus der Rekultivierungsschicht** sind folgende Empfehlungen zu beachten. Grundsätzlich ist die Verwendung von gütegesichertem KSK mit Einhaltung der Grenzwerte für Schadstoffe nach AbfklärV vorauszusetzen. Als mineralischer Zumischungsparameter eignet sich ein sandiges Bodensubstrat. Eine Absiebung sowohl des Rekultivierungsmaterials als auch des mineralischen Bodensubstrates auf 25 bis 40 mm ist aus Sicht des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenwachstumes sinnvoll. Bewährt hat sich die Mischung der Kompartimente nach praxisüblichen Bedingungen mit Radlader, es sind jedoch Verdichtungen zu vermeiden. Zur Minimierung von Sickerwasser ist auf eine schnelle Begrünung nach dem Aufbau der Rekultivierungsschicht zu achten.

Die **Bearbeitung der Rekultivierungsflächen** unter Praxisbedingungen ist nach konventioneller landwirtschaftlicher Bodenbearbeitung durchzuführen, ebenso sollte der Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln nach guter fachlicher Praxis erfolgen. Um eventuelle Verdichtungen durch großmaschinelle Technik zu vermeiden, wird eine Verminderung des KSK-Anteiles unter 50 Vol% empfohlen.

Die **Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht** richtet sich vorrangig nach der Durchwurzelungstiefe der Pflanzen. Eine Schichtmächtigkeit von 100 cm wirkt sich auf den Biomasseertrag sowie auf die Biogas- und Methanausbeuten positiv aus. Des Weiteren werden durch eine höhere Schichtmächtigkeit die Sickerwassermengen und N-Frachten reduziert. Es ist jedoch über einen geschichteten Aufbau der Rekultivierungsschicht in Abhängigkeit der Durchwurzelungstiefe der Pflanzen und damit der Nährstoffvorräte nachzudenken.

Die **Zumischungshöhe von KSK** sollte langjährig den Nährstoffbedarf der angebauten Kulturen berücksichtigen. Dabei sind Verfügbarkeiten und die Dynamik der Pflanzennährstoffe zu beachten. Es ist darauf zu verweisen, dass sowohl bei Zumischung von 50 als auch 75 Vol% KSK mangelernährte Pflanzen im Vergleich zur Literatur auftraten, obwohl die Analytik ausreichende Nährstoffverfügbarkeiten an P, K und Mg im Bereich des Luxuskonsums zeigte. Eine zusätzliche mineralische Düngung kann folglich in Erwägung gezogen werden. Des Weiteren ist durch die Zumischungshöhe an KSK eine ausreichende nFK zur Pflanzenversorgung sicherzustellen. Höhere Beimengungen an KSK führen aufgrund von präferentiellen Fließwegen zu steigenden Sickerwassermengen und folglich höheren N-Frachten. Aufgrund des ausreichenden Nährstoffangebotes, der Problematik der N-Auswaschung sowie einer ausreichenden nFK bei Zumischung von 50 Vol% KSK ist diese Variante einer höheren Beimengung von 75 Vol% vorzuziehen.

Hinsichtlich der Auswahl der anzubauenden Energiepflanzen auf Rekultivierungsschichten aus KSK ist auf die positiven Ergebnisse des Energiegrases zu verweisen. Diese Kultur besaß aufgrund des mehrjährigen Anbaus steigende Erträge im Verlauf der Versuchszeit mit einhergehenden hohen Biogas- und Methanausbeuten. Auch ist aus Sicht eines Deponie- oder Haldenbetreibers auf den geringeren Bearbeitungsaufwand im Vergleich zu annuellen Kulturen hinzuweisen. Bei Etablierung eines geschlossenen Bestandes war zudem die Unkrautproblematik nicht gegeben. Zusätzlich konnten aufgrund des ganzjährigen Bewuchses die Sickerwasserereignisse mit den verbundenen N-Frachten im Gegensatz zu den anderen angebauten Fruchtarten minimiert werden. Weitere für den Anbau auf KSK geeignete Pflanzen aufgrund der Kombination aus Ernteerträgen und hohen Methanausbeuten sind Mais, Weizen und Sudangras. Allen genannten Fruchtarten gemein war ein für die Vergärung optimales C:N:P:S-Verhältnis. Des Weiteren konnte kein eindeutiger Einfluss aufgrund der Zumischungshöhe an KSK sowie Schichtmächtigkeit in Bezug auf die Gehalte an Rohnährstoffen festgestellt werden. Empfehlenswert bei der Entscheidung für annuelle Kulturen ist der Anbau von Zwischenfrüchten oder auch die Untersaat bei Kulturen mit später Jugendentwicklung bzw. weitem Reihenabstand, um das Sickerwasseraufkommen sowie die N-Frachten und die Erosion hinsichtlich des Gewässerschutzes zu reduzieren. Es ist aufgrund der geringen Lagerungsdichten des Rekultivierungsmaterials sowie der zum Teil exponierten Lage der Flächen auf die Standfestigkeit der angebauten Kulturen zu achten. Ein zusätzlicher zu nennender Aspekt sind die hohen Salzgehalte im Rekultivierungsmaterial, die zu Problemen beim Auflauf der Kulturen führen können. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, eine geringmächtige Schicht von 2 cm an Bodenmaterial zur Saatbettbereitung auf die Rekultivierungsschicht aufzubringen.

Forschungsbedarf

Aus den erzielten Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich Fragestellungen nach weiteren Forschungserkenntnissen. Es wird empfohlen, einen großflächigen Versuch mit direkter Verwertung der Biomasse in einer Biogasanlage anzulegen, um diverse Fruchtarten, angebaut auf Kulturschichten aus KSK, auch in der Praxis auf ihre Tauglichkeit in der Vergärung zu untersuchen. Weiterhin sollte das Spektrum an Zumischungsverhältnissen von KSK und die Schichtmächtigkeit variiert sowie ein Schichtenaufbau mit mineralischem Bodenmaterial in Erwägung gezogen werden. Es sollte das Ziel sein, den Entscheidungsträgern bei Behörden das Instrument einer geeigneten Zumischungsrate und Mächtigkeit zu liefern, um eine gesetzeskonforme Grundlage für die Rekultivierung zu schaffen.

Der Anbau von langjährigen Kulturen wie Miscanthus, Kurzumtriebsplantagen oder der Durchwachsenen Silphie auf Rekultivierungsschichten aus KSK wäre ein weiterer interessanter Ansatzpunkt hinsichtlich der Minimierung des Bearbeitungsaufwandes, aber auch zur Gewährleistung der Verringerung des Sickerwasseraufkommens.

Weiterhin ergeben sich außer der Vergärung andere Einsatzgebiete der energetischen Verwertung. Allerdings sollte einer dezentralen Nutzungsform der Vorzug gegeben werden. Eine weitere Frage ist die Entstehung von Treibhausgasemissionen, die aufgrund des Vorliegens hoher Mengen an N im KSK-Rekultivierungsmaterial aufgeworfen wird. Es sollten

folglich Messungen von N_2O -Emissionen durchgeführt werden. Ein zusätzlicher Punkt ist die Ausgasung von CH_4 . Interessant wäre der Vergleich zu anderen einsetzbaren Rekultivierungsmaterialien sowie organischen Düngemitteln. Diese Parameter wären wichtige Eingangsgrößen einer Treibhausgasbilanzierung, gerade auch im Vergleich zu mineralischen Düngern, die als wesentliche Treiber bei der energetischen Nutzung von Biomasse gelten. Um die Ökobilanz zu vervollständigen, sollten zusätzlich Eutrophierungs- und Versauerungspotenziale ausgewiesen werden.

Grundlegend schwierig einzuschätzen ist die N-Mineralisierung von Rekultivierungsschichten aus KSK. Da festgestellt wurde, dass es teilweise zur N-Mangelversorgung der Pflanzen in den Versuchen kam, sollte hierauf in Zukunft besonderes Augenmerk in der Versuchsanordnung gelegt werden. Nährstoffe wie N, P, K und Mg sowie ihre Pflanzenverfügbarkeiten sind im Laufe der Zeit zu beobachten.

In der vorliegenden Arbeit wurden nur die anorganischen Schadstoffe untersucht, in weiteren Versuchen könnte dieses Spektrum auf die organischen erweitert, sowie das Langzeitverhalten beider hinsichtlich der Aufnahme in die Pflanze und die Auswirkungen für die Vergärung überprüft werden.

Literaturverzeichnis

- Achiba W.B., Gabteni N., Lakhdar A., Laing G.D., Verloo M., Jedidi N., Gallali T. (2002): Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 130: 156-163.
- AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Aggelides S.M., Londra P.A. (2000): Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology* 71: 253-259.
- Ahlberg G., Gustafsson O., Wedel P. (2006): Leaching of metals from sewage sludge during one year and their relationship to particle size. *Environmental Pollution* 144 (2): 545-553.
- Alcantara S., Pérez D.V., Almeida M.R.A., Silva G.M., Polidoro J.C., Bettiol W. (2009): Chemical Changes and Heavy Metal Partitioning in an Oxisol Cultivated with Maize (*Zea Mays* L.) after 5 years Disposal of a Domestic and an Industrial Sewage Sludge. *Water Air Soil Pollut* 203: 3-16.
- Amir S., Hafidi M., Merlina G., Revel J.-C. (2005): Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere* 59: 801-810.
- Amon T., Kryvoruchko V., Bodiroza V., Amon B. (2005): Das Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität bei der Vergärung von Energiepflanzen. *Forschungsbericht*.
- Amon T., Kryvoruchko V., Hopfner-Sixt K., Amon B., Bodiroza V., Ramusch M., Hrbek R., Friedel J.K., Zollitsch W., Boxberger J. (2006): Strategien zur nachhaltigen Biogaserzeugung aus Energiepflanzen durch standortangepasste Fruchtfolgesystem, Sortenwahl und optimale Erträge. *Beitrag Fachkongress Biogas*. Linz.
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Machmüller A., Hopfner-Sixt K., Bodiroza V., Hrbek R., Friedel J., Pötsch E., Wagentristl H., Schreiner M., Zollitsch W. (2007): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98: 3204-3212.
- Andrews R.J., Lloyd J. W., Lerner D. N. (1997): Modelling of nitrate leaching from arable land into unsaturated soil and chalk 2. Model confirmation and application to agricultural and sewage sludge management. *Journal of Hydrology* 200 (1-4): 198-221.
- Anonymus (2001): *Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft P Wirkung des Klärschlammes in Abhängigkeit von der P-Fällung und vom Substrat*. Forschungsberichte des Fachbereichs Agrarwirtschaft Soest Universität – Gesamthochschule Paderborn. Nr. 13.
- Bartl B., Hartl W., Horak O. (2002): Long-term application of biowaste compost versus mineral fertilization: Effects of nutrient and heavy metal contents of soil and plants. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.* 165: 161-165.
- Baserga U. (1998): *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*. FAT-Berichte Nr 512.
- Bauer A., Leonhartsberger C., Bosch P., Amon B., Friedl A., Amon T. (2010): Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy

- potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technol. Environ. Policy. Clean Technologies and Environmental Policy* 12: 153-161.
- Baveye P., McBride M., Bouldin D., Hinesly T., Dahdoh M., Abdel-sabour M. F. (1999): Mass balance and distribution of sludge borne trace elements in a silt loam soil following long-term applications of sewage sludge. *The science of Total Environment* 227: 13-28.
- Bayrisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2012): Repräsentative Erträge.
- Beltrán E.M., Miralles de Imperial R., Porcel M.A. Delgado M.M. Beringola M.L., Martin J.V. Bigeriengo M. (2002): Effect of Sewage Sludge Compost Application on Ammonium-Nitrogen Contents of an Olive Grove Soil. 12th ISCO Conference. Beijing. 395-402.
- Benton C.M., Fish E.B., Mata-Gonzalez R. (2007): Macronutrient and trace element leaching following biosolids application on semi-arid rangeland soils. *Arid Land Management* 21 (2): 143-156.
- Bernal M.P., Navarro A.F., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Cegarra J. (1998): Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biol. Biochem.* 30 (3): 305-313.
- Bernsdorf, S., Tauchnitz, S., Liemen F., Meißner, R. (2008). KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr. 55, 1323 – 1328.
- Bildlingmaier W. (2000): Biologische Abfallverwertung. Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart.
- Bischofsberger W., Dichtl N., Rosenwinkel K.-H., Seyfried C. F., Böhnke B. (2005): *Anaerobtechnik*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg.
- Bragato G., Leita L., Figliolla A., Nobili M. (1998): Effects of sewage sludge pre-treatment on microbial biomass and bioavailability of heavy metals. *Soil & Tillage Research* 46: 129-134.
- Brenner A. (2008): Untersuchungen zur Düngewirkung von Gärrückständen unter besonderer Berücksichtigung von NH₃ und NO₃-Verlusten. Inaugural-Dissertation. Rheinische Universität Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Brouwere K., Smolders E. (2006): Yield response of crops amended with sewage sludge in the field is more affected by sludge properties than by final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science* 57: 858-867.
- Brumme (2007): mündliche Auskunft.
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) (1999). BGBl.I, Nr. 36: 1554 – 1582.
- Bundesgesetzblatt (2009): Vereinfachung der Verordnung des Deponierechts. Teil 1 Nr. 22. 29.04.2009
- Cai H., Chen T., Liu H., Gao D., Zheng G., Zhang J. (2010): The effect of salinity and porosity of sewage sludge compost on the growth of vegetable seedlings. *Scientia Horticulturae* 124 (3): 381-386.
- Cai Q.-Y., Mo C.-H., Wu Q.-T., Zeng Q.-Y., Katsoyiannis A. (2007): Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. *Journal of Hazardous Materials* 147 (3): 1063-1072.

- Carbonell G., Pro J., Gómez N., Banin M.M., Fernández C., Alonso E., Tarazona J.V. (2009): Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72 (4): 1309-1319.
- Casado-Vela J., Sellés S., Díaz-Crespo C., Navarro-Pedreno J., Mataix-Beneyto J., Gómez I. (2007): Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*Capsicum annuum* var. *annuum*) grown under two exploitation regimes. *Waste Management* 27 (11): 1509-1518.
- Casado-Vela J., Sellés S., Navarro J., Bustamante M.A., Mataix J., Guerrero C., Gómez I. (2006): Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils. *Waste Management* 26 (9): 946-952.
- Cheng H., Xu W., Liu J., Zhao Q., He Y., Chen G. (2007): Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth. *Ecological Engineering* 29 (1): 96-104.
- Chiang K.-Y., Huang H.-J., Chang C.-N. (2007): Enhancement of heavy metal stabilization by different amendments during sewage sludge composting process. *J. Environ. Eng. Manage.* 17 (4): 249-256.
- Correa, R.S., White R.E., Wetherlay A.J. (2006): Risk of Nitrate Leaching from Two Soils Amended with Biosolids. *Water Resources*. 33 (4): 453-462.
- Debosz K., Petersen S.O., Kure L.K., Ambus P. (2002): Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology* 19: 237-248.
- Degado Arroyo M., Porcel Cots M. A., Hornedo R., Beltran Rodriguez E., Berlingola Berlingola L., Martin Sanchez J. V. (2002): Sewage Sludge Compost Fertilizer Effect on Maize Yield and Soil Heavy Metal Concentration. *Rev. Int. Contam. Ambient* 18: 147-150.
- Delschen T. (1999): Impacts of long-term application of organic fertilizers on soil quality parameters in reclaimed loess soils of the Rhineland lignite mining area. *Plant and Soil* 213: 43-54.
- Deublein D. und Steinhauser A. (2008): *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaG Weinheim.
- Dimitriou I. (2005): *Performance and Sustainability of Short-Rotation Energy Crops Treated with Municipal and Industrial Residues*. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala.
- DIN 11274 (1998): *Soil quality- Determination of the water retention characteristics- Laboratory methods*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- DLG, Datenbank Futtermittel. Internetangebot. Stand 2010.
- Doubiet J., Francou C., Poitrenaud M., Houot S. (2011): Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting ; consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology* 102: 1298-1307.
- Dunger, V. (2002). *Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen*. Nutzerhandbuch, Version 04/2002.

- Dunger, V. (2006). Entwicklung und Anwendung des Modells BOWAHALD zur Quantifizierung des Wasserhaushaltes oberflächengesicherter Deponien und Halden. Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau.
- Dunger, V. (2010). Modellierung des Wasserhaushaltes für verschiedene Abdeckvarianten im Bereich der Kalirückstandshalde Sondershausen. unveröffentlicht.
- Düring R.-A., Gäth S. (2002): Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where do we go? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 544-556.
- Ecker S., Korak O. (1997): Beziehungen zwischen Schwermetallaufnahme von Sommerweizen und einer leicht mobilisierbaren Schwermetallfraktion in Böden. *Mitt. Österr. Geol. Ges.* 88: 103-113.
- Egiarte G., Arbestain M.C., Ruiz-Romera E., Pinto M. (2006): Study of the chemistry of an acid soil column and of the corresponding leachates after the addition of an anaerobic municipal sludge. *Chemosphere* 65: 2456-2467.
- Epstein E., Keane D.B., Meisinger J.J., Legg J.O. (1977): Mineralization of Nitrogen from Sewage Sludge and Sludge Compost. *Journal of Environmental Quality* 7 (2): 217-221.
- Erhartl E., Hartl W., Putz B. (2008): Total soil heavy-metal concentrations and mobile fractions after 10 years of biowaste-compost fertilization. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 171: 378-383.
- Erhartl E., Hartl W., Bartl B., Putz B., Horak O. (2009): Bioabfallkompost im biologischen Landbau – Auswirkungen auf die Gehalte von bioverfügbaren Schwermetallen im Boden. 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, ETH Zürich, 11.-13. Februar 2009.
- Falahi-Ardakani A., Bouwkamp J.C., Gouin F.R., Chaney R.L. (1987): Growth Response and Mineral Uptake of Vegetable Transplants Grown in a Composted Sewage Sludge Amended Medium. I. Nutrient Supplying Power of the Medium. *J. Environ. Hort.* 5(3): 107-111.
- Fässler E., Robinson B.H., Gupta S.K., Schulin R. (2010): Uptake and allocation of plant nutrients and Cd in maize, sunflower and tobacco growing on contaminated soil and the effect of soil conditioners under field conditions. *Nutr Cycl Agrosyst* 87: 339-352.
- Fjällborg B., Ahlberg G., Nilsson E., Dave G. (2005): Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. *Environment International* 31 (1): 25-31.
- FNR (2006): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. 3., überarbeitete Auflage. Gülzow.
- FNR (2010): Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe. 3.Auflage. Gülzow.
- Francou C. (2003): Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains. Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse. Institut national agronomique Paris-Grignon – Ecole doctorale Abies.
- Francou C., Poitrenaud M., Houot S. (2005): Stabilization of Organic Matter During Composting : Influence of Process and Feedstocks. *Compost Science & Utilization* 13: 71-83.

- Frede, H. G.; Gäth, S.; Meyer, B. (1983): Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen von Sandböden unterschiedlichen Humusgehaltes, erstellt am Drucktopf- und in der Zentrifugemethode. Mittlg. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 38, 85-90.
- Fritz T. (2008): Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen. Dissertation. Universität Rostock.
- Frost H.L., Ketchum L.H. (2000): Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer. *Advances in Environmental Research* 4:347-355.
- Fuchs J.G., Bieri M., Chardonnes M. (2004): Auswirkungen von Komposten und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit, sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL-Report, Frick, Schweiz.
- Gagnon B., Simard R.R., Goulet M., Robitaille R., Rioux R. (1998): Soil nitrogen as influenced by composts and inorganic fertilizer rate. *Canadian Journal of Soil Science* 78 (1): 207-215.
- Garau M.A., Dalmau J.L., Felipó M.T. (1991): Nitrogen mineralization in soil amended with sewage sludge and fly ash. *Biol Fertil Soils* 12: 199-201.
- Garrido S., Martin del Campo G., Esteller M.V., Vaca R., Lugo J. (2005): Heavy metals in soil treated with sewage sludge composting, their effect on yield and uptake of broad bean seeds (*Vicia faba* L.). *Water Air and Soil Pollution* 166: 303-319.
- Gerber M. (2009): Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum.
- Gerzabek M.H., Lombi E., Herger P. (1998): Use of sewage sludge – nitrogen availability and heavy metal uptake into rape. *Die Bodenkultur* 49 (2): 85-96.
- Gil M.V., Carballo M.T., Calvo L.F. (2011): Modelling N mineralization from bovine manure and sewage sludge composts. *Bioresource Technology* 102: 863–871.
- Ginneken L., Meers E., Guisson R., Ruttens A., Elst K., Tack F.M.G., Vangronsveld J., Diels L., Dejonghe W. (2007): Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 15 (4): 227-236.
- Gomiscek, T. (1999). Revegetation of closed landfills on diverse refuse substrates with fuel plants regarding the growth rates and water balance. Ph.D. Thesis. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.
- Haas R., Schreiber I., Koss G. (1990): PAK- und Schwermetall-Aufnahme in Getreide – Wechselseitige Beeinflussung. *Z. Umweltchem Ökotox.* 2 (2): 66-70.
- Hallett R.A., Bowden W.B. Smith C.T. (1999): Nitrogen dynamics in forest soils after municipal sludge additions. *Water, Air, and Soil Pollution* 112: 259-278.
- Haubrich E., Klinger und Partner: Deponienachnutzungskonzepte –Praxisbeispiele aus Planung und Bauausführung-. 7. Leipziger Deponiefachtagung - Planung, Bau, Stilllegung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien: 195-210.
- Haubold-Rosar M., Gast M. (2005): Einsatz von Klärschlamm und Kompost bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung von Kippenböden im Lausitzer Braunkohlerevier. In:

- Pickel, P. (Institut für Agrartechnik und Landeskultur d. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg) (Hrsg.): Beiträge zum Thema: Klärschlammkompost im Landschaftsbau. (Agrartechnische Berichte aus Sachsen-Anhalt Nr. 3), Halle-Wittenberg, 44-61.
- Haubold-Rosar M., Schneider R. (2005): Entwicklung bodenphysikalischer Eigenschaften junger Kippböden im Lausitzer Braunkohlerevier in Abhängigkeit von Substrat und Melioration. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 106: 21-22.
- He M.M., Tian G.M., Liang X.Q. (2009): Phytotoxicity and specification of copper, zinc and lead during aerobic composting of sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials* 163 (2-3): 671-677.
- He Z.L., Alva A.K., Yan P., Li Y.C., Calvert D.V., Stoffella P.J., Banks D.J. (2000): Nitrogen Mineralization and Transformation From Compost and Biosolids During Field Incubation in A Sandy Soil. *Soil Science* 165 (2): 161-169.
- Heiermann M., Plöchl M. (2004): Biogas aus Pflanzen – Ergebnisse von Gärversuchen. 10. Internationale Tagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ an der TU Bergakademie Freiberg am 9. 10. September 2004. 79-84.
- Heiermann M., Idler C., Herrmann C., Scholz V. (2009a): Ermittlung des Einflusses der Pflanzenart und der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute in Labor und in der Praxis. Abschlussbericht des Teilprojektes 4. ATB Potsdam-Bornim e.V.
- Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H., Herrmann C. (2009b): Biogas Crops - Part 1: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript 1087, Vol. XI.
- Hengelhaupt, F. und Gödecke K. (2008): Tätigkeitsbericht 2008 Arbeitsgruppe Biogas. Abschlussbericht Teilprojekt 1, 2005-2008. TLL intern.
- Hernández T., Moral R., Perez-Epinosa A., Moreno-Caselles J., Perez-Murcia M.D., García C. (2002): Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge. *Bioresource Technology* 83: 213-219.
- Hernández-Apaolaza L., Gascó J.M., Guerrero F. (2000): Initial organic matter transformation of soil amended with composted sewage sludge. *Biol Fertil Soils* 32: 421-426.
- Hoffmann C., Savric I., Jozefaciuk G., Hajnos M., Sokolowska Z., Renger M., Marschner B. (2002): Reaction of sewage farm soils to different irrigation solutions in a column experiment 2. Heavy metals and their leaching. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 67-71.
- Hooda P.S., McNulty D, Alloway B.J., Aitken M.N. (1997): Plant Availability of Heavy Metals in Soils Previously Amended with Heavy Applications of Sewage Sludge. *J Sci Food Agric* 73: 446-454.
- Hua L., Wang Y., Wu W., McBride M.B., Chen Y. (2008): Biomass and Cu and Zn Uptake of Two Turfgrass Species Grown in Sludge Compost-soil Mixtures. *Water Air Soil Pollut* 188: 225-234.
- Hua L., Wu W., Liu Y., McBride M.B., Chen Y. (2009): Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Enviro Sci Pollut Res* 16: 1-9.
- Huang C.-C., Chen Z.-S. (2009): Carbon und nitrogen mineralization of sewage sludge compost in soils with different initial pH. *Soil Science and Plant Nutrition* 55: 715-724.

- Huber-Humer M. (2004): Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost. Ph.D. Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna.
- Ingelmo F., Canet R., Ibañez M.A., Pomares F., García J. (1998): Use of MSW compost, dried sewage sludge and other wastes as partial substitutes for peat and soil. *Bioresource Technology* 63: 123-129.
- Insam H, Merschak P. (1997): Nitrogen leaching from forest soil cores after amending organic recycling products and fertilizers. *Waste Management & research* 15: 277-292.
- Inubushi K., Goyal S., Sakamoto K., Wada Y., Yamakawa K., Arai T. (2000): Influences of application of sewage sludge compost on N₂O production in soils. *Chemosphere* 2: 329-334.
- Ippolito J.A., Barbarick K.A., Paschke M.W., Brobst R.B. (2010): Infrequent composted biosolids applications affect semi-arid grassland soils and vegetation. *Journal of Environmental Management* 91 (5): 1123-1130.
- Jalali M., Moharami S. (2009): Redistribution of cadmium, copper, lead, nickel, and zinc among soil fractions in a contaminated calcareous soil after application of nitrogen fertilizers.
- Kaiser F. L. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation. Technische Universität München.
- Kaiser F., Metzner T., Effenberger M., Gronauer A. (2007): Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. LfL-Information. Freising-Weihenstephan.
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahrenen. Springer Verlag Heidelberg, 2. Auflage.
- Kaschl A., Römheld V., Chen Y. (2002): The influence of soluble organic matter from municipal solid waste compost on trace metal leaching in calcareous soils. *The Science of the Total Environment* 291: 45-57.
- Katayama A., Hirai M., Shoda M., Kubota H., Mori S. (1985): Inhibitory Factor of Sewage Sludge Compost for Growth of *Komatsuna Brassica campestris L. var. rapifera* froug. *Environmental Pollution (Series A)* 38: 45-62.
- Kathke C. (2010): Pflanzenbauliche Bewertung von alternativen Möglichkeiten zur Rekultivierung des Braunkohlenkippenstandortes Witznitz. Diplomarbeit. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Keller T., Beda-Putz H. (1976): Der Einfluß von Klärschlamm auf den Sickerwasserchemismus eines lehmigen Waldbodens. *Forstw. Obl.* 95: 97-108.
- Keymer U., Schilcher A. (1999): Überlegungen zur Errechnung theoretischer Gasausbeuten vergärbare Substrate in Biogasanlagen. *Landtechnik-Bericht Nr. 32*. Freising.
- Khaleel R., Reddy K.R., Overcash M.R. (1981): Changes in Soil Physical Properties Due to Organic Waste Applications: A Review. *J. Environ. Qual.* 10 (2): 133-141.
- Kidd P.S., Domínguez-Rodríguez M.J., Díez J., Monterroso C. (2007): Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere* 66: 1458-1467.

- Kirkham M.B. (2004): Principles of soil and plant water relations. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Kleber M., Nikolopoulos P., Kuzyakov Y., Stahr K. (2000): Formation of mineral N (NH_4^+ , NO_3^-) during mineralization of organic matter from coal refuse material and municipal sludge. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163: 73-80.
- Koch K., Lubken M., Gehring T., Wichern M., Horn H. (2010): Biogas from grass silage – Measurements and modeling with ADM1. *Bioresource Technology* 101: 8158-8165.
- Korboulewski N., Dupouyet S., Bonin G. (2002): Environmental Risks of Applying Sewage Sludge Compost to Vineyards: Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Accumulation. *J. Environ. Qual.* 31: 1522-1527.
- Kos B., Grcman H., Lestan D. (2003): Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. *Plant Soil Environ.* 49: 548-553.
- Kranert M. (2000): Grundlagen der Kompostierung. In: Bidlingmaier. Biologische Abfallverwertung. Eugen Ulmer Verlag GmbH & Co: 37-55.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2007): Energiepflanzen, KTBL-Datensammlung mit Internetangebot. Darmstadt.
- Lag A., Gomez J., Navarro-Pedreno J., Melendez I., Perez-Gimeno A., Soriano-Disla J.M. (2010): Cardoon (*Cynara cardunculus* L.) biomass production in a calcareous soil amended with sewage sludge compost and irrigated with waste water. *Geophysical Research Abstracts* 12. EGU2010-10784-2.
- Larchevêque M., Baldy V., Montès N., Fernandez C., Bonin G., Ballini C. (2006): Short-term Effects of Sewage-Sludge Compost on a Degraded Mediterranean Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1178-1188.
- Lenzemo T. E. (2008): The impacts of genotype and harvest time on dry matter, biogas and methane yields of maize (*Zea mays* L.). Dissertation. Justus-Liebig-Universität Giessen.
- Liebhart P., Wriessing K., Rauchecker M. (2004): Einfluss unterschiedlicher Kultursubstrate und Pflanzenarten auf das Pflanzenwachstum und Sickerwasseranfall bei der Schliessung von Deponien und Abbauflächen (Gefäßversuch). ALVA Jahrestagung 2004. Klimawandel – Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion: 80-83.
- Liebhart P., Wriessing K. (2005): Einfluss unterschiedlicher Kultursubstrate und Pflanzenarten auf Sickerwassermenge und Sickerwasserqualität bei der Schliessung von Deponien (Gefäßversuch). 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 5. und 6. April 2005.
- Liebmann H., Stude J., Koch F., Kube C., Kraft U., Berry A. (2004): Entwicklung von Rezepturen für Bodenersatzstoffe auf der Basis optimaler Nährstoffverfügbarkeit und minimaler Schadstofffreisetzung. Abschlussbericht Nr. 13370 BG.
- Lücke M. (1997): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. Untersuchungen zum Standort, zur Begründung mit Komposten und zur Gehölzsukzession von Rückstandshalden mit anhydritischen Auflageschichten. Dissertation. Witzenhausen. Ökologie und Umweltsicherung. Selbstverlag.
- Mähnert P., Heiermann M., Plöchl M., Schelle H., Linke B. (2002): Verwertungsalternativen für Grünlandbestände - Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. *Landtechnik* 57: 260-26

- Mähnert P., Heiermann M., Linke B. (2005): Batch and Semi-continuous Biogas Production from Different Grass Species. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript EE 05 010. Vol VII.
- Mähnert P. (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Mamo M., Rosen C.J., Halbach T.R. (1999): Nitrogen availability and leaching from soil amended with municipal solid waste compost. *Journal of environmental quality* 28 (4): 1074-1082.
- Mamo, M., Moncrief J.F., Rosen C.J., Halbach T.R. (2000): Effect of municipal waste compost application on soil water and water stress in irrigated corn. *Compost Science & Utilization* 8 (3): 236-246.
- Mantovi P., Baldoni G., Toderi G. (2005): Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. *Water Research* 39: 289-296.
- McLaren R.G., Clucas L.M., Taylor M.D., Hendry T. (2003): Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soils treated with metal-spiked sewage sludge. 1. Leaching of macronutrients. *Australian Journal of Soil Research* 41: 571-588.
- McBride M.B., Richards B.K., Steenhuis T. (2004): Bioavailability and crop uptake of trace metals in soil columns amended with sewage sludge products. *Plant and Soil* 262: 71-84.
- McBride M.B., Richards B.K., Steenhuis T.S., Russo J.J. (1997): Mobility and Solubility of Toxic Metals and Nutrients in Soil Fifteen Years After Sludge Application. *Soil Science* 162 (7): 487-500.
- McCoy J.L., Sikora L.J., Weil R.R. (1986): Plant Availability of Phosphorus in Sewage Sludge Compost. *Journal of environmental quality* 15 (4): 403-409.
- Melin G., Arasson P., Hasselgren K. (2004): Recycling of wastewater and sludge in *Salix* plantations.
- Mkhabela M.S., Warman P.R. (2005): The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Plugwash sandy soil in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106 (1): 57-67.
- Mohammad M.J. und Athamneh B.M. (2004): Changes in Soil Fertility and Plant Uptake of Nutrients and Heavy Metals in Response to Sewage Sludge Application to Calcareous Soils. *Journal of Agronomy* 3 (3): 229-236.
- Moreno J.L., García C., Hernández T., Pascual J.A. (1996): Transference of heavy metals from a calcareous soil amended with sewage-sludge compost to barley plants. *Bioresource Technology* 55 (3): 251-258.
- Moreno J.L., Hernández T., Garcia C. (1999): Effects of a cadmium-contaminated sewage sludge compost on dynamics of organic matter and microbial activity in an arid soil. *Biol. Fertil Soils* 28: 230-237.
- Moreno-Penaranda R., Lloret F., Alcandiz J.M. (2004): Effects of Sewage Sludge on Plant Community Composition in Restored Limestone Quarries. *Restoration Ecology* 12 (2): 290-296.

- Navas A., Bermudéz F., Machín J. (1998): Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisol. *Geoderma* 87: 123-135.
- Nendel C., Kersebaum K.C., Nieder R., Kubiak R. (2007): Nitrogen mineralization from mature bio-waste-compost in vineyard soils III Simulation of soil mineral-nitrogen dynamics. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170: 598-607.
- Niessing S. (2005): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -6- Begrünungsmaßnahmen auf der Rückstandshalde des Kaliwerkes – Sigmundshall in Bokeloh. Dissertation. Universität Kassel.
- Nomeda S., Valdas P., Chen S.Y., Lin J.G. (2008): Variations of metal distribution in sewage sludge composting. *Waste Management* 28 (9): 1637-1644.
- Nyamangara J., Mzezewa J. (1999): The effect of long-term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 73: 199-204.
- Obrador A., Rica M.I., Alvarez J.M., Novillo J. (1997): Influence of thermal treatment on sequential and leaching behaviour of trace metals in a contaminated sewage sludge. *Bioresource Technology* 76: 259-264.
- Ohly N. (2006): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Optimierung der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation. TU Freiberg.
- Ojeda G., Alcaniz J.M. (2010): Soil water retention under drying process in a soil amended with composted and thermally dried sewage sludges. 19th World Soil Congress of Soil Science, Soil Solutions for a changing World. Brisbane, Australia: 79-82.
- Oleszczuk P. (2010): Testing of Different Plants to Determine Influence of Physico-Chemical Properties and Contaminants Content on Municipal Sewage Sludges Phytotoxicity. *Environmental Toxicology* 25 (1): 38-47.
- Ostos J.C., López-Garrido R., Murillo J.M., López R. (2008): Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Bioresource Technology* 99 (6): 1793-1800.
- Oudeh M., Khan M., Scullion J. (2002): Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. *Environmental Pollution* 116: 293-300.
- Pascual I., Antolín M.C., García C., Polo A., Sánchez-Díaz M. (2004): Plant availability of heavy metals in a soil amended with a high dose of sewage sludge under drought conditions. *Biol. Fertil. Soils* 40: 291-299.
- Pascual J.A., Ayuso M., Garcia C., Hernández T. (1997): Characterisation of urban wastes according to fertility and phytotoxicity parameters. *Waste Management & Research* 15: 103-112.
- Pichtel J., Anderson M. (1997): Trace metal bioavailability in municipal solid waste and sewage sludge composts. *Bioresource Technology* 60: 223-229.
- Pinamonti F. (1998): Compost mulch effects on soil fertility, nutritional status and performance of grapevine. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 239-2488.

- Pinamonti F., Stringari G., Gasperi F., Zorzi G. (1997): The use of compost: its effects on heavy metal levels in soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling* 21: 129-143.
- Planquart P., Bonin G., Prone A., Massiani C. (1999): Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *The Science of the Total Environment* 241: 161-179.
- Preißler D., Lemmer A., Oechsner H., Jungbluth T. (2009): Die Bedeutung der Spurenelemente bei der Ertragssteigerung und Prozessstabilisierung. In: 18. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. Hannover.
- Prochnow A., Heiermann M., Idler C., Linke B., Mähnert M., Plöchl M. (2007): Biogas vom Grünland: Potenziale und Erträge. Gas aus Gras und was noch? Schriftenreihe des deutschen Grünlandverbandes, Berlin, H: 11-22.
- Quiang Z., Speir T.W., Schaik A.P. (2004): Leaching of nutrients from soil cores treated with a single large dose of digested sewage sludge. *Biol Fertil Soils* 40: 284-289.
- Ramachandran V., D'Souza T.J. (1998): Plant Uptake of Cadmium, Zinc, and Manganese in Soils Amended with Sewage Sludge and City Compost. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 61: 347-354.
- Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., Singh A.K. (2005): Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater – a case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 109 (3-4): 310-322.
- Raucherer, M. (2001): Ökologische Aspekte bei der Schließung und Rekultivierung von Deponien und Abbauflächen mit diversen Pflanzenarten auf unterschiedlichen Kultursubstraten zur Produktion von Biomasse und Reduktion des Sickerwasseranfalles. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien.
- Rebhahn E. (2002): Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.
- Richards B.K., Steenhuis T.S., Peverly J.H., McBride M.B (1998): Metal mobility at an old, heavily loaded sludge application site. *Environmental Pollution* 99: 365-377.
- Röhrich C., Zander D. (2008): Anbau und Nutzung von Energiehirse. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 2.
- Ros M., Hernandez M.T., Garcia C. (2003): Bioremediation of Soil Degraded by Sewage Sludge: Effects on Soil Properties and Erosion Losses. *Environmental Management* 31: 741-747.
- Ros M., Klammer S., Knapp B., Aichberger K., Insam H. (2006): Long-term effects of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity. *Soil Use and Management* 22: 209-218.
- Rossi G., Figliolia A., Socciarelli S. (2004): Zinc and Copper Bioaccumulation in *Brassica napus* at Flowering and Maturation. *Eng. Life Sci.* 4: 271-275.
- Rossi G., Figliolia A., Socciarelli S., Pennelli B. (2002): Capability of *Brassica napus* to Accumulate Cadmium, Zinc and Copper from Soil. *Acta Biotechnol.* 22: 133-140.

- Sanders J. R., McGrath S.P., Adams T. (1986): Zinc, Copper and Nickel Concentrations in Soil Extracts and Crops Grown on Four Soils Treated with Metal-loaded Sewage Sludges. *Environmental Pollution* 44: 193-210.
- Schaecke W., Tanneberg H., Schilling G. (2002): Behavior of heavy metals from sewage sludge in a Chernozem of the dry belt in Saxony-Anhalt/Germany. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 165: 609-617.
- Scheffer F., Schachtschabel P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Schievano A., Pognani M., D'Imporzano G., Adani F. (2008): Predicting anaerobic biogasification potential of ingestates and digestates of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. *Bioresource Technology* 99 (17): 8112-8117.
- Schumacher B. (2008): Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation. Universität Hohenheim.
- Selivanovskaya S.Y., Latypova V.Z. (2006): Effects of composted sewage sludge on microbial biomass, activity and pine seedlings in nursery forest. *Waste Management* 26 (11): 1253-1258.
- Shepherd M.A. (1996): Factors affecting nitrate leaching from sewage sludges applied to a sandy soil in arable agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58: 171-185.
- Sikora L.J., Tester C.F., Taylor J.M., Parr J.F. (1982): Phosphorus Uptake by Fescue from Soils Amended with Sewage Sludge Compost. *Agronomy Journal* 74 (1): 27-33.
- Simons J. (2008): Eignung nährstoffreicher Substrate aus zentraler & dezentraler Abwasserbehandlung als Düngemittel. Inaugural-Dissertation. Rheinische Universität Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Sims J. T. (1990): Nitrogen mineralization and elemental availability in soils amended with cocomposted sewage sludge. *Journal of Environmental Quality* 19 (4): 669-675.
- Smith S.R. (2009): A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environmental International*. 35 (1): 142-156.
- Song U., Lee E.J. (2010): Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill. *Resources, Conservation and Recycling* 54 (12): 1109-1116.
- Stamatiadis S., Doran J.W., Kettler T. (1999): Field and laboratory evaluation of soil quality changes resulting from injection of liquid sewage sludge. *Applied Soil Ecology* 12: 263-272.
- Strauß C., Biertümpfel A., Rudel H. (2010): Ertragszuwachs und Methanausbeute von Ganzpflanzengetreide vom Ährenschieben bis zur Teigreife. Vorläufiger Versuchsbericht. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Stude J., Liebmann H., Parnieske-Pasterkamp (2002): Abschlußbericht 198/00 – Modellierung und Prognose des Wasserbinde- und Speichervermögens von Rekultivierungsschichten auf Kalirückstandshalden anhand meteorologischer und bodenphysikalischer Daten. Kali-Umwelttechnik Sonderhausen.

- Stülpnagel R., Buttlar C., Heuser F., Wachendorf M. (2009): Systemversuch zum Zweikulturnutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet – Schlussbericht. Universität Kassel.
- Sun L., Niu Z., Sun T. (2007): Effects of Amendments of N, P, Fe on Phytoextraction of Cd, Pb, Cu, and Zn in Soil of Zhangshi by Mustard, Cabbage, and Sugar Beet. *Environmental Toxicology* 10: 565-571.
- Tarrasón D., Ojeda G., Ortiz O., Alcaniz J.M. (2008): Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge. *Bioresource Technology* 99: 252-259.
- Tassi E., Pedron F., Barbaferi M., Petruzzelli G. (2004): Phosphate-Assisted Phytoextraction in As-Contaminated Soil. *Eng. Life Sci.* 4: 341-346.
- Tauchnitz, S. (2006): Untersuchungen zum Wasserhaushalt und Stickstoffumsatz von Rekultivierungsschichten aus Klärschlammkompost. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. ISBN 1860-0387.
- Taylor J.M., Sikora L.J., Tester C.F., Parr J.F. (1977): Decomposition of Sewage Sludge Compost in Soil: II. Phosphorus and Sulfur Transformations. *Journal of Environmental Quality* 7 (1): 119-123.
- Tester C.F., Parr J.F. (1983): Decomposition of sewage sludge compost in soil: IV. Effect of indigenous salinity. *Journal of Environmental Quality* 12 (1): 123-126.
- Tester C.F., Sikora L.J., Taylor J.M., Parr J.F. (1977): Decomposition of Sewage Sludge Compost in Soil: I. Carbon and Nitrogen Transformation. *Journal of Environmental Quality* 6 (4): 459-463.
- Tester C.F., Sikora L.J., Taylor J.M., Parr J.F. (1982): Nitrogen Utilization by Tall Fescue from Sewage Sludge Compost Amended Soils. *Agronomy Journal* 71 (6): 1013-1018.
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2011): interne Versuchsergebnisse (hrsg. v. Dr. A. Nehring und Dr. A. Vetter).
- ThürStAnz (2002): Richtlinie für die Abdeckung und Begrünung von Kalihalden im Freistaat Thüringen Kali-Halden-Richtlinie. Nr. 19: 1539 – 1560.
- Tolk J. A. (2003): Soils, Permanent Wilting Points. *Encyclopedia of Water Science*. 927-929.
- Tyler G., Olsson T. (2001): Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant and Soil* 230: 307-321.
- Vaca-Paulín R., Esteller-Alberich M.V., Lugo-de la Fuente J., Zavaleta-Mancera H.A. (2006): Effect of sewage sludge or compost on the sorption and distribution of copper and cadmium in soil. *Waste Management* 26: 71-81.
- Vereesh H., Tripathy S., Chaudhuri D., Ghosh B.C., Hart B.R., Powell M.A. (2003): Changes in physical and chemical properties of three soil types in India as a result of amendment with fly ash and sewage sludge. *Environmental Geology* 43: 513-520.
- Vogeler I., Green S.R., Mills T., Clothier B.E. (2006): Modelling nitrate and bromide leaching from sewage sludge. *Soil & Tillage Research* 89: 177-184.

- Warman P.R., Termeer W.C. (2005a): Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: yields and N, P and K content of crops and soils. *Bioresource Technology* 96: 955-961.
- Warman P.R., Termeer W.C. (2005b): Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn and B of crops and soils. *Bioresource Technology* 96: 1029-1038.
- Weber J., Karczewska A., Drozd J., Licznar M., Jamroz E., Kocowicz A. (2007): Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal waste composts. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 1294-1302.
- Wei Y., Liu Y. (2005): Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study. *Chemosphere* 59: 1257-1265.
- Weiland P. (2003a): *Biologie der Biogaserzeugung*. ZNR Biogastagung, Bad Sassendorf-Ostlingshausen.
- Weiland P. (2003b): Production and Energetic Use of Biogas from Energy Crops and Wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109: 263-274.
- Weiland P. (2006): Biomass Digestion in Agriculture: A Successful Pathway for the Energy Production and Waste Treatment in Germany. *Eng. Life Sci.* 6: 302-309.
- Weiland P. (2010): Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* 85: 849-860.
- Weißbach F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63: 356-358a.
- Wen G., Bates T.E., Voroney R.P., Winter J.P., Schellenberg M.P. (1999): Influence of application of sewage sludges, and sludge and manure composts on plant Ca and Mg concentration and soil extractability in field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55: 51-61.
- Wen G., Bates T.E., Voroney R.P., Yamamoto T., Chikushi J., Curtin D. (2002): A yield control approach to assess phytoavailability of Zn and Cu in irradiated, composted sewage sludges and composted manure in field experiments: I Zinc. *Plant and Soil* 246: 231-240.
- Wen G., Bates T.E., Voroney R.P., Yamamoto T., Chikushi J., Curtin D. (2002): A yield control approach to assess phytoavailability of Zn and Cu in irradiated, composted sewage sludges and composted manure in field experiments: II Copper. *Plant and Soil* 246: 241-248.
- Wen G., Winter J.P., Voroney R.P., Bates T.E. (1997): Potassium availability with application sewage sludge, and sludge and manure composts in field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47: 233-241.
- Witter E., Lopez-Real J. (1988): Nitrogen Losses During the Composting of Sewage Sludge, and the Effectiveness of Clay Soil, Zeolite, and Compost in Absorbing the Volatilized Ammonia. *Biological Wastes* 23: 279-294.
- Wong J.W.C., Selvam A. (2009): Growth and Elemental Accumulation of Plants Grown in Acidic Soil Amended With Coal Fly Ash-Sewage Sludge Co-compost. *Arch Environ Contam Toxicol* 57: 515-523.

- Zaman M., Matsushima M., Chang S.X., Inubushi K., Nguyen L., Goto S., Kaneko F., Yoneyama T. (2004): Nitrogen mineralization, N₂O production and soil microbiological properties as affected by long-term applications of sewage sludge composts. *Biol. Fertil. Soils* 40: 101-109.
- Zaman, M., Di H.J., Sakamoto K., Goto S., Hayashi H., Inubushi K. (2002): Effects of Sewage Sludge Compost and Chemical Fertilizer Application on Microbial Biomass and N Mineralization Rates. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48 (2): 195-201.
- Zhang M., Heaney D., Henriquez B., Solberg E., Bittner E. (2006): A Four-Year Study on Influence of Biosolids/MSW Cocompost Application in Less Productive Soils In Alberta: Nutrient Dynamics. *Compost Science & Utilization* 14 (1): 68-80.
- Zheng G. D., Chen T. B., Gao D., Luo W. (2004): Dynamic of lead speciation in sewage sludge composting. *Water Science and Technology* 50: 75-82.
- Zhou L. X., Wong J. W. C. (2001): Effect of Dissolved Organic Matter from Sludge and Sludge Compost on Soil Copper Sorption. *J. Environ. Qual.* 30: 878-883.
- Zorn W., Heß H., Albert E., Kolbe H., Kerschberger M., Franke G. (2007): Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter Fachlicher Praxis“. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Heft 7.
- Zorpas A.A., Kapetanios E., Zorpas G.A., Karlis P., Vlyssides A., Haralambous I., Loizidou M. (2000): Compost produced from organic fraction of municipal solid waste, primary stabilized sewage sludge and natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials B77*: 149-159.

Internetquellen

- http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/klaerschlamverordnung_neufassung.pdf: Neufassung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV). 2.Arbeitsentwurf. (20.08.2010).
- http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2009/12/PD09_504_32214.psml (21.06.2011).
- http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2009/12/PD09_504_32214.psml Pressemitteilung Nr.504 (22.12.2009).
- https://www.genesis.destatis.de/genesis/online.jsessionid=6FED3017070BE2DE535D990F1ADFCC9F.tomcat_GO_2_1?operation=previous&levelindex=2&levelid=1332588112322&step=2 (Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2012): Trockenmasse des aus Abwasserbehandlungsanlagen direkt entsorgten Klärschlammes: Bundesländer, Jahre, Entsorgungsarten des Klärschlammes (24.03.2012).
- http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abfkl_rv_1992/gesamt.pdf: Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (15.04.1992) BGBl . I S. 912. Stand: Zuletzt geändert durch Art. 9 V v. 9.11.2010 I 1504

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Versuch 1 - Aufbau des Versuchsfeldes auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen (hier: Anlage der Sickerwassersammler)	159
Anlage 2	Versuch 1 – Blick auf das Versuchsfeld auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen (hier: Juli 2008)	159
Anlage 3	Versuch 2 – Versuchsanlage bei der Firma ROMONTA in Amsdorf	160
Anlage 4	Versuch 2 – Versuchsanlage der Sickerwassersammler auf dem Julius-Kühn-Feld der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg	160
Anlage 5	Tukey HSD-Test Erträge der angebauten Fruchtarten von Versuch 1	161
Anlage 6	Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten von Versuch 1 (Teil 1)	162
Anlage 7	Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten von Versuch 1 (Teil 2)	163
Anlage 8	Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 1 (Teil 1)	164
Anlage 9	Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 1 (Teil 2)	165
Anlage 10	Bodenanalytik von Versuch 1	166
Anlage 11	Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 1 (Teil 1)	167
Anlage 12	Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 1 (Teil 2)	168
Anlage 13	Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten von Versuch 2	169
Anlage 14	Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 2	170
Anlage 15	Bodenanalytik von Versuch 2	171
Anlage 16	Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 2, Feld 5	172
Anlage 17	Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 1 (Teil 1)	173
Anlage 18	Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 1 (Teil 2)	174
Anlage 19	Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Energiegras (Versuch 1)	175
Anlage 20	Rohnährstoffgehalte sowie Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 2	176
Anlage 21	Rohnährstoffgehalte sowie Biogas- und Methanausbeuten von Energiegras (Versuch 2)	177
Anlage 22	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Ss bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN	178
Anlage 23	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su2 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest	178
Anlage 24	Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN	179

Anlage 25	FK, nFK und PWP der Bodenarten S, Su2 und Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN und Vegetationstest	180
Anlage 26	Anlage Vegetationstest im Juli 2008	181
Anlage 27	Deskriptive Statistik NO ₃ -N-Konzentration und –Fracht, NH ₄ -N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1	182
Anlage 28	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 1	183
Anlage 29	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 2	184
Anlage 30	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 3	185
Anlage 31	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 4	186
Anlage 32	Deskriptive Statistik NO ₃ -N-Konzentration und –Fracht, NH ₄ -N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Mai 2008 von Versuch 1	187
Anlage 33	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 1	188
Anlage 34	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 2	189
Anlage 35	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 3	190
Anlage 36	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 4	191
Anlage 37	NO ₃ -N-, NH ₄ -N-Konzentrationen, pH-Wert, Leitfähigkeit und kumulierte Sickerwassermenge der Sickerwassersammler im Zeitraum April 2009 bis März 2010	192
Anlage 38	Tukey HSD-Test NO ₃ -N, NH ₄ -N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration der neu angelegten Sickerwassersammler von Versuch 1	193
Anlage 39	Deskriptive Statistik NO ₃ -N-Konzentration und –Fracht, NH ₄ -N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration und Sickerwassermenge von Versuch 2	194
Anlage 40	Tukey HSD-Test NO ₃ -N-Konzentration und –Fracht, NH ₄ -N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit und Chloridkonzentration von Versuch 2 – Teil 1	195
Anlage 41	Tukey HSD-Test NO ₃ -N-Konzentration und –Fracht, NH ₄ -N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit und Chloridkonzentration von Versuch 2 – Teil 2	196
Anlage 42	Literaturübersicht Sickerwasserqualität bei Einsatz von KS, Abfall- und Grünkompost	197

Anlage 1 Versuch 1 - Aufbau des Versuchsfeldes auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen (hier: Anlage der Sickerwassersammler)



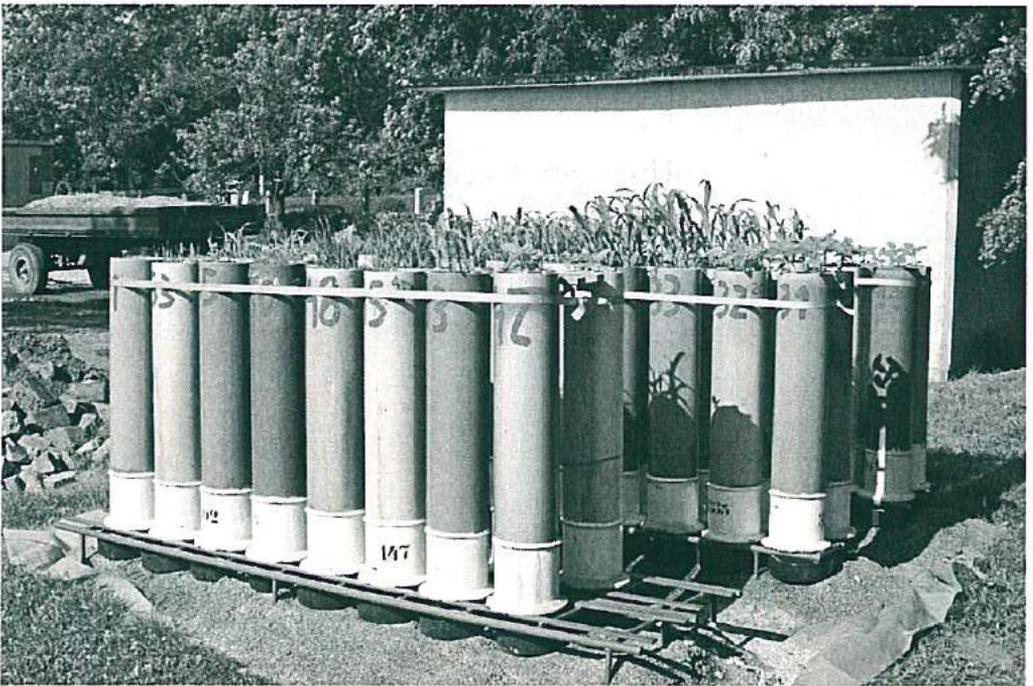
Anlage 2 Versuch 1 - Blick auf das Versuchsfeld auf der Kalirückstandshalde in Sondershausen (hier: Juli 2008)



Anlage 3 Versuch 2 – Versuchsanlage bei der Firma ROMONTA in Amsdorf



Anlage 4 Versuch 2 – Versuchsanlage der Sickerwassersammler auf dem Julius-Kühn-Feld der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg



Anlage 5 Tukey HSD-Test Erträge der angebauten Fruchtarten von Versuch 1

		Senf	Roggen	Weizen	Sudangras	Mais	Raps	Energiegras
FM	70cm-50Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,001		,022
	70cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,029
	100cm-0Vol%KSK	1,000	1,000	,483	1,000	1,000		,999
	100cm-50Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,001
	100cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,000
	70cm-50Vol%KSK	,965	,662	,401	,051	,061	,769	1,000
	100cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,001		,064
	100cm-50Vol%KSK	,999	,000	,194	,997	,281	,025	,911
	100cm-75Vol%KSK	,204	,599	,018	,036	,002	,006	,817
	70cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,080
TM	100cm-0Vol%KSK	,835	,018	,997	,134	,962	,154	,874
	100cm-50Vol%KSK	,613	1,000	,598	1,000	,694	,039	,763
	100cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,003
	100cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,002
	100cm-50Vol%KSK	,098	,022	,854	,098	,245	,878	1,000
	70cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,001	,008		,313
	70cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,271
	100cm-0Vol%KSK	1,000	1,000	,260	1,000	1,000		,998
	100cm-50Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,064
	100cm-75Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,014
TM	70cm-75Vol%KSK	,802	,170	,369	,027	,767	,071	1,000
	100cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,002	,009		,586
	100cm-50Vol%KSK	,850	,002	,265	,624	,796	,004	,971
	100cm-75Vol%KSK	,985	,926	,017	,037	,068	,000	,759
	100cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,531
	70cm-75Vol%KSK	,192	,376	1,000	,489	1,000	,464	,983
	100cm-50Vol%KSK	,890	,655	,623	1,000	,594	,069	,807
	100cm-0Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,179
	100cm-50Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000		,050
	100cm-75Vol%KSK	,477	,020	,751	,574	,558	,635	,993

Anlage 6 Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten von Versuch 1 (Teil 1)

Fruchtart	Mächtigkeit [cm]	Zusammensetzung KSK		TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	[mg/kg]					Pb
		Vo[%]									As	Ni	Cr	Ni	As	
Senf	70	0	95,6	41,1	0,16	31	4,8	42	535	0,96	1,7	0,23	0,15	0,0020	1	
	70	50	95,5	39,0	45,3	53	6,7	70	618	1,2	12,3	0,3	0,14	0,0023	1,3	
	70	75	95,4	39,5	34,7	84	8,4	87	291	0,97	4,8	0,2	0,13	0,0025	0,84	
Roggen / Weizen	100	0	95,6	34,8	0,54	42	5,7	41	653	1,3	15,8	0,32	0,17	0,0029	1,2	
	100	50	95,5	42,2	61	63	8,6	65	778	1,5	2	0,34	0,16	0,0034	1,4	
	100	75	95,4	39,9	17,9	82	7,3	80	362	0,65	2,8	0,21	0,15	0,0043	0,89	
Weizen	70	0	93,4	44,7	1,1											
	70	50	93,7	45,0	1,9											
	70	75	94,8	45,1	3,2											
Weizen	100	0	95,5	44,1	0,2	28,38	2,63	12,58	63	0,17	1,36	0,04	0,04	0,0397	0,15	
	100	50	96,2	42,2	12,3											
	100	75	94,7	44,3	1	33,00	2,90	21,00	37	0,06	2,26	0,05	0,02	0,0030	0,10	
Weizen	70	0	94,8	41,5	0,01											
	70	50	94,2	43,8	0,1											
	70	75	94,0	43,6	0,2											
Weizen	100	0	94,1	43,3	0,01	33,10	2,05	17,08	104	0,24	0,33	0,05	0,02	0,0151	0,28	
	100	50	93,9	43,5	0,1											
	100	75	93,9	43,5	0,01	23,00	2,30	32,00	104	0,23	0,38	0,07	0,02	0,0050	0,30	

Anlage 7 Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauteen Fruchtarten von Versuch 1 (Teil 2)

Fruchtart	Mächtigkeit [cm]	Mächtigkeit zumischung KSK [Vol%]	TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	Cr	Ni	As	Cd	Hg	Pb
Sudangras	70	0	96,1	39,9	2,4										
	70	50	95,6	43,4	3,3										
	70	75	97,2	43,3	8,1										
	100	0	94,5	42,2	3	99,95	7,93	50,57	508	2,65	1,77	0,21	0,29	0,0113	0,79
	100	50	96,4	43,0	3,1										
	100	75	96,3	43,0	1,5	54,00	3,70	64,00	73	0,64	0,38	0,07	0,11	0,0040	0,23
Mais	70	0	95,5	44,3	0,03	62,35	6,38	65,20	1043	1,83	2,15	0,46	0,09	0,0110	1,43
	70	50	94,2	45,3	0,08	26,62	3,76	47,28	295	0,74	0,67	0,12	0,06	0,0064	0,70
	70	75	94,9	45,3	2,31	30,55	4,45	85,34	166	0,42	0,39	0,11	0,09	0,0050	0,55
	100	0	94,6	44,4	0,05	38,35	4,85	37,54	394	0,80	1,01	0,18	0,08	0,0059	0,58
	100	50	94,3	45,4	0,12	16,56	4,09	43,71	111	0,30	0,27	0,07	0,03	0,0011	0,31
	100	75	95,3	44,9	0,15	36,54	6,26	99,35	181	0,43	0,44	0,11	0,08	0,0055	0,47
Räps	70	0	95,6	44,9	8,86	24,28	3,58	47,57	129	0,67	0,55	0,13	0,09	0,0147	0,66
	70	50	95,5	44,2	5,64	34,67	3,23	41,15	121	0,33	0,42	0,13	0,07	0,0027	0,62
	70	75	95,7	43,5	9,41	29,34	4,16	66,86	187	0,46	0,95	0,12	0,08	0,0037	0,61
	100	0	96,3	45,6	0,43	27,24	3,38	29,63	165	0,44	0,54	0,09	0,09	0,0059	0,60
	100	50	95,6	43,9	2,96	25,14	2,94	35,02	99	0,30	0,29	0,11	0,06	0,0051	0,51
	100	75	95,3	43,8	9,80	21,03	3,84	48,67	136	0,36	0,43	0,12	0,06	0,0063	0,65

Anlage 8 Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 1 (Teil 1)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung [Vol%]	KSK Erntetermin	TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	Cr	Ni	As	Cd	Hg	Pb		
70	0	Mai 2008	96,5	44,7	1,2												
		Aug 2008	94,2	43,7	0,9												
		Jun 2009	92,7	46,0	0,1	33,69	1,91	13,49	51,5	0,15	0,56	0,04	0,02	0,0000	0,15		
		Nov 2009	96,4	44,4	0,1	144,18	5,04	33,03	807,2	3,13	1,58	0,31	0,11	0,0194	4,56		
70	50	Nov 2007	95,8	44,6	6,9	114,00	15,00	45,00	351,0	1,90	1,70	0,19	0,11	0,0041	1,30		
		Mai 2008	96,0	44,5	0,0												
		Aug 2008	94,9	43,9	1,0												
		Jun 2009	92,8	45,6	3,4	33,42	5,97	31,98	128,1	0,37	1,05	0,06	0,03	0,0076	0,36		
70	75	Nov 2009	94,5	45,7	2,2	91,78	10,10	53,72	779,0	2,71	1,54	0,32	0,09	0,0304	5,73		
		Nov 2007	95,4	45,2	4,3	147,00	13,00	37,00	235,0	1,20	1,50	0,14	0,04	0,0056	0,95		
		Mai 2008	95,5	44,5	1,2												
		Aug 2008	93,9	44,1	1,6												
70	75	Jun 2009	92,7	45,9	1,7	30,17	5,72	30,15	62,7	0,20	0,36	0,04	0,03	0,0082	0,19		
		Nov 2009	97,0	45,0	2,8	80,42	10,27	66,20	1139,0	3,43	2,69	0,42	0,09	0,0291	5,16		

Anlage 9 Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 1 (Teil 2)

Mächtigkeit [cm]	Zumischung [Vol%]	KSK Erntetermin	TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	Cr	Ni	As	Cd	Hg	Pb
											[mg/kg]				
100	0	Mai 2008	94,3	44,0	0,2	75,12	3,95	19,05	128,0	0,95	109,78	0,12	0,01	0,0423	0,42
		Aug 2008	94,1	43,9	4,9	75,10	6,01	29,62	124,8	0,29	0,82	0,10	0,09	0,0217	0,35
		Jun 2009	93,3	46,1	0,1	40,05	2,33	13,94	37,0	0,14	0,58	0,02	0,04	0,0064	0,16
		Nov 2009	96,6	45,6	0,3	91,64	5,01	30,54	369,6	2,11	1,04	0,18	0,07	0,0197	1,86
100	50	Nov 2007	96,1	44,8	11,2	40,00	13,00	35,00	211,0	0,75	2,20	0,12	0,07	0,0290	0,69
		Mai 2008	94,7	43,9	5,7										
		Aug 2008	94,3	43,8	3,0										
		Jun 2009	92,7	45,7	2,9	23,14	5,13	24,79	85,6	0,29	0,40	0,04	0,03	0,0091	0,33
		Nov 2009	96,5	44,9	2,2	90,78	10,04	56,96	990,4	5,23	2,13	0,42	0,09	0,0335	4,64
100	75	Nov 2007	95,3	44,5	10,4	107,00	15,00	40,00	320,0	1,20	1,10	0,18	0,04	0,0036	0,96
		Mai 2008	94,4	44,0	0,4	79,00	5,70	26,00	48,0	0,16	0,93	0,05	0,02	0,1990	0,24
		Aug 2008	94,9	43,3	0,5	21,00	5,60	28,00	50,0	0,19	5,65		0,04	0,0120	0,22
		Jun 2009	92,4	45,5	2,8	25,23	5,58	29,97	79,3	0,29	0,43	0,05	0,03	0,0091	0,22
		Nov 2009	96,3	44,9	3,1	122,68	9,79	79,58	1052,0	4,26	2,70	0,47	0,13	0,0318	3,59

Anlage 10 Bodenanalytik von Versuch 1

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	Feld		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
				[mg/kg]							
70	0	1	MW	12,35	8,67	2,32	33,48	3,36	0,033	0,008	3,58
			SD	5,05	2,39	0,70	6,25	2,17	0,022	0,006	0,48
		2	MW	5,36	3,54	0,66	21,48	3,03	0,020	0,006	1,76
			SD								
		3	MW	11,27	8,01	2,81	27,74	2,95	0,039	0,006	3,22
			SD	7,69	4,90	1,82	9,71	2,00	0,031	0,002	1,61
70	50	1	MW	42,29	25,08	48,32	198,44	5,91	0,316	0,020	44,68
			SD	4,68	0,30	6,11	26,53	1,01	0,072	0,011	11,40
		2	MW	55,49	30,57	75,87	261,54	8,03	0,402	0,021	38,15
			SD								
		3	MW	48,02	27,70	48,67	216,49	7,22	0,333	0,019	31,34
			SD	4,26	2,70	10,31	37,52	1,64	0,096	0,001	5,58
70	75	1	MW	55,64	28,65	85,39	405,91	6,72	0,565	0,032	47,57
			SD	4,16	0,80	7,90	98,44	0,97	0,069	0,010	6,32
		2	MW	56,80	26,01	91,03	358,96	6,46	0,488	0,025	52,68
			SD								
		3	MW	55,97	27,66	91,83	359,76	6,33	0,579	0,031	49,82
			SD	2,65	0,68	6,01	11,86	0,42	0,106	0,002	4,59
100	0	1	MW	21,53	15,85	8,16	41,30	5,35	0,076	0,005	9,36
			SD	3,68	0,95	0,49	1,55	1,28	0,008	0,005	0,65
		2	MW	20,31	14,13	7,45	35,45	4,86	0,063	0,024	9,55
			SD								
		3	MW	12,06	8,71	3,15	52,69	3,81	0,057	0,008	27,61
			SD	6,69	3,84	0,84	10,11	1,82	0,033	0,002	4,64
100	50	1	MW	53,57	29,71	43,31	199,31	7,24	0,396	0,014	29,59
			SD	1,24	0,39	2,49	7,31	0,83	0,255	0,007	1,44
		2	MW	47,15	30,74	37,23	157,78	6,70	0,221	0,010	21,96
			SD								
		3	MW	69,71	27,76	44,12	139,94	7,64	0,202	0,012	19,98
			SD	20,33	2,90	7,47	30,19	0,53	0,019	0,003	3,86
100	75	1	MW	47,27	23,07	73,68	291,65	5,99	0,498	0,035	39,89
			SD	1,96	0,64	5,72	16,24	1,10	0,081	0,013	8,69
		2	MW	43,21	20,83	55,11	219,31	7,39	0,345	0,041	31,57
			SD	6,33	1,40	4,27	22,12	2,26	0,015	0,022	4,02
		3	MW	43,93	21,78	67,68	279,59	6,33	0,493	0,031	45,14
			SD	4,77	2,15	11,40	16,13	0,79	0,172	0,010	10,76

Anlage 11 Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 1 (Teil 1)

	pH-Wert	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ni	C _t	P _{verf}	K _{verf}	Mg _{verf}	P _t	K _t	Mg _t	Na
70cm-0Vol%KSK	,001	,545	,021	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
70cm-50Vol%KSK	,038	,844	,011	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,018	,000	,000
70cm-75Vol%KSK	,986	1,000	1,000	1,000	,995	1,000	1,000	1,000	1,000	,956	,825	,998
100cm-0Vol%KSK	,018	,931	,582	,001	,002	,000	,000	,000	,000	,000	,001	,000
100cm-50Vol%KSK	,252	,746	,271	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,011	,000	,000
100cm-75Vol%KSK	,601	,995	1,000	,001	,000	,451	,009	,000	,000	,593	,998	,026
70cm-0Vol%KSK	,000	,508	,024	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,003	,002	,000
70cm-50Vol%KSK	,789	,972	,460	,430	,342	,234	,884	,002	,007	,951	,942	,916
70cm-75Vol%KSK	,143	,999	,797	,001	,000	,968	,898	,047	,000	,716	,997	,773
100cm-0Vol%KSK	,009	,816	,013	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,109	,005	,000
100cm-50Vol%KSK	,999	1,000	,312	,000	,000	,004	,001	,000	,000	,168	,996	,196
100cm-75Vol%KSK	,925	1,000	,638	1,000	,973	,886	,095	,051	,183	1,000	,943	,332
100cm-0Vol%KSK	,004	,912	,619	,002	,007	,000	,000	,000	,000	,000	,017	,000
100cm-50Vol%KSK	,076	,711	,298	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,072	,001	,000
100cm-75Vol%KSK	,789	,998	,992	,000	,000	,052	,309	,000	,000	,240	,738	,999

Anlage 12 Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 1 (Teil 2)

	Ca	S	Fe	Salzgehalt	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
70cm-0Vol%KSK	,000	,003	,000	,005	,003	,000	,000	,000	,012	,046	,129	,002
70cm-50Vol%KSK	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,058	,000	,001	,000
70cm-75Vol%KSK	,037	1,000	,970	1,000	1,000	1,000	1,000	,707	,960	1,000	,999	,006
100cm-0Vol%KSK	,002	,077	,000	,224	,000	,000	,000	,000	,006	,476	,726	,079
100cm-50Vol%KSK	,000	,000	,003	,002	,003	,000	,000	,000	,029	,001	,000	,000
100cm-75Vol%KSK	,004	,105	,945	,320	,888	1,000	,000	,000	,953	,120	,138	,045
70cm-50Vol%KSK	,261	,003	,000	,006	,003	,000	,000	,000	,055	,065	,224	,982
70cm-75Vol%KSK	,901	,693	,937	,504	,098	1,000	,981	,006	,998	,676	,762	,365
100cm-0Vol%KSK	,000	,772	,305	1,000	,988	,142	,057	,012	,927	,380	,076	,119
100cm-50Vol%KSK	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,000	,000	,225	,000	,002	,013
100cm-75Vol%KSK	,000	,004	,476	,008	,475	1,000	,000	,000	,810	,008	,013	,001
100cm-0Vol%KSK	,767	,718	,813	,487	,496	,146	,012	,002	1,000	,878	1,000	,928
100cm-50Vol%KSK	,835	,094	,000	,251	,000	,000	,000	,002	,027	,587	,891	,740
100cm-75Vol%KSK	,000	,000	,018	,003	,003	,000	,000	,000	,145	,001	,001	,031
100cm-0Vol%KSK	,000	,096	,054	,333	,018	,135	,014	,000	,732	,024	,005	,002

Anlage 13 Pflanzliche Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten von Versuch 2

Fruchtart	Zumischung KSK [Vol%]	TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	Cr [mg/kg]	Ni	As	Cd	Hg	Pb
Sonnenblume	0	95,2	43,3	12,7	16,21	8,65	46,66	95	0,20	0,48	0,07	0,04	0,0345	0,40
	50	95,1	42,4	10,2										
	75	94,7	44,4	12,2	44,06	9,22	64,87	84	0,27	0,44	0,06	0,09	0,0341	0,54
Mais	0	94,7	44,0	5,7	19,45	4,50	58,36	106	0,13	0,24	0,08	0,04	0,0131	0,18
	50	94,9	43,0	7,2										
	75	93,6	44,0	3,5	38,71	4,27	51,45	34	0,13	0,19	0,06	0,06	0,0073	0,32
Sudangras	0	95,7	43,6	6,9	30,20	7,92	92,06	62	0,23	0,73	0,07	0,13	0,0156	0,42
	50	95,2	43,9	3,1										
	75	95,6	43,4	3,9	101,49	8,90	140,08	65	0,25	0,69	0,07	0,15	0,0213	0,52
Sommerrap	0	92,9	40,7	23,35	24,69	6,12	58,97	37	0,12	0,33	0,05	0,12	0,0158	0,41
	50	92,8	43,4	13,03	21,23	5,73	64,59	39	0,19	0,35	0,07	0,10	0,0143	0,36
	75	94,1	43,3	12,11	19,53	6,07	80,13	51	0,21	0,38	0,07	0,12	0,0106	0,42
Zuckerhirse	0	93,9	44,6	17,41	16,11	10,49	86,09	26	0,09	0,29	0,04	0,15	0,0033	0,26
	50	94,0	45,6	5,51	14,15	9,57	113,24	25	0,11	0,25	0,04	0,08	0,0045	0,26
	75	93,5	46,7	4,21	13,51	9,61	114,63	58	0,18	0,25	0,05	0,06	0,0029	0,39
Sommergerste	0	93,1	44,9	3,73	11,12	6,75	49,66	17	0,07	0,14	0,02	0,03	0,0106	0,10
	50	92,5	44,6	2,32	14,22	6,04	93,33	16	0,08	0,14	0,03	0,03	0,0093	0,13
	75	91,6	44,6	2,66	18,83	8,03	116,74	40	0,16	1,27	0,04	0,05	0,0114	0,27
Sommertriticale	0	92,0	45,6	0,48	7,63	3,73	44,27	17	0,08	0,22	0,03	0,02	0,0084	0,14
	50	93,0	46,0	1,85	7,52	5,67	66,29	30	0,11	0,40	0,04	0,04	0,0107	0,20
	75	92,9	45,7	1,66	7,92	5,84	74,19	16	0,08	0,24	0,02	0,04	0,0069	0,14

Anlage 14 Pflanzliche Inhaltsstoffe des Energiegrases von Versuch 2

Zumischung KSK [Vol.%]	Erntetermin	TS [%]	C [%]	Nitrat [g/kg]	Mn	Cu	Zn	Al	Cr [mg/kg]	Ni	As	Cd	Hg	Pb
0	Aug 2008	95,5	43,2	3,3	35,14	7,05	47,65	194,5	0,32	1,26	0,14	0,08	0,0597	0,64
	Jun 2009	92,6	46,4	2,4	13,20	5,58	28,80	25,3	0,09	0,43	0,03	0,03	0,0178	0,24
	Nov 2009	96,0	46,8	1,1	40,48	7,38	60,22	135,2	0,54	0,64	0,14	0,07	0,0431	1,34
50	Aug 2008	95,7	43,0	4,3										
	Jun 2009	91,6	46,2	3,5	12,32	7,55	48,07	24,8	0,10	0,51	0,03	0,04	0,0153	0,23
	Nov 2009	96,0	46,6	1,7	38,81	9,93	51,34	147,9	0,62	0,81	0,11	0,07	0,0421	1,11
75	Aug 2008	95,3	44,2	4,8	66,22	10,79	59,61		0,77	1,52	0,23	0,07	0,0472	1,58
	Jun 2009	93,0	45,7	4,9	16,74	7,82	47,75	37,1	0,14	0,48	0,05	0,04	0,0142	0,25
	Nov 2009	96,2	46,4	1,9	27,77	9,07	67,93	102,9	0,44	0,50	0,07	0,06	0,0295	0,98

Anlage 15 Bodenanalytik von Versuch 2

Zumischung [Vol%]	KSK	Feld	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
			[mg/kg]							
0	MW	2	3,32	4,30	4,27	12,99	3,22	0,025	0,004	3,63
	MW	5	3,82	3,69	3,76	12,39	3,23	0,027	0,008	3,71
	SD		0,60	0,45	0,49	0,34	1,08	0,004	0,011	0,40
50	MW	2	6,29	4,98	14,31	65,02	3,67	0,109	0,006	11,30
	MW	5	5,98	4,77	9,54	40,00	3,59	0,070	0,006	7,10
	SD		1,07	0,92	3,84	16,76	0,25	0,023	0,005	2,44
75	MW	2	6,92	6,01	16,57	76,22	3,58	0,115	0,006	22,70
	MW	5	11,81	6,57	28,21	136,37	3,44	0,199	0,014	21,24
	SD		6,81	2,11	20,04	95,72	0,66	0,094	0,013	4,90

Anlage 16 Tukey HSD-Test – Chemische Eigenschaften des Bodens von Versuch 2, Feld 5

	pH-Wert	NO ₃ -N	NH ₄ -N	N _t	C _t	P _{vert}	K _{vert}	Mg _{vert}	P _t	K _t	Mg _t	Na
Nullv	,004	1,000	,997	,976	,960	,545	,996	,430	,941	1,000	,650	,920
KSK75	,001	1,000	,997	,202	,189	,019	,775	,055	,063	,977	,123	,241
KSK50	,633	1,000	1,000	,428	,449	,211	,926	,619	,193	,982	,687	,626

	Ca	S	Fe	Salzgehalt	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
Nullv	,634	,998	,831	,890	,911	,758	,939	,936	,943	,796	1,000	,581
KSK75	,025	,863	,064	,439	,067	,062	,060	,040	,991	,008	,997	,000
KSK50	,211	,955	,293	,902	,233	,349	,186	,131	,998	,045	,992	,001

Anlage 17 Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 1 (Teil 1)

Fruchtart	Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	Rohasche	Rohprotein [%]	Rohfett	Rohfaser	Biogas		Methan	
							[%]	l/kg oTS	l/kg oTS	[m³/ha]
Senf	70	0	9,0	13,6	2,1	17,7	477	279	549 ± 27	321 ± 16
	70	50	9,0	21,3	2,2	25,6	466	280	2321 ± 236	1398 ± 142
	70	75	9,0	23,4	2,1	36,5	453	275	1973 ± 446	1199 ± 271
	100	0	9,0	13,1	1,7	31,4	462	270	589 ± 244	344 ± 142
	100	50	9,0	21,6	1,9	22,5	468	282	2605 ± 643	1568 ± 387
	100	75	9,0	18,3	1,9	25,7	466	277	2172 ± 93	1292 ± 55
Roggen / Weizen	70	0	7,0	6,9	1,5	35,8	492	279	716 ± 390	406 ± 221
	70	50	7,6	8,9	2,1	36,1	486	278	3320 ± 571	1899 ± 326
	70	75	7,2	10,0	2,1	36,1	489	281	4216 ± 589	2419 ± 338
	100	0	3,6	4,6	1,2	37,5	530	298	768 ± 168	431 ± 94
	100	50	13,9	15,3	2,3	29,0	416	244	3872 ± 705	2272 ± 413
	100	75	8,1	6,2	1,3	38,8	482	272	3597 ± 383	2032 ± 216
Weizen	70	0	12,1	5,9	1,3	29,4	401	227	525 ± 147	297 ± 83
	70	50	6,5	6,3	1,6	28,9	455	258	5286 ± 851	2994 ± 482
	70	75	6,3	8,4	1,7	22,9	459	262	6386 ± 1191	3643 ± 679
	100	0	6,5	6,4	1,6	22,2	459	260	1799 ± 915	1019 ± 518
	100	50	6,1	8,2	1,9	18,9	464	265	6579 ± 744	3753 ± 424
	100	75	7,4	5,9	1,7	26,3	448	254	6953 ± 680	3935 ± 385

Anlage 18 Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 1 (Teil 2)

Fruchtart	Mächtigkeit [cm]	zumischung ksk		Rohprotein		Rohfett		Rohfaser		Biogas		Methan	
		[Vol%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[l/kg oTS]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]	[m ³ /ha]
Sudangras	70	0	15,5	9,2	2,4	31,0	348	186 ± 60	106 ± 34	199	2898 ± 513	1652 ± 292	
	70	50	9,9	10,7	1,0	28,5	392	4957 ± 2031	227	2898 ± 513	1652 ± 292		
	70	75	9,1	12,0	1,1	27,6	397	2836 ± 1162	227	4957 ± 2031	2836 ± 1162		
	100	0	12,4	12,3	1,3	27,0	368	252 ± 82	145 ± 47	211	3897 ± 571	2208 ± 323	
	100	50	9,4	9,0	0,8	30,0	398	4811 ± 718	224	3897 ± 571	2208 ± 323		
	100	75	9,7	9,9	0,8	29,0	394	701 ± 129	391 ± 72	288	5836 ± 2095	3295 ± 1183	
Mais	70	0	7,7	3,7	1,1	27,9	515	7475 ± 2219	4241 ± 1259	288	725 ± 345	410 ± 195	
	70	50	7,5	6,8	1,5	27,5	514	6224 ± 1249	3510 ± 704	290	725 ± 345	410 ± 195	
	70	75	7,8	8,6	1,3	26,9	508	9354 ± 3546	5291 ± 2005	288	6224 ± 1249	3510 ± 704	
	100	0	9,8	6,6	2,0	27,0	489	725 ± 345	410 ± 195	277	725 ± 345	410 ± 195	
	100	50	6,5	6,9	1,2	27,7	524	6224 ± 1249	3510 ± 704	296	6224 ± 1249	3510 ± 704	
	100	75	8,5	8,0	1,0	30,2	500	9354 ± 3546	5291 ± 2005	283	9354 ± 3546	5291 ± 2005	
Raps	70	0	10,5	11,4	4,6	39,8	431	1933 ± 415	1114 ± 239	253	1933 ± 415	1114 ± 239	
	70	50	9,9	9,4	2,0	43,0	430	2428 ± 233	1390 ± 134	247	1933 ± 415	1114 ± 239	
	70	75	10,8	9,9	0,2	44,7	416	3049 ± 286	1765 ± 166	238	2428 ± 233	1390 ± 134	
	100	0	8,5	9,4	1,8	40,6	447	2768 ± 412	1592 ± 237	257	2768 ± 412	1592 ± 237	
	100	50	10,6	9,1	1,8	46,4	418	3049 ± 286	1765 ± 166	241	2768 ± 412	1592 ± 237	
	100	75	10,5	10,3	2,2	45,1	421	3049 ± 286	1765 ± 166	244	2768 ± 412	1592 ± 237	

Anlage 19		Rohnährstoffgehalte und Biogas- und Methanausbeuten von Energiegras (Versuch 1)							
Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	Rohasche Rohprotein [%]			Rohfaser Rohfett [%]			Biogas [l/kg oTS]	Methan [l/kg oTS]
		Rohasche	Rohprotein	Rohfaser	Rohfett	Rohfaser	Rohfett		
70	0	1. Schnitt 2008/2009	6,7	6,9	1,3	36,1	483,7 ± 9,3	272,9 ± 2,6	
		2. Schnitt 2008/2009	10,9	8,2	2,5	30,7	432,1 ± 3,2	247,8 ± 1,6	
70	50	1. Schnitt 2007	10,0	23,7	4,9	23,8	428,5	258,6	
		1. Schnitt 2008/2009	9,0	9,7	1,7	35,3	456,8 ± 2,6	260,4 ± 1,9	
		2. Schnitt 2008/2009	10,7	15,1	3,8	28,4	432,4 ± 2,7	255,4 ± 2,5	
70	75	1. Schnitt 2007	10,0	23,0	5,0	23,4	429,1	258,5	
		1. Schnitt 2008/2009	8,9	10,5	1,6	35,3	456,7 ± 13,2	260,9 ± 7,0	
		2. Schnitt 2008/2009	11,5	15,7	4,1	28,3	425,5 ± 7,6	252,3 ± 2,3	
100	0	1. Schnitt 2008/2009	7,9	7,9	1,6	32,3	468,5 ± 23,9	265,3 ± 9,8	
		2. Schnitt 2008/2009	9,1	10,5	2,9	32,3	449,9 ± 13,8	260,2 ± 7,5	
100	50	1. Schnitt 2007	10,0	25,8	4,1	23,2	425,4	257,7	
		1. Schnitt 2008/2009	9,9	12,9	1,8	34,3	444,4 ± 24,6	256,1 ± 10,1	
		2. Schnitt 2008/2009	11,3	14,8	3,6	31,1	427,6 ± 4,6	252,1 ± 0,6	
100	75	1. Schnitt 2007	10,0	25,0	4,3	24,2	426,9	258,1	
		1. Schnitt 2008/2009	9,9	10,6	1,6	34,9	447,1 ± 21,8	255,6 ± 10,8	
		2. Schnitt 2008/2009	11,3	15,0	3,7	29,3	426,9 ± 0,2	252,0 ± 1,9	

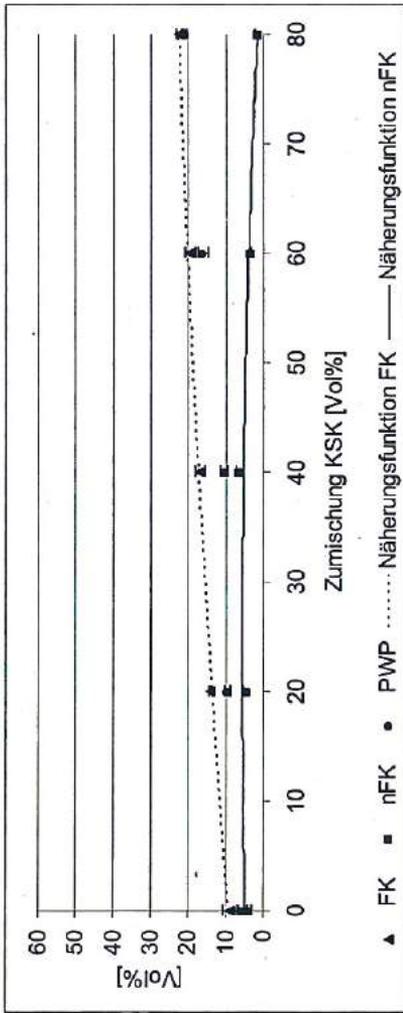
Anlage 20 Rohnährstoffgehalte sowie Biogas- und Methanausbeuten von Versuch 2

Fruchtart	Zumischung KSK [Vol%]	Rohasche	Rohprotein [%]	Rohfett	Rohfaser	Biogas [l/kg oTS]	Methan
Sonnenblume	0	10,8	8,5	6,0	29,4	426,1	248,0
	50	12,4	8,5	4,6	29,2	408,0	236,1
	75	12,9	10,7	11,3	29,2	412,1	248,1
Mais	0	6,7	8,2	2,6	21,0	523,7	298,2
	50	9,5	7,7	1,3	29,0	489,5	277,1
	75	7,1	8,1	2,4	24,2	518,2	294,8
Sudangras	0	7,7	9,4	2,6	27,5	413,4	236,1
	50	7,7	10,1	1,7	23,8	409,9	233,7
	75	8,9	9,1	2,1	27,2	402,5	229,3
Sommerraps	0	15,3	20,7	2,6	32,6	381,0	230,5
	50	13,0	18,4	4,6	32,5	408,9	246,9
	75	11,8	15,8	3,3	35,2	417,0	247,6
Zuckerhirse	0	9,4	18,3	2,3	32,9	390,5	228,8
	50	8,0	14,2	1,5	29,7	404,9	233,5
	75	7,4	15,0	1,8	29,4	410,2	237,2
Sommergerste	0	7,3	10,9	2,1	24,6	440,5	251,5
	50	7,4	10,4	2,0	21,3	446,4	254,3
	75	8,2	11,7	1,9	21,7	434,3	248,2
Sommertriticale	0	4,9	9,8	1,7	24,3	468,3	265,9
	50	5,7	10,0	1,5	26,2	455,0	258,4
	75	5,7	10,1	1,7	27,6	453,8	257,9

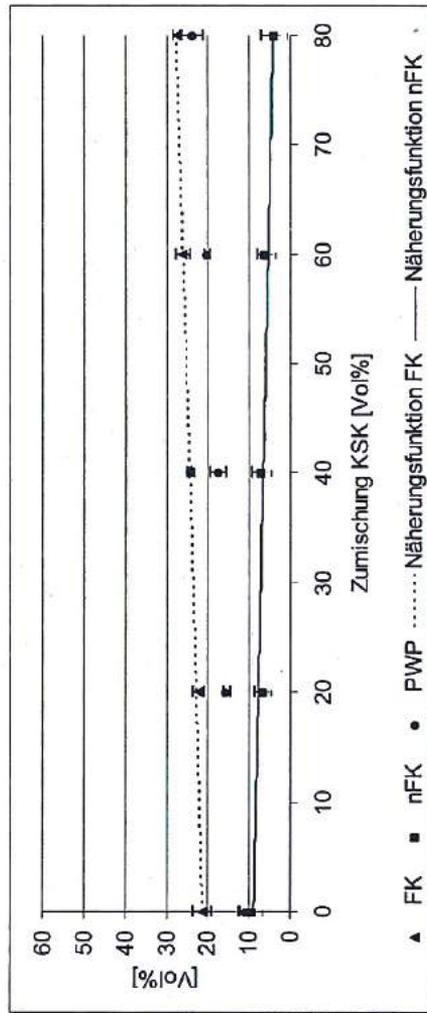
Anlage 21 Rohnährstoffgehalte sowie Biogas- und Methanausbeuten von Energiegras (Versuch 2)

Zumischung KSK [Vol%]	Rohasche				Rohprotein		Rohfett		Rohfaser		Biogas		Methan	
	[Vol%]		[%]		[%]		[%]		[%]		[l/kg oTS]		[l/kg oTS]	
0	1. Schnitt 2008/2009	9,1	9,7	3,0	31,8	455,1 ± 31,7	260,8 ± 15,5							
	2. Schnitt 2009	7,2	15,9	3,5	29,2	466,1	274,9							
50	1. Schnitt 2008/2009	11,1	12,9	3,6	29,8	431,4 ± 28,5	250,4 ± 14,8							
	2. Schnitt 2009	9,5	20,9	4,0	19,3	437,6	263,6							
75	1. Schnitt 2008/2009	11,0	14,0	5,3	27,8	431,8 ± 13,4	253,2 ± 5,3							
	2. Schnitt 2009	8,1	17,3	3,5	26,3	454,6	269,6							

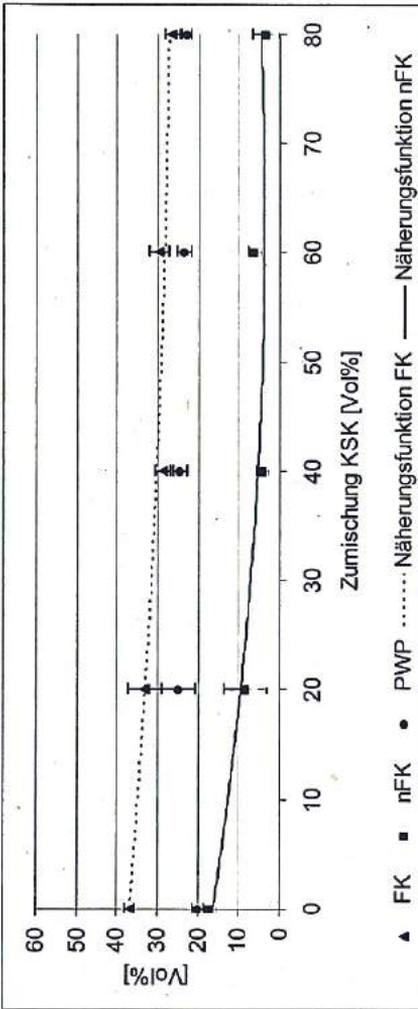
Anlage 22 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Ss bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN



Anlage 23 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su2 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – Vegetationstest



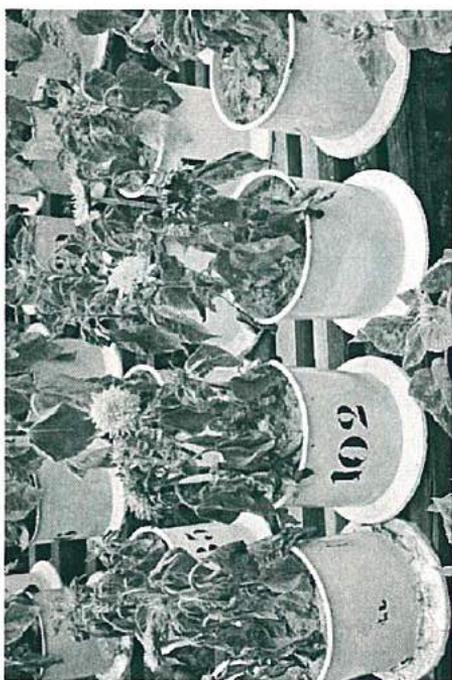
Anlage 24 Darstellung von FK, nFK und PWP der Bodenart Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN



Anlage 25 FK, nFK und PWP der Bodenarten S, Su2 und Su4 bei Zumischung von unterschiedlichen Anteilen von KSK – DIN und Vegetationstest

Bodenart	KSK			DIN			Vegetationstest		
	Zumischung	FK	nFK [Vol%]	FK	PWP	nFK [Vol%]	FK	PWP	nFK
S	0	8,78 ± 1,77	5,17 ± 1,37	3,62 ± 0,42			17,80	6,0 ± 2,4	11,8 ± 2,4
	20	14,04 ± 0,34	4,45 ± 1,01	9,59 ± 0,70			26,35	6,9 ± 1,8	19,4 ± 1,8
	40	16,99 ± 1,34	6,55 ± 0,59	10,44 ± 1,08			31,50	7,9 ± 2,4	23,6 ± 2,4
	60	19,63 ± 1,37	3,47 ± 0,13	16,16 ± 1,40			34,54	9,4 ± 1,2	25,2 ± 1,2
	80	22,53 ± 0,79	1,67 ± 0,56	20,86 ± 0,31			37,80	10,8 ± 2,9	27,0 ± 2,9
Su2	0	21,30 ± 2,22	9,33 ± 2,79	10,77 ± 1,70			29,1	8,2 ± 1,0	20,9 ± 1,0
	20	22,19 ± 1,53	6,67 ± 2,15	15,52 ± 0,86			37,5	10,1 ± 1,9	27,4 ± 1,9
	40	24,40 ± 0,59	6,91 ± 2,28	17,49 ± 1,90			44,3	10,5 ± 4,6	33,8 ± 4,6
	60	25,85 ± 1,74	5,74 ± 2,36	20,12 ± 0,72			45,5	11,3 ± 2,4	34,2 ± 2,4
	80	27,51 ± 0,92	3,83 ± 2,97	23,68 ± 2,62			46,5	13,6 ± 2,1	32,9 ± 2,1
Su4	0	36,76 ± 1,29	16,96 ± 1,46	19,80 ± 1,38			42,70	8,37 ± 1,72	34,33 ± 1,72
	20	33,10 ± 4,06	8,38 ± 5,21	24,72 ± 4,26			45,92	8,77 ± 1,74	37,15 ± 1,74
	40	28,77 ± 2,05	4,25 ± 1,39	24,52 ± 1,71			51,69	9,20 ± 1,94	42,49 ± 1,94
	60	29,68 ± 2,55	6,16 ± 1,66	23,52 ± 1,77			54,70	11,71 ± 3,32	42,99 ± 3,32
	80	26,44 ± 1,86	3,60 ± 3,14	22,85 ± 1,34			48,50	15,85 ± 4,72	32,65 ± 4,72

Anlage 26 Anlage Vegetationstest im Juli 2008



Anlage 27 Deskriptive Statistik NO₃-N-Konzentration und -Fracht, NH₄-N-Konzentration und -Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1

Variante	N	NO ₃ -N mg/l	NH ₄ -N mg/l	pH-Wert	LF mS/cm	Chlorid mg/l
70cm-0Vol%KSK-F1	19	7,9 ± 7,6	0,5 ± 0,7	7,8 ± 0,3	0,6 ± 0,3	30,0 ± 32,7
70cm-0Vol%KSK-F2	20	8,6 ± 8,5	0,4 ± 0,6	7,9 ± 0,2	0,5 ± 0,3	23,1 ± 28,5
70cm-0Vol%KSK-F3	16	5,8 ± 8,0	0,6 ± 1,2	7,9 ± 0,2	0,4 ± 0,1	10,2 ± 13,2
70cm-50Vol%KSK-F1	22	827,2 ± 508,1	24,5 ± 50,1	7,4 ± 0,6	12,3 ± 4,4	1277,0 ± 456,4
70cm-50Vol%KSK-F2	24	710,1 ± 327,7	13,0 ± 37,7	7,5 ± 0,4	11,2 ± 3,9	1088,6 ± 474,0
70cm-50Vol%KSK-F3	23	395,7 ± 233,8	47,6 ± 81,6	7,8 ± 0,4	10,3 ± 2,2	1177,6 ± 266,9
70cm-75Vol%KSK-F1	24	179,3 ± 184,7	449,1 ± 371,9	8,0 ± 0,4	14,0 ± 3,3	1551,8 ± 407,8
70cm-75Vol%KSK-F2	24	268,2 ± 158,9	395,4 ± 298,3	8,0 ± 0,5	12,9 ± 3,9	1480,2 ± 752,0
70cm-75Vol%KSK-F3	22	305,7 ± 141,3	174,5 ± 216,5	7,8 ± 0,3	12,7 ± 3,0	1698,5 ± 701,5
100cm-0Vol%KSK-F1	23	5,4 ± 5,4	0,7 ± 0,9	7,5 ± 0,2	1,8 ± 0,7	170,4 ± 116,9
100cm-0Vol%KSK-F2	23	12,4 ± 11,9	6,8 ± 12,3	7,6 ± 0,3	1,3 ± 1,0	78,1 ± 60,0
100cm-0Vol%KSK-F3	23	52,9 ± 195,1	9,0 ± 41,2	7,6 ± 0,7	1,1 ± 2,0	157,5 ± 373,7
100cm-50Vol%KSK-F1	22	146,3 ± 189,4	322,4 ± 285,6	7,9 ± 0,5	11,7 ± 10,8	1204,6 ± 234,7
100cm-50Vol%KSK-F2	20	132,8 ± 136,5	108,1 ± 128,6	7,7 ± 0,3	8,5 ± 2,8	1130,9 ± 362,4
100cm-50Vol%KSK-F3	24	267,4 ± 190,1	149,4 ± 269,1	7,8 ± 0,3	8,2 ± 3,7	1033,8 ± 502,9
100cm-75Vol%KSK-F1	20	71,0 ± 60,5	248,7 ± 215,7	8,0 ± 0,4	11,0 ± 3,6	1289,4 ± 474,4
100cm-75Vol%KSK-F2	23	124,3 ± 111,6	437,0 ± 289,6	8,0 ± 0,4	13,8 ± 13,8	1126,1 ± 621,6
100cm-75Vol%KSK-F3	23	130,7 ± 113,0	360,7 ± 257,8	7,9 ± 0,3	17,9 ± 24,0	1295,6 ± 397,2

Anlage 28 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 1

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-0Vol%KSK-F1	70cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F1	,000	1,000	,048	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F2	,000	1,000	,619	,001	,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	,000	1,000	1,000	,006	,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	,276	,000	,997	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F2	,002	,000	,999	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F3	,000	,337	1,000	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,481	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	,990	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,958	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,705	,000	1,000	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,867	,963	1,000	,096	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,002	,597	1,000	,105	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,013	,996	,003	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,899	,000	,999	,000	,000
100cm-75Vol%KSK-F3	,850	,000	1,000	,000	,000	
70cm-0Vol%KSK-F2	70cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F1	,000	1,000	,004	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F2	,000	1,000	,185	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	,000	1,000	1,000	,003	,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	,259	,000	1,000	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F2	,002	,000	1,000	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F3	,000	,260	1,000	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,117	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	,791	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,634	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,690	,000	1,000	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,859	,945	,994	,060	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,002	,510	1,000	,064	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,007	1,000	,001	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,892	,000	1,000	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,841	,000	1,000	,000	,000
70cm-0Vol%KSK-F3	70cm-50Vol%KSK-F1	,000	1,000	,002	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F2	,000	1,000	,098	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	,000	1,000	1,000	,003	,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	,342	,000	1,000	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F2	,005	,000	1,000	,000	,000
	70cm-75Vol%KSK-F3	,001	,284	1,000	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,059	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	,611	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,443	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,755	,000	1,000	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,892	,952	,965	,062	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,005	,539	,999	,067	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,008	1,000	,001	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,921	,000	1,000	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,881	,000	1,000	,000	,000

Anlage 29 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 2

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-50Vol%KSK-F1	70cm-50Vol%KSK-F2	,848	1,000	,999	1,000	,993
	70cm-50Vol%KSK-F3	,000	1,000	,024	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	,000	,000	,000	1,000	,801
	70cm-75Vol%KSK-F2	,000	,000	,000	1,000	,986
	70cm-75Vol%KSK-F3	,000	,467	,043	1,000	,119
	100cm-0Vol%KSK-F1	,000	1,000	1,000	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,000	1,000	,758	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,000	1,000	,906	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,000	,000	,001	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,000	,994	,301	,958	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,000	,753	,062	,918	,917
	100cm-75Vol%KSK-F1	,000	,018	,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	,000	,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	,000	,005	,536	1,000
70cm-50Vol%KSK-F2	70cm-50Vol%KSK-F3	,000	1,000	,513	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	,000	,000	,008	,998	,036
	70cm-75Vol%KSK-F2	,000	,000	,016	1,000	,194
	70cm-75Vol%KSK-F3	,000	,310	,642	1,000	,001
	100cm-0Vol%KSK-F1	,000	1,000	1,000	,003	,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,000	1,000	1,000	,001	,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,000	1,000	1,000	,001	,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,000	,000	,059	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,000	,973	,979	,999	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,000	,587	,744	,996	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	,000	,008	,011	1,000	,989
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	,000	,014	,999	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	,000	,220	,193	,983
	70cm-50Vol%KSK-F3	70cm-75Vol%KSK-F1	,019	,000	,992	,968
70cm-75Vol%KSK-F2		,723	,000	,998	,999	,695
70cm-75Vol%KSK-F3		,986	,761	1,000	1,000	,012
100cm-0Vol%KSK-F1		,000	1,000	,374	,014	,000
100cm-0Vol%KSK-F2		,000	1,000	,982	,005	,000
100cm-0Vol%KSK-F3		,000	1,000	,935	,005	,000
100cm-50Vol%KSK-F1		,003	,000	1,000	1,000	1,000
100cm-50Vol%KSK-F2		,002	1,000	1,000	1,000	1,000
100cm-50Vol%KSK-F3		,713	,944	1,000	1,000	1,000
100cm-75Vol%KSK-F1		,000	,066	,991	1,000	1,000
100cm-75Vol%KSK-F2		,000	,000	,997	,984	1,000
100cm-75Vol%KSK-F3		,001	,000	1,000	,072	1,000

Anlage 30 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 3

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-75Vol%KSK-F1	70cm-75Vol%KSK-F2	,983	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F3	,753	,000	,981	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	,177	,000	,004	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,237	,000	,163	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,736	,000	,089	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	1,000	,715	1,000	1,000	,375
	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	,000	,654	,516	,153
	100cm-50Vol%KSK-F3	,985	,000	,934	,399	,008
	100cm-75Vol%KSK-F1	,931	,062	1,000	,997	,879
	100cm-75Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	,098
100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	,987	1,000	,954	,888	
70cm-75Vol%KSK-F2	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	,016	,995	1,000	,971
	100cm-0Vol%KSK-F1	,001	,000	,008	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,001	,000	,255	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,020	,000	,148	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,802	,998	1,000	1,000	,797
	100cm-50Vol%KSK-F2	,685	,000	,783	,855	,484
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	,002	,976	,770	,061
	100cm-75Vol%KSK-F1	,083	,514	1,000	1,000	,995
	100cm-75Vol%KSK-F2	,507	1,000	1,000	1,000	,381
	100cm-75Vol%KSK-F3	,593	1,000	1,000	,717	,996
70cm-75Vol%KSK-F3	100cm-0Vol%KSK-F1	,000	,208	,498	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,000	,247	,994	,000	,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,002	,286	,971	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,373	,476	1,000	1,000	,018
	100cm-50Vol%KSK-F2	,272	1,000	1,000	,912	,005
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,850	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	,013	,999	,980	1,000	,185
	100cm-75Vol%KSK-F2	,152	,001	,992	1,000	,002
	100cm-75Vol%KSK-F3	,199	,134	1,000	,688	,187

Anlage 31 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration bis Mai 2008 von Versuch 1 – Teil 4

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
100cm-0Vol%KSK-F1	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,589	,000	,033	,001	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,791	,928	,939	,206	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,001	,443	,603	,223	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,004	,005	,007	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,831	,000	,007	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,764	,000	,140	,000	,000
100cm-0Vol%KSK-F2	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,679	,000	,523	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,857	,952	1,000	,106	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,001	,502	,999	,115	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,005	,182	,002	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,890	,000	,226	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,837	,000	,845	,000	,000
100cm-0Vol%KSK-F3	100cm-50Vol%KSK-F1	,980	,000	,355	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,997	,964	1,000	,096	,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,021	,553	,990	,104	,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,007	,103	,002	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,999	,000	,130	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,997	,000	,699	,000	,000
100cm-50Vol%KSK-F1	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	,025	,951	,993	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,810	,170	,999	,982	,997
	100cm-75Vol%KSK-F1	,999	,999	1,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	1,000	,859	1,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,306	1,000
100cm-50Vol%KSK-F2	100cm-50Vol%KSK-F3	,694	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,633	,668	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	1,000	,000	,744	,609	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	,003	,998	,004	,999
100cm-50Vol%KSK-F3	100cm-75Vol%KSK-F1	,086	,964	,935	,999	,901
	100cm-75Vol%KSK-F2	,518	,000	,965	,492	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,603	,029	1,000	,002	,869
100cm-75Vol%KSK-F1	100cm-75Vol%KSK-F2	1,000	,122	1,000	,999	,999
	100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	,915	1,000	,193	1,000
100cm-75Vol%KSK-F2	100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	,998	1,000	,932	,998

Anlage 32 Deskriptive Statistik $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und pH -Wert, $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und LF , pH -Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Mai 2008 von Versuch 1

Variante	N	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg/l	$\text{NH}_4\text{-N}$ mg/l	pH -Wert	LF mS/cm	Chlorid mg/l
70cm-0Vol%KSK-F1	14	8,1 ± 15,3	0,2 ± 0,4	7,8 ± 0,4	0,7 ± 1,2	22,2 ± 31,3
70cm-0Vol%KSK-F2	13	9,5 ± 23,4	0,2 ± 0,2	7,8 ± 0,3	0,9 ± 2,0	89,2 ± 247,4
70cm-0Vol%KSK-F3	7	0,3 ± 0,4	0,2 ± 0,2	8,0 ± 0,4	0,3 ± 0,1	7,8 ± 2,7
70cm-50Vol%KSK-F1	16	60,4 ± 62,3	1,7 ± 5,3	8,4 ± 0,3	2,4 ± 1,4	166,2 ± 81,6
70cm-50Vol%KSK-F2	11	99,1 ± 111,4	0,6 ± 0,6	8,5 ± 0,4	3,5 ± 2,2	177,8 ± 107,9
70cm-50Vol%KSK-F3	15	35,9 ± 37,0	0,3 ± 0,2	8,3 ± 0,4	3,4 ± 1,9	249,7 ± 145,8
70cm-75Vol%KSK-F1	9	99,9 ± 113,6	0,5 ± 0,6	8,4 ± 0,4	5,2 ± 3,7	363,8 ± 216,5
70cm-75Vol%KSK-F2	12	179,0 ± 119,4	1,0 ± 1,0	8,5 ± 0,4	4,5 ± 2,1	404,1 ± 282,8
70cm-75Vol%KSK-F3	3	18,1 ± 22,7	0,2 ± 0,1	8,4 ± 0,5	3,2 ± 1,2	309,6 ± 167,4
100cm-0Vol%KSK-F1	18	4,5 ± 15,7	0,3 ± 0,4	7,7 ± 0,4	1,0 ± 0,6	92,4 ± 82,9
100cm-0Vol%KSK-F2	13	4,6 ± 8,9	0,6 ± 0,7	7,7 ± 0,3	1,7 ± 0,9	185,7 ± 158,9
100cm-0Vol%KSK-F3	16	0,9 ± 2,2	0,4 ± 1,2	7,8 ± 0,3	0,4 ± 0,1	19,5 ± 13,9
100cm-50Vol%KSK-F1	12	112,7 ± 80,2	26,3 ± 78,8	8,2 ± 0,3	6,9 ± 4,6	748,2 ± 501,6
100cm-50Vol%KSK-F2	9	116,5 ± 150,6	1,1 ± 2,2	8,4 ± 0,3	5,7 ± 2,5	538,8 ± 323,6
100cm-50Vol%KSK-F3	5	100,2 ± 101,9	5,6 ± 9,3	8,6 ± 0,7	5,9 ± 3,5	616,2 ± 312,5
100cm-75Vol%KSK-F1	11	65,9 ± 69,6	2,5 ± 4,2	8,3 ± 0,3	6,8 ± 3,8	588,4 ± 379,2
100cm-75Vol%KSK-F2	13	348,8 ± 276,2	3,2 ± 7,8	8,2 ± 0,4	8,5 ± 3,9	652,7 ± 436,6
100cm-75Vol%KSK-F3	9	370,7 ± 357,3	4,6 ± 7,7	8,0 ± 0,2	10,9 ± 4,4	1179,6 ± 750,8

Anlage 33 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 1

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-0Vol%KSK-F1	70cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,994	1,000	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F1	,999	1,000	,000	,909	,997
	70cm-50Vol%KSK-F2	,921	1,000	,001	,278	,997
	70cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,014	,275	,834
	70cm-75Vol%KSK-F1	,947	1,000	,015	,003	,354
	70cm-75Vol%KSK-F2	,043	1,000	,001	,022	,091
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,719	,997	,998
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	,993
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,753	,077	,210	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,815	1,000	,022	,001	,006
	100cm-50Vol%KSK-F3	,992	1,000	,001	,012	,013
	100cm-75Vol%KSK-F1	,999	1,000	,024	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,318	,000	,000
100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,997	,000	,000	
70cm-0Vol%KSK-F2	70cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,995	1,000	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,001	,979	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F2	,939	1,000	,001	,469	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,017	,475	,993
	70cm-75Vol%KSK-F1	,960	1,000	,019	,008	,744
	70cm-75Vol%KSK-F2	,056	1,000	,001	,056	,357
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,726	,999	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,795	,108	,234	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,846	1,000	,026	,002	,039
	100cm-50Vol%KSK-F3	,994	1,000	,002	,025	,057
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,029	,000	,004
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,349	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,998	,000	,000
70cm-0Vol%KSK-F3	70cm-50Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,554	,922	,999
	70cm-50Vol%KSK-F2	,967	1,000	,517	,395	,999
	70cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,944	,407	,934
	70cm-75Vol%KSK-F1	,976	1,000	,892	,011	,559
	70cm-75Vol%KSK-F2	,165	1,000	,476	,062	,258
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,998	,992	,998
	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,989	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	,974	,999	,997
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,994	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,887	,315	1,000	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,906	1,000	,904	,004	,032
	100cm-50Vol%KSK-F3	,995	1,000	,250	,022	,038
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,947	,000	,005
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	1,000	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	1,000	,000	,000

Anlage 34 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 2

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-50Vol%KSK-F1	70cm-50Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,336	,972
	70cm-75Vol%KSK-F2	,484	1,000	1,000	,797	,767
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	,997	1,000	,000	,982	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,999	1,000	,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,996	1,000	,000	,701	,993
	100cm-50Vol%KSK-F1	1,000	,100	,984	,001	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	,149	,158
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,398	,181
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,002	,024
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,919	,000	,001
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,258	,000	,000
70cm-50Vol%KSK-F2	70cm-50Vol%KSK-F3	,998	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,980	,993
	70cm-75Vol%KSK-F2	,982	1,000	1,000	1,000	,911
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	,845	1,000	,000	,437	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	,906	1,000	,000	,946	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	,830	1,000	,000	,116	,995
	100cm-50Vol%KSK-F1	1,000	,121	,972	,114	,001
	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	,872	,320
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,950	,299
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,172	,084
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,891	,000	,009
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,248	,000	,000
	70cm-50Vol%KSK-F3	70cm-75Vol%KSK-F1	,999	1,000	1,000	,953
70cm-75Vol%KSK-F2		,188	1,000	1,000	1,000	,996
70cm-75Vol%KSK-F3		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100cm-0Vol%KSK-F1		1,000	1,000	,005	,436	,986
100cm-0Vol%KSK-F2		1,000	1,000	,006	,955	1,000
100cm-0Vol%KSK-F3		1,000	1,000	,010	,108	,754
100cm-50Vol%KSK-F1		,975	,079	1,000	,060	,002
100cm-50Vol%KSK-F2		,983	1,000	1,000	,784	,637
100cm-50Vol%KSK-F3		1,000	1,000	,965	,913	,566
100cm-75Vol%KSK-F1		1,000	1,000	1,000	,098	,244
100cm-75Vol%KSK-F2		,000	1,000	1,000	,000	,035
100cm-75Vol%KSK-F3		,000	1,000	,781	,000	,000

Anlage 35 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 3

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-75Vol%KSK-F1	70cm-75Vol%KSK-F2	,991	1,000	1,000	1,000	1,000
	70cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	,896	1,000	,007	,005	,667
	100cm-0Vol%KSK-F2	,936	1,000	,007	,093	,994
	100cm-0Vol%KSK-F3	,883	1,000	,012	,001	,272
	100cm-50Vol%KSK-F1	1,000	,176	1,000	,990	,191
	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	,998
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,996	1,000	,982
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,996	,955
	100cm-75Vol%KSK-F2	,001	1,000	,998	,168	,663
100cm-75Vol%KSK-F3	,001	1,000	,695	,000	,000	
70cm-75Vol%KSK-F2	70cm-75Vol%KSK-F3	,836	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F1	,017	1,000	,000	,041	,252
	100cm-0Vol%KSK-F2	,041	1,000	,000	,379	,906
	100cm-0Vol%KSK-F3	,018	1,000	,000	,006	,054
	100cm-50Vol%KSK-F1	,997	,166	,957	,735	,240
	100cm-50Vol%KSK-F2	,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	,999	1,000	1,000	1,000	,995
	100cm-75Vol%KSK-F1	,725	1,000	1,000	,818	,986
	100cm-75Vol%KSK-F2	,056	1,000	,860	,017	,772
100cm-75Vol%KSK-F3	,043	1,000	,223	,000	,000	
70cm-75Vol%KSK-F3	100cm-0Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,686	,999	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	,622	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,718	,989	,997
	100cm-50Vol%KSK-F1	,999	,954	1,000	,916	,863
	100cm-50Vol%KSK-F2	,999	1,000	1,000	,999	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,999	,998
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	,935	,999
	100cm-75Vol%KSK-F2	,004	1,000	1,000	,348	,983
	100cm-75Vol%KSK-F3	,003	1,000	,993	,015	,016

Anlage 36 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration ab Juni 2008 von Versuch 1 – Teil 4

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
100cm-0Vol%KSK-F1	100cm-0Vol%KSK-F2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-50Vol%KSK-F1	,610	,045	,130	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,706	1,000	,011	,001	,020
	100cm-50Vol%KSK-F3	,984	1,000	,001	,022	,039
	100cm-75Vol%KSK-F1	,997	1,000	,011	,000	,001
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,211	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,994	,000	,000
100cm-0Vol%KSK-F2	100cm-0Vol%KSK-F3	1,000	1,000	1,000	,995	,985
	100cm-50Vol%KSK-F1	,731	,105	,121	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,794	1,000	,011	,034	,296
	100cm-50Vol%KSK-F3	,990	1,000	,001	,150	,288
	100cm-75Vol%KSK-F1	,999	1,000	,012	,000	,069
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,193	,000	,006
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,984	,000	,000
100cm-0Vol%KSK-F3	100cm-50Vol%KSK-F1	,596	,062	,182	,000	,000
	100cm-50Vol%KSK-F2	,688	1,000	,017	,000	,003
	100cm-50Vol%KSK-F3	,980	1,000	,001	,004	,008
	100cm-75Vol%KSK-F1	,996	1,000	,018	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	,284	,000	,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,997	,000	,000
100cm-50Vol%KSK-F1	100cm-50Vol%KSK-F2	1,000	,251	1,000	1,000	,972
	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	,872	,728	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	,251	1,000	1,000	,997
	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	,236	1,000	,973	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	,660	,995	,033	,072
100cm-50Vol%KSK-F2	100cm-50Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,997	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,002	1,000	,999	,487	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,002	1,000	,725	,002	,001
100cm-50Vol%KSK-F3	100cm-75Vol%KSK-F1	1,000	1,000	,983	1,000	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F2	,015	1,000	,570	,871	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,011	1,000	,119	,042	,052
100cm-75Vol%KSK-F1	100cm-75Vol%KSK-F2	,000	1,000	1,000	,964	1,000
	100cm-75Vol%KSK-F3	,000	1,000	,803	,032	,001
100cm-75Vol%KSK-F2	100cm-75Vol%KSK-F3	1,000	1,000	,999	,745	,004

Anlage 37 NO₃-N-, NH₄-N-Konzentrationen, pH-Wert, Leitfähigkeit und kumulierte Sickerwassermenge der Sickerwassersammler im Zeitraum April 2009 bis März 2010

Mächtigkeit [cm]	Zumischung KSK [Vol%]	NO ₃ -N [mg/l]	NO ₃ -N [kg/ha]	NH ₄ -N [mg/l]	NH ₄ -N [kg/ha]	pH-Wert	LF [mS/cm]	SW [mm]
70	0	41,2 ± 12,2	20,7	3,9 ± 6,1	1,5	8,0 ± 0,6	6,7 ± 1,5	58,4
70	50	154,7 ± 33,1	41,6	7,3 ± 11,6	0,5	7,6 ± 0,3	3,8 ± 0,6	54,4
70	75	131,3 ± 103,1	61,7	4,2 ± 3,5	1,4	7,4 ± 0,3	3,5 ± 1,3	71,2
100	0	4,3 ± 4,6	4,4	2,7 ± 4,1	3,1	7,7 ± 0,2	3,2 ± 0,7	118,3
100	50	78,0 ± 58,1	18,6	1,6 ± 2,2	0,4	7,6 ± 0,4	3,2 ± 1,0	47,9
100	75	93,1 ± 120,5	19,4	2,8 ± 4,0	1,0	7,7 ± 0,5	4,6 ± 2,5	38,0

Anlage 38 Tukey HSD-Test NO₃-N, NH₄-N-Konzentration pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration der neu angelegten Sickerwassersammler von Versuch 1

		NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH-Wert	LF	Cl
70cm-0Vol%KSK	70cm-50Vol%KSK	,205	,412	,991	,223	,002
	70cm-75Vol%KSK	,584	,033	,597	,110	,000
	100cm-0Vol%KSK	,472	,020	,998	,002	,000
	100cm-50Vol%KSK	1,000	,016	,992	,001	,000
	100cm-75Vol%KSK	1,000	,016	,992	,013	,000
70cm-50Vol%KSK	70cm-75Vol%KSK	,914	,997	,988	1,000	,997
	100cm-0Vol%KSK	,003	,998	1,000	,991	,938
	100cm-50Vol%KSK	,214	,995	1,000	,972	1,000
	100cm-75Vol%KSK	,159	,997	1,000	1,000	1,000
70cm-75Vol%KSK	100cm-0Vol%KSK	,007	1,000	,746	,778	,989
	100cm-50Vol%KSK	,623	1,000	,840	,647	1,000
	100cm-75Vol%KSK	,496	1,000	,823	,987	,956
100cm-0Vol%KSK	100cm-50Vol%KSK	,203	1,000	1,000	1,000	,925
	100cm-75Vol%KSK	,349	1,000	1,000	,976	,573
100cm-50Vol%KSK	100cm-75Vol%KSK	1,000	1,000	1,000	,918	,990

Anlage 39 Deskriptive Statistik $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration und -Fracht, $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und -Fracht, pH -Wert, Elektrische Leitfähigkeit, Chloridkonzentration und Sickerwassermenge von Versuch 2

Variante	N	$\text{NO}_3\text{-N}$ [mg/l]	$\text{NO}_3\text{-N}$ Fracht [kg/ha]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/l]	$\text{NH}_4\text{-N}$ Fracht [kg/ha]	pH -Wert	LF [mS/cm]	Cl [mg/l]	Sickerwassermenge [mm]
Nulliv-F1	7	15,1 ± 16,2	1,4 ± 0,9	0,74 ± 0,75	0,05 ± 0,07	8,0 ± 0,4	1,4 ± 1,3	174 ± 265	15,8 ± 8,5
Nulliv-F2	8	32,0 ± 47,4	6,4 ± 12,4	1,31 ± 2,83	1,01 ± 2,46	8,0 ± 0,4	1,8 ± 1,4	169 ± 288	26,1 ± 9,7
Nulliv-F3	8	10,7 ± 19,4	2,8 ± 3,8	0,38 ± 0,27	0,08 ± 0,09	8,2 ± 0,4	1,1 ± 0,6	77 ± 97	23,4 ± 10,8
Nulliv-F4	7	23,8 ± 41,9	1,5 ± 1,6	0,83 ± 1,29	0,05 ± 0,05	7,9 ± 0,3	1,0 ± 0,8	145 ± 237	18,4 ± 11,8
Nulliv-F5	6	33,2 ± 41,7	3,2 ± 4,7	0,35 ± 0,30	0,04 ± 0,04	7,8 ± 0,3	7,7 ± 14,6	100 ± 107	11,9 ± 8,0
KSK50-F1	6	491,5 ± 275,4	39,4 ± 30,1	1,22 ± 0,48	0,09 ± 0,07	7,8 ± 0,3	10,5 ± 7,3	1358 ± 2284	9,5 ± 6,7
KSK50-F2	8	160,2 ± 114,6	23,8 ± 35,4	2,27 ± 1,80	0,47 ± 0,96	8,0 ± 0,4	7,2 ± 2,9	674 ± 619	11,5 ± 9,3
KSK50-F3	6	282,4 ± 175,2	32,0 ± 22,2	3,08 ± 2,69	0,38 ± 0,32	7,9 ± 0,3	5,9 ± 2,0	344 ± 160	14,4 ± 9,2
KSK50-F4	6	737,3 ± 588,5	126,4 ± 127,9	1,12 ± 0,51	0,20 ± 0,16	7,7 ± 0,4	9,2 ± 4,8	382 ± 389	19,2 ± 11,2
KSK50-F5	5	660,3 ± 716,4	3,6 ± 4,2	2,68 ± 0,87	0,12 ± 0,13	7,4 ± 0,2	10,6 ± 12,4	2835 ± 5194	5,5 ± 5,5
KSK75-F1	7	535,5 ± 286,1	47,1 ± 27,7	4,28 ± 3,16	0,41 ± 0,32	7,7 ± 0,3	64,3 ± 70,5	18772 ± 35021	12,1 ± 7,1
KSK75-F2	6	229,4 ± 257,6	27,7 ± 48,3	2,54 ± 1,41	0,47 ± 0,80	7,9 ± 0,4	30,5 ± 37,0	8863 ± 14485	16,6 ± 15,7
KSK75-F3	7	279,1 ± 140,6	27,1 ± 10,7	2,37 ± 1,99	0,25 ± 0,14	7,7 ± 0,3	26,1 ± 30,1	7673 ± 11125	13,6 ± 7,0
KSK75-F4	7	408,5 ± 290,9	75,7 ± 58,2	1,74 ± 1,08	0,31 ± 0,24	7,8 ± 0,4	12,9 ± 10,8	3640 ± 3933	21,2 ± 9,9
KSK75-F5	7	312,3 ± 199,1	31,1 ± 37,5	1,99 ± 1,93	0,19 ± 0,28	7,5 ± 0,3	34,0 ± 20,4	8206 ± 7482	8,1 ± 5,2

Anlage 40 Tukey HSD-Test NO₃-N-Konzentration und –Fracht, NH₄-N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit und Chloridkonzentration von Versuch 2 – Teil 1

		NO ₃ -N	NO ₃ -N Fracht	NH ₄ -N	NH ₄ -N Fracht	pH-Wert	LF	Cl
Nullv-F1	KSK75-F1	0,03	0,86	1,00	1,00	0,97	0,00	0,01
	KSK50-F4	0,00	0,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00
	KSK50-F5	0,01	1,00	1,00	1,00	0,16	1,00	1,00
KSK50-F1	KSK75-F1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,03
	Nullv-F2	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F2	0,76	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F2	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F3	0,12	0,99	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
	KSK50-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F4	0,15	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F4	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F4	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	0,18	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	1,00	0,99	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00
KSK75-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	
KSK75-F1	Nullv-F2	0,03	0,96	1,00	1,00	0,95	0,00	0,00
	KSK50-F2	0,41	1,00	1,00	1,00	0,97	0,00	0,01
	KSK75-F2	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64	0,89
	Nullv-F3	0,03	0,90	1,00	1,00	0,33	0,00	0,00
	KSK50-F3	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,01
	KSK75-F3	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,29	0,67
	Nullv-F4	0,04	0,87	1,00	1,00	1,00	0,00	0,01
	KSK50-F4	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	0,01	0,01
	KSK75-F4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,10
	Nullv-F5	0,05	0,90	1,00	1,00	1,00	0,00	0,01
	KSK50-F5	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	0,01	0,14
	KSK75-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,77	0,82
Nullv-F2	KSK50-F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86	0,94
	Nullv-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F3	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F3	0,98	1,00	1,00	1,00	0,96	0,96	0,98
	Nullv-F4	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F4	0,00	0,00	1,00	1,00	0,91	1,00	1,00
	KSK75-F4	0,41	0,12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	0,01	1,00	1,00	1,00	0,12	1,00	1,00
	KSK75-F5	0,91	1,00	1,00	1,00	0,44	0,59	0,98
	KSK50-F2	KSK75-F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
Nullv-F3		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
KSK50-F3		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
KSK75-F3		1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	0,99
Nullv-F4		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
KSK50-F4		0,01	0,00	1,00	1,00	0,93	1,00	1,00
KSK75-F4		0,98	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nullv-F5		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
KSK50-F5		0,19	1,00	1,00	1,00	0,14	1,00	1,00
KSK75-F5		1,00	1,00	1,00	1,00	0,48	0,89	0,99

Anlage 41 Tukey HSD-Test NO₃-N-Konzentration und –Fracht, NH₄-N-Konzentration und –Fracht, pH-Wert, Elektrische Leitfähigkeit und Chloridkonzentration von Versuch 2 – Teil 2

		NO ₃ -N	NO ₃ -N Fracht	NH ₄ -N	NH ₄ -N Fracht	pH-Wert	LF	Cl
KSK75-F2	Nullv-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	0,94
	KSK50-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98
	KSK75-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,96
	KSK50-F4	0,10	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
	KSK75-F4	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97
	KSK50-F5	0,59	1,00	1,00	1,00	1,00	0,47	1,00
KSK75-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	1,00	1,00	
Nullv-F3	KSK50-F3	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F3	0,96	1,00	1,00	1,00	0,34	0,96	0,98
	Nullv-F4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F4	0,00	0,00	1,00	1,00	0,28	1,00	1,00
	KSK75-F4	0,36	0,07	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00
	Nullv-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00
	KSK50-F5	0,01	1,00	1,00	1,00	0,01	1,00	1,00
	KSK75-F5	0,87	1,00	1,00	1,00	0,03	0,61	0,97
KSK50-F3	KSK75-F3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F4	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F4	0,25	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F4	1,00	0,91	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	0,83	1,00	1,00	1,00	0,54	1,00	1,00
	KSK75-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,91	0,99
KSK75-F3	Nullv-F4	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,99
	KSK50-F4	0,18	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F4	1,00	0,78	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
	KSK50-F5	0,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F4	KSK50-F4	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Nullv-F4	KSK75-F4	0,43	0,06	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	0,02	1,00	1,00	1,00	0,51	1,00	1,00
	KSK75-F5	0,92	1,00	1,00	1,00	0,92	0,68	0,98
KSK50-F4	KSK75-F4	0,81	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nullv-F5	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK75-F5	0,31	0,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,99
KSK75-F4	Nullv-F5	0,48	0,07	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	KSK50-F5	1,00	0,08	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00
	KSK75-F5	1,00	0,89	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00
Nullv-F5	KSK50-F5	0,02	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00
	KSK75-F5	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,99
KSK50-F5	KSK75-F5	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00

Anlage 42 Literaturübersicht Sickerwasserqualität bei Einsatz von KS, Abfall- und Grünkompost

Autor	Substrat	Einsatzmenge	Zeitraum	NO ₃ -N-Konzentration	NH ₄ -N-Konzentration	N ₂ -Fracht	Schwermetalle
Keller und Beda-Putz 1976	KS	160 m ³ /ha		345 mg/l (unbepflanz) 22 mg/l (bepflanz)			
Shepherd 1996	KS	250 kg N / ha				150 kg/ha	
Andrews et al. 1997	KS	610 kg/ha	6 Jahre	297 mg/l			erhöht
Richards et al. 1998	KS		20 Jahre				
Hallett et al. 1999	KS	14,5 t/ha		35 mg/l			
Kleber et al. 2000	KS	450 t/ha	21 Monate			375 kg/ha (NO ₃ -N)	erhöht
Hoffmann et al. 2002	KS						
McLaren et al. 2003	KS	400 kg/ha	3 Jahre			156 kg/ha niedrig	
Melin et al. 2004	KS			10 mg/l			
Quiang et al. 2004	KS	1100 t/ha			100 mg/l		
Fjällborg et al. 2005	KS						erhöht
Rattan et al. 2005	KS	Beregnung	10 Jahre				erhöht
Haubold-Rosar und Gast 2005	KS	25 t/ha				mit mineral. Düngung vergleichbar	
Vogeler et al. 2006	KS	200 mm				60% (Gras) 30% (Pappel)	erhöht 3%
Ahlberg et al. 2006	KS						
Egiarte et al. 2006	KS						
Brenton et al. 2007	KS	90 t/ha		> 50 mg/l			
Haubold-Rosar und Gast 2005	Grünkompost	500 t/ha				mit mineral. Düngung vergleichbar	
Kaschl et al. 2002	Abfallkompost	65 t/ha		erhöht			erhöht

Danksagung

Ich danke meinen Gutachtern Prof. Dr. habil. R. Meissner, Prof. Dr.-Ing. habil. R. Jahn und Dr. habil. A. Vetter für die Betreuung meiner Dissertation und für ihre Anmerkungen.

Frau Dr. Sabine Bernsdorf sei besonders herzlich gedankt für die vielfältige Unterstützung während der gesamten Dissertationszeit. Ihre stetige Motivation und ihr Einsatz haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Dankbar bin ich weiterhin für die finanzielle Unterstützung und die Hinweise von Herrn Dr. Meisgeier und seiner Familie.

Des Weiteren danke ich Frau Renate Nauendorf, die für mich tagelang im Labor und auch auf der Kalihalde ständig im Einsatz war. Dies gilt ebenso für Herrn Michael Engel, der mich bei Wind und Wetter auf die Halde begleitet hat.

Meinen Freunden und Kollegen Franziska, Katja, Marten, Nadine und Stefan, die sich mit mir ein Büro teilten und auch von den Einsätzen in Thüringen nicht verschont blieben, möchte ich für die schöne Zeit an der Universität danken. Es war immer ein angenehmes Arbeiten und auf die kostbaren Hinweise und ihre Unterstützung hätte ich nicht verzichten können.

Die Anlage und die Auswertung des Vegetationstests wäre ohne Herrn Dr. Hoffmann kaum denkbar gewesen. Dankeschön.

Frau Wehner und Frau Böhme der Berufsakademie Riesa sowie dem Laborteam von Prof. Grün danke ich für die ständige Bearbeitung der Proben und Prof. Grün besonders für seine weiterführenden Hinweise während der praktischen Versuche und ihrer Auswertungen.

Vielen Dank den Mitarbeitern der GSES in Sondershausen für die Hilfe beim Aufbau und der Bewirtschaftung des Versuchsfeldes. Vor allem sei hier auf Herrn Brumme, Herrn Köthe, Frau Bernd und Frau Stäubert verwiesen.

Für ihre Unterstützung bei den statistischen Auswertungen gilt Herrn Prof. Spilke und vor allem Herrn Fechner mein besonderer Dank.

Für ihre helfenden Hände danke ich Herrn Rost, Herrn Dr. Frosch und Herrn Bartels sowie den weiteren Mitarbeitern des Institutsbereichs für Agrartechnik.

Den Kollegen am Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH danke ich für das entgegengebrachte Verständnis und die Rücksichtnahme auf mein Dissertationsvorhaben.

Die zahlreichen Praktikanten über die Jahre, die mir bei der Arbeit auf dem Versuchsfeld sowie bei der Untersuchung der Proben geholfen haben, seien an dieser Stelle ebenso mit Dank versehen.

Ganz lieben Dank auch an meine Freunde Christina, Constanze, Guntram, Ina, Katja, Kerstin, Stefan, Ulrike, meiner Familie und meinem Partner Stephan, die mir ständig Mut zugesprochen haben, die Arbeit zu beenden.

Erklärung an Eides statt

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Hiermit erkläre ich, dass ich noch keine vergeblichen Promotionsversuche unternommen habe und die vorliegende Dissertation nicht in der gegenwärtigen bzw. in einer anderen Fassung bereits einer anderen Fakultät / anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt habe.

Halle/Saale

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Franziska Liemen
 Geboren 10. Februar 1981 in Friedrichroda
 Familienstand Ledig, keine Kinder
 Anschrift Geleitstr. 3a; 99423 Weimar

Beruflicher Werdegang

Seit 07.2011 Wissenschaftliche Mitarbeiterin
 Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige
 GmbH, Leipzig

10.2006 – 06.2011 Wissenschaftlich-technische Mitarbeiterin
 Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg /
 JenaBioFert GmbH

Promotionsprojekt

Eignung von Klärschlammkompost als
 Rekultivierungsmaterial zum Anbau von
 Energiepflanzen

Weitere Projekte

Möglichkeiten zur Reduzierung des
 Sickerwasserstromes zum Oberflächengewässer
 Pleiße am Beispiel der Kippe Witznitz durch
 Errichtung einer optimalen Wasserhaushaltsschicht

Anbau von Energiepflanzen auf einer stillgelegten
 Teilfläche des 1. Erweiterungsabschnittes der
 Deponie Erfurt Schwerborn und deren energetischen
 Nutzung durch stoffliche Verwertung

Studentischer Werdegang

10.1999 – 04.2006 Studium der Agrarwissenschaften
 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
 Schwerpunkt: Bodenschutz und Landschaftsgestaltung

09.2003 – 05.2004 Auslandssemester
 Ecole Nationale Supérieure Agronomique Montpellier,
 Frankreich

