

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Summary	6
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	12
1 Einleitung und Problemstellung	14
2 Literaturübersicht.....	18
3 Material und Methoden.....	25
3.1 Gefäßversuch	25
3.1.1 Versuchsaufbau	25
3.1.2 Untersuchungen.....	27
3.1.2.1 Bodenphysikalische Parameter.....	27
3.1.2.2 Wasserhaushaltsparameter.....	29
3.1.2.3 Chemische Parameter	30
3.2 Freilandversuch.....	31
3.2.1 Versuchsaufbau	31
3.2.2 Untersuchungen.....	32
3.2.2.1 Bodenphysikalische Parameter.....	32
3.2.2.2 Wasserhaushaltsparameter.....	33
3.2.2.3 Chemische Parameter	34
3.2.2.4 Stickstoffmineralisierung	35
3.2.2.5 Mikrobiologische Parameter.....	36
3.3 Datenaufbereitung und statistische Auswertung.....	37
4 Ergebnisse und Diskussion	38
4.1 Bodenphysikalische Parameter	38
4.1.1 Nutzbare Feldkapazität nach DIN ISO 11274 (Drucktopfmethode).....	38
4.1.2 Nutzbare Feldkapazität nach Vegetationstest	39
4.1.3 Diskussion.....	40
4.2 Wasserhaushaltsparameter.....	42
4.2.1 Niederschlag.....	42
4.2.2 Versickerung	42
4.2.3 Bodenwassergehalt.....	47
4.2.4 Verdunstung.....	49
4.2.5 Modellierung der Sickerwassermenge	52
4.2.6 Diskussion.....	54

4.3	Chemische Parameter.....	60
4.3.1	Rekultivierungsmaterial	60
4.3.1.1	Gesamtstickstoff	60
4.3.1.2	Mineralischer Stickstoff	64
4.3.1.3	Organisch gebundener Stickstoff.....	73
4.3.2	Sickerwasser.....	74
4.3.2.1	Nitratstickstoff	74
4.3.2.2	Ammoniumstickstoff.....	84
4.3.3	Pflanze.....	93
4.3.4	Stickstoffmineralisierung.....	94
4.3.5	Mikrobiologische Parameter	96
4.3.5.1	Mikrobielle Biomasse	96
4.3.5.2	Metabolischer Quotient	98
4.3.6	Diskussion.....	100
5	Schlussfolgerungen.....	115
	Literatur	118
	Anlagenverzeichnis	132

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Aufbau des Freilandversuches	32
Abb. 2:	Nutzbare Feldkapazität der Varianten (Vegetationstest mit Sonnenblume und Welschem Weidelgras)	40
Abb. 3:	Sickerwassermengen der 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten (Gefäßversuch 2)	43
Abb. 4:	Kumulierte Sickerwassermengen der 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten (Gefäßversuch 2)	43
Abb. 5:	Kumulierte Sickerwassermengen der 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm mächtigen, unbegrünten Varianten MK1 (Gefäßversuch 2)	45
Abb. 6:	Kumulierte Sickerwassermenge von unbegrünten und begrünten MK1 bei 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm Mächtigkeit während des Untersuchungszeitraumes vom 19.07.03 bis 28.04.2005 (Freilandversuch)	46
Abb. 7:	Verlauf des Bodenwassergehaltes von 100 cm mächtigen Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 (Gefäßversuch 2)	48
Abb. 8:	Verlauf des Bodenwassergehaltes der Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 in der Untersuchungstiefe 0-40 cm und 80-120 cm (Freilandversuch)	49
Abb. 9:	Kumulierte aktuelle Evapotranspiration und Evaporation von 100 cm mächtigen Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 (Gefäßversuch 2)	50
Abb. 10:	Durchschnittliche tägliche Evapotranspiration und Evaporation der 100 cm mächtigen Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 für die Zeitspannen April bis Oktober 2004 und November 2003 bis März 2004 (Gefäßversuch 2)	50
Abb. 11:	Niederschlagssummen verschiedener Standorte Deutschlands	54
Abb. 12:	N-Komponenten der eingesetzten Rekultivierungsmaterialien (Gefäßversuch)	60
Abb. 13:	N-Komponenten der eingesetzten Rekultivierungsmaterialien (Freilandversuch)	61
Abb. 14:	Durchschnittliche N _g -Gehalte der gesamten Rekultivierungsschichten im Untersuchungszeitraum (Freilandversuch)	63
Abb. 15:	Durchschnittliche NO ₃ -N-Gehalte der Rekultivierungsmaterialien in unterschiedlicher Bodentiefe während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	66
Abb. 16:	Durchschnittliche NH ₄ -N-Gehalte der Rekultivierungsmaterialien während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	69
Abb. 17:	Durchschnittliche N _{min} -Gehalte der Rekultivierungsmaterialien in unterschiedlicher Untersuchungstiefe während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	71
Abb. 18:	Verhältnis zwischen NO ₃ -N und NH ₄ -N der Rekultivierungsmaterialien während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	72
Abb. 19:	Verlauf der mittleren N _{org} -Gehalte in den Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	73
Abb. 20:	Verlauf der durchschnittlichen NO ₃ -N-Konzentrationen im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten während des Untersuchungszeitraumes (Gefäßversuch 2)	75
Abb. 21:	Durchschnittliche NO ₃ -N-Konzentration im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Gefäßversuch 2)	76
Abb. 22:	NO ₃ -N-Fracht im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten des gesamten Untersuchungszeitraumes (Gefäßversuch 2)	78
Abb. 23:	Verlauf der NO ₃ -N-Konzentrationen im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	81
Abb. 24:	Durchschnittliche NO ₃ -N-Konzentration im Sickerwasser von 100 cm mächtigen MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 des gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	82
Abb. 25:	NO ₃ -N-Fracht im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten des gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	83
Abb. 26:	Verlauf der NH ₄ -N-Konzentrationen im Sickerwasser der 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten im Untersuchungszeitraum (Gefäßversuch 2)	85
Abb. 27:	Durchschnittliche NH ₄ -N-Konzentration im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten des gesamten Untersuchungszeitraumes (Gefäßversuch 2)	87
Abb. 28:	NH ₄ -N-Fracht im Sickerwasser aller 100 cm mächtigen Varianten im gesamten Untersuchungszeitraum (Gefäßversuch 2)	88

Abb. 29: Verlauf der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch).....	90
Abb. 30: Durchschnittliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten im gesamten Untersuchungszeitraum (Freilandversuch)	90
Abb. 31: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht im Sickerwasser der 100 cm mächtigen Varianten MK1, MK1+Ut2 und MK1+St2 im gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch).....	92
Abb. 32: N-Entzug durch oberirdische Biomasse nach Ernte am 12.09.03, 17.06.04 und 03.08.04 (Gefäßversuch 2).....	93
Abb. 33: Verlauf mittlerer C_{mk} -Gehalte der Rekultivierungsmaterialien in Untersuchungstiefen von 0-40 cm und 40-80 cm während des Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch).....	98
Abb. 34: Mittlerer Metabolischer Quotient der Rekultivierungsmaterialien in Untersuchungstiefen 0 - 40 cm und 40 - 80 cm während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	99

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Varianten des Gefäßversuch 1	26
Tab. 2:	Varianten des Gefäßversuch 2	27
Tab. 3:	Füllmengen und Lagerungsdichten der Rekultivierungsmaterialien für die Bestimmung der nFK (Vegetationstest)	28
Tab. 4:	Durchgeführte Analysemethoden zur Sickerwasseruntersuchung	30
Tab. 5:	Durchgeführte Analysemethoden zur Untersuchung der KSK-Varianten	31
Tab. 6:	Varianten des Freilandversuches	32
Tab. 7:	Untersuchungstiefen im Freilandversuch	35
Tab. 8:	Nutzbare Feldkapazität der Varianten bei unterschiedlicher Lagerungsdichte (Drucktopfmethode, Gefäßversuch 2)	39
Tab. 9:	Nutzbare Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und Feldkapazität verschiedener Rekultivierungsmaterialien (Literaturangaben)	41
Tab. 10:	Durchschnittliche Sickerwassermenge der 100 cm mächtigen unbegrünten und begrünten Varianten während des Untersuchungszeitraumes vom 04.06.2003 - 08.06.2005 (Gefäßversuch 2)	44
Tab. 11:	Sickerwassermenge unterschiedlich mächtiger, unbegrünter Varianten während der Zeit vom 04.06.2003 bis 30.03.2004 (a) und 04.06.2003 bis 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	45
Tab. 12:	Sickerwassermengen aller Varianten während des Untersuchungszeitraumes vom 19.07.03 bis 22.07.04 (a) und vom 19.07.2003 bis 28.04.2005 (b) (Freilandversuch)	46
Tab. 13:	Durchschnittliche Sickerwassermenge pro Ereignis der 100 cm mächtigen, unbegrünter und begrünten Varianten während des gesamten Untersuchungszeitraumes vom 19.07.03 bis 28.04.2005 (Freilandversuch)	47
Tab. 14:	Evapotranspiration und Evaporation der 100 cm mächtigen Varianten während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Gefäßversuch 2)	51
Tab. 15:	Evapotranspiration und Evaporation von 50 cm, 100 cm, 150 cm und 200 cm mächtigen Varianten während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	52
Tab. 16:	Modellierte Sickerwassermenge unter Annahme des Niederschlages der Jahre 2002, 2003 und des langjährigen Mittels (1970-2001) bei unterschiedlicher nFK, 100cm Mächtigkeit und Grasvegetation	52
Tab. 17:	Sickerwassermenge der 100 cm mächtigen, begrünten Varianten (a) und Ergebnisse der Modellierung des Versuchsjahres 2004 (b) (Freilandversuch)	53
Tab. 18:	N _p -Gehalte der Varianten im Juli 2005 (Freilandversuch)	62
Tab. 19:	N _p , NO ₃ -N- und NH ₄ -N-Vorrat der Varianten im Juli 2003 (Freilandversuch)	62
Tab. 20:	Mittlere N _p -Gehalte der Varianten im Juli 2003 und März 2005 (Freilandversuch)	64
Tab. 21:	Mittlere NO ₃ -N-Gehalte der Varianten im Juli 2003 (Freilandversuch)	64
Tab. 22:	Mittlere NO ₃ -N-Gehalte der Varianten im März 2005 (Freilandversuch)	65
Tab. 23:	Differenzen der NO ₃ -N - Gehalte (Juli 2003 und März 2005) der Varianten in unterschiedlichen Untersuchungstiefen (Freilandversuch)	65
Tab. 24:	Mittlere NH ₄ -N-Gehalte der Rekultivierungsmaterialien im Juli 2003 (Freilandversuch)	67
Tab. 25:	Differenzen der NH ₄ -N-Gehalte (Juli 2003 und März 2005) der Varianten in unterschiedlichen Untersuchungstiefen (Freilandversuch)	68
Tab. 26:	Mittlere N _{min} -Gehalte der Varianten im Juli 2003 (Freilandversuch)	70
Tab. 27:	Vergleich durchschnittlicher NO ₃ -N-Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 - 08.06.2004 (a) und 22.06.2004 - 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	76
Tab. 28:	Vergleich durchschnittlicher NO ₃ -N-Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 - 08.06.2004 und 22.06.2004 - 26.04.2005 (Gefäßversuch 2)	77
Tab. 29:	Vergleich durchschnittlicher NO ₃ -N-Fracht im Sickerwasser der 100 cm mächtigen, unbegrünten Varianten zwischen den Zeiträumen vom 04.06.2003 - 08.06.2004 (a) und 22.06.2004 - 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	79
Tab. 30:	Vergleich durchschnittlicher NO ₃ -N-Frachten pro Sickerwasserereignis zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten und begrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 - 08.06.2004 und 22.06.2004 - 26.04.2005 (Gefäßversuch 2)	80

Tab. 31:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 19.07.2003 – 22.07.2004 (a) und 29.07.2004 – 28.04.2005 (b) (Freilandversuch)	81
Tab. 32:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 19.07.2003 – 22.07.2004 (a) und 29.07.2004 – 28.04.2005 (b) (Freilandversuch)	82
Tab. 33:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NO}_3\text{-N}$ -Frachten im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten während des gesamten Untersuchungszeitraumes (Freilandversuch)	83
Tab. 34:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 – 08.06.2004 (a) und 22.07.2004 – 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	86
Tab. 35:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten und begrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 – 08.06.2004 (a) und 22.06.2004 – 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	86
Tab. 36:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen, unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 – 08.06.2004 (a) und 22.07.2004 – 26.04.2005 (b) (Gefäßversuch 2)	88
Tab. 37:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen, unbegrünten und begrünten Varianten im Zeitraum vom 04.06.2003 – 08.06.2004 und 22.06.2004 – 26.04.2005 (Gefäßversuch 2)	89
Tab. 38:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 19.07.2003 – 22.07.2004 (a) und 29.07.2004 – 28.04.2005 (b) (Freilandversuch)	91
Tab. 39:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten und begrünten Varianten im gesamten Untersuchungszeitraum (Freilandversuch)	91
Tab. 40:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen, unbegrünten Varianten im Zeitraum vom 19.07.2003 – 22.07.2004 (a) und 29.07.2004 – 28.04.2005 (b) (Freilandversuch)	92
Tab. 41:	Vergleich durchschnittlicher $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten im Sickerwasser zwischen den 100 cm mächtigen unbegrünten und begrünten Varianten im gesamten Untersuchungszeitraum (Freilandversuch)	93
Tab. 42:	Veränderung der N-Komponenten im Zeitraum Juli 2003 bis März 2005 (Freilandversuch)	95
Tab. 43:	Mittlere C_{mak} -Gehalte [$\mu\text{g C}_{\text{mak}}/\text{g TM}$] der Varianten im September 2003 und November 2004 (Freilandversuch)	97
Tab. 44:	Mittlerer Metabolischer Quotient der Varianten im September 2003 und November 2004 (Freilandversuch)	100
Tab. 45:	N_r -Vorrat verschiedener Waldstandorte nach Muttergesteinsgruppe (Emberger 1965)	102
Tab. 46:	$\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Sickerwasser unterschiedlich genutzter Böden	110
Tab. 47:	Kriterien des Wasserhaushalts und Stickstoffgehalts für Rekultivierungsschichten zur Minimierung der Sickerwasserbildung	116