

10 Jahre Lysimeterversuche

Zum Einsatz von gereiftem Baggergut zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft

Dr. Michael Henneberg & Ricarda Neumann

Oktober 2011

Um sichere Aussagen zur eventuellen Grund- bzw. Oberflächenwassergefährdung machen zu können, waren mehrjährige Lysimeterversuche zur exakten Erfassung der quantitativen und qualitativen Veränderung des Sickerwassers beim Einsatz von Baggergut erforderlich. Die Versuche an der Universität Rostock sollten hierzu praxisrelevante Aussagen zu Stofffrachten in Richtung Grundwasser und zu ihren Auswirkungen auf die Grundwasserqualität nach Baggerguteinsatz bringen.

INHALTSVERZEICHNIS

Tabellenverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
0 Einleitung.....	5
1 Methodik / Versuchsaufbau.....	6
2 Rahmenbedingungen des Lysimeterversuches.....	9
2.1 Bodeneigenschaften.....	9
2.2 Witterungsverlauf.....	10
2.3 Kulturpflanze.....	12
3 Untersuchungsergebnisse.....	13
3.1 Veränderungen der Bodeneigenschaften.....	17
3.1.1 Grundeigenschaften.....	18
3.1.2 Schadstoffe.....	20
3.1.3 Nährstoffe und Mikronährstoffe.....	21
3.2 Sickerwasser.....	22
3.2.1 Sickerwassermenge.....	22
3.2.2 Sickerwasserqualität.....	24
3.2.3 Stoffaustrag.....	28
3.3 Ernteerträge.....	31
3.3.1 Quantität.....	31
3.3.2 Qualität.....	32
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	34
Literatur.....	39
Anlagen.....	40

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Versuchsanstellung, Unterteilung der Varianten	6
Tabelle 2: Verwendete Daten für die Darstellung des Witterungsverlaufes	8
Tabelle 3: Bodenaufbau in den Lysimetern	9
Tabelle 4: Abnahme des Gehaltes an Salzen und Phosphor im Oberboden, Austrag über Sickerwasser + Entzug Pflanzen im Mittel der 4 Varianten mit 840 t TM BG/ha; MD2 nach 10 Jahren	19
Tabelle 5: Vergleich der Mittelwerte im Sickerwasser mit Prüfwerten der BBodSchV und Entwurf Mantelverordnung 2011	24
Tabelle 6: Grad der Konzentrationsänderung - Nebenversuche	36
Tabelle 7: Grad der Konzentrationsänderung - Hauptversuch	36
Tabelle 8: Grad der Austragsänderung	36
Tabelle 9: Grad der Veränderung der Bodeneigenschaften	37
Tabelle 10: Grad der Veränderung der Bodeneigenschaften	38

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Wetterstation neben der Lysimeteranlage	8
Abbildung 2: Niederschlag der Jahre 2000 bis 2010 am Standort der Lysimeterstation	10
Abbildung 3: Temperaturverlauf über die hydrologischen Jahre sowie die LJM	11
Abbildung 4: Klimatische Wasserbilanz der 10 Untersuchungsjahre	11
Abbildung 5: Sickerwassermenge nach Varianten abhängig von der Aufwandmenge und der Düngung	13
Abbildung 6: Austräge an Nitrat und Phosphor	14
Abbildung 7: Stoffausträge über 10 Jahre bei unterschiedlichem C_{org} -Ausgangsniveau	15
Abbildung 8: Stoffaustrag nach Herbst- und Frühjahrsausbringung	16
Abbildung 9: als Sickerwasser angefallener Niederschlag in % in Abhängigkeit der Baggergutaufwandmenge und der Düngung	23
Abbildung 10: Sickerwassermenge Hauptversuch in den HJ 2000/01 bis 2009/10	23
Abbildung 11: Mittlere Schwermetallgehalte im Sickerwasser bis 2005	28
Abbildung 12: mittlere Ernteerträge nach Frisch- und Trockenmasse über die 10 Versuchsjahre	32
Abbildung 13: Schwermetallgehalte im Kolben im Mittel über die 10 Versuchsjahre	33
Abbildung 14: Schwermetallgehalte im Restmais im Mittel über die 10 Versuchsjahre	33

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BVM	Bodenverbesserungsmittel
HJ	Hydrologisches Jahr
LJM	langjähriges Mittel
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
VSW	Vorsorgewert

0 EINLEITUNG

Das in Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns anfallende organikhaltige und deshalb gemäß diesbezüglichen Richtlinien (OSPAR, HELCOM) an Land abzusetzende Nassbaggergut ist nach KrWG als Abfall einzustufen. Es kann aber wegen seiner meist günstigen stofflichen Zusammensetzung (hohe Gehalte an Organischer Substanz, Schluff, Ton und Nährstoffen; günstige Gefügeeigenschaften; unter den Grenz- bzw. Richtwerten liegende Schadstoffgehalte) einer Verwertung im Land- oder Landschaftsbau als Bodenverbesserungsmittel bzw. als Kulturbodenschicht zugeführt werden.

Zur Beurteilung des Stoffpfades Boden – Grundwasser/Oberflächengewässer gab es 1993 bis 1997 erste orientierende Sickerwasseruntersuchungen auf dem Versuchsstandort Rastow bei Ludwigslust (HENNEBERG, JANZEN 1997). Das Auffangen von Sickerwasser unterhalb der Ackerkrume mittels vereinfachter Lysimeter lieferte erste Anhaltspunkte zum Austrag von Nähr- und Schadstoffen sowie Salzionen. Auf diesem sandigen Versuchsstandort wurden z.T. deutlich erhöhte Gehalte an Nährstoffen, wie auch an Salzionen ermittelt. Vor allem der Schwefelpool im Baggergut bildet eine langanhaltende Sulfatquelle, die Auswirkungen auf potenzielle Grundwasserleiter im Bereich der Aufbringung haben kann.

Belastbare Aussagen zur potenziellen Grund- bzw. Oberflächenwassergefährdung erfordern ein differenzierteres Herangehen, das nur mehrjährige Lysimeterversuche mit einer genauen Erfassung der quantitativen und qualitativen Veränderung des Sickerwassers beim Einsatz von Baggergut gewährleisten. Die nach über 20 jähriger Dauernutzung freigewordenen Lysimeteranlage Rostock ermöglichte ab 2000 den auf 10 Jahre angesetzten Lysimeterversuch zur Analyse des Stoffpfades Boden-Grundwasser und Boden-Pflanze beim Einsatz von Baggergut als Bodenverbesserungsmittel in der Landwirtschaft. Auftraggeber waren die Hansestadt Rostock, die Bundesanstalt für Gewässerkunde und das Landesamt für Umwelt und Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Im Mittelpunkt stand die Untersuchung der Auswaschungsgefährdung des hohen Salzionenpotenzials im Baggergut aufgrund seiner Herkunft aus Brackgewässern. Wegen der hohen gesellschaftlichen Brisanz der Schadstoffproblematik im Baggergut wurden trotz relativ niedriger Gehalte im Rostocker Baggergut auch Schwermetalle und Organische Schadstoffe geprüft. Aufgrund der sehr hohen Gehalte an Nährstoffen im Rostocker Baggergut bei meist auch hohen Verfügbarkeiten bildeten diese den dritten Untersuchungsschwerpunkt.

Steinbeis Transferzentrum Angewandte Landschaftsplanung

c/o Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl Landschaftsplanung und -gestaltung
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock Fon: (0 381) 498 3246 Fax: (0 381) 498 3242
ricarda.neumann@uni-rostock.de michael.henneberg@uni-rostock.de

1 METHODIK / VERSUCHSAUFBAU

Die Lysimeteranlage in Rostock, mit 68 Lysimetern, bot die Möglichkeit, 17 Varianten mit jeweils 4 Wiederholungen durchzuführen. So konnte einerseits eine große Vielfalt an Einsatz- bzw. Aufbringungsvarianten für gereiftes Baggergut erprobt und andererseits mit 4 Wiederholungen noch ein hohes Maß an Absicherung der erhobenen Daten erreicht werden. Die damit sehr differenzierte Versuchsanstellung wurde in drei Teilversuchen gegliedert (Tabelle 1), die im Folgenden mit ihren Rahmenbedingungen dargestellt wird (s. auch Versuchsschema auf der beiliegenden CD, Anlage 1 der Abschlussberichte).

Tabelle 1: Versuchsanstellung, Unterteilung der Varianten

Versuch	Bezeichnung	C _{org} - Ausgangsniveau	Baggergut- gabe in t/ha	Ausbringung	Düngung
HV	HV 0, MD0	1,05%	0	-	MD 0
	HV 0, MD1	1,05%	0	-	MD 1
	HV 0, MD2	1,05%	0	-	MD 2
	HV 280, MD0	1,05%	280	HA	MD 0
	HV 280, MD1	1,05%	280	HA	MD 1
	HV 280, MD2	1,05%	280	HA	MD 2
	HV 420, MD0	1,05%	420	HA	MD 0
	HV 420, MD1	1,05%	420	HA	MD 1
	HV 420, MD2	1,05%	420	HA	MD 2
NV I	NV 0, MD2, C _{org} 1	0,93%	0	-	MD 2
	NV 840, MD2, C _{org} 1	0,93%	3 x 280	HA	MD 2
	NV 840, MD2, C _{org} 2	1,24%	0	-	MD 2
	NV 840, MD2, C _{org} 2	1,24%	3 x 280	HA	MD 2
NV II	NV 140, MD2, HA	0,98%	140	HA	MD 2
	NV 840, MD2, HA	0,98%	3 x 280	HA	MD 2
	NV 140, MD2, FA	0,98%	140	FA	MD 2
	NV 840, MD2, FA	0,98%	3 x 280	FA	MD 2

Versuch: HV - Hauptversuch, NV - Nebenversuch

Ausbringung: H A- Herbstausbbringung, FA – Frühljahrsausbringung

Düngung: MD 0 - keine Düngung;

MD 1 - N1 (100 kg/ha/a), P und K nach Bedarf;

MD2 – N2 (200 kg/ha), P und K nach Bedarf

Die erarbeitete Versuchskonzeption sollte in Bezug auf die Parameter Sickerwasseranfall und -zusammensetzung die nachfolgend aufgeführten Fragen klären:

1. Welche Veränderungen bewirken unterschiedliche Aufwandmengen an Baggergut sowie ein differenziertes Mineraldüngungsniveau (Hauptversuch)?
2. Wie wirkt sich die Splittung einer größeren Aufwandmenge an Baggergut, verteilt auf mehrere Ausbringungsjahre, bei unterschiedlichem C_{org} -Ausgangsniveau aus (Nebenversuch I)?
3. Welchen Einfluss hat eine Differenzierung nach Herbst- bzw. Frühjahrsausbringung des Baggergutes (Nebenversuch II)?

Die Wasserprobennahme erfolgte bei Wasseranfall bis 2005 generell am 1. und 15. des Monats. Ab 2005 nur noch am 1. des Monats. Bei erhöhtem Wasseranfall erfolgten Zwischenprobenahmen. Die Mischung der Proben eines Monats erfolgte variantenabhängig. Die LUFA Rostock analysierte diese Mischproben.

Das differenzierte Analytikprogramm (s. CD Abschlussberichte Anlage 2) beachtete folgende Aspekte:

- ab wann ändert sich wie die Konzentration eines Parameters im Sickerwasser und
- ab wann stabilisiert sich die Konzentration eines Parameters im Sickerwasser auf welchem Niveau

Das eingesetzte Baggergut und der Boden in den Lysimetern wurden zu Beginn der Versuche hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Inhaltsstoffe zur Ermittlung des Ausgangszustandes untersucht. Jährlich nach der Ernte Ende September/Anfang Oktober erfolgte eine Bodenprobenahme zur Beobachtung der Veränderung der Eigenschaften im neu gemischten Oberboden. Die Bodenproben wurden variantenabhängig gemischt und in der LUFA Rostock analysiert.

Da die Lysimeterversuche nicht am Kalenderjahr, sondern am hydrologischen Jahr (01.11. bis zum 31.10. des Folgejahres) ausgerichtet sind, beziehen sich alle Angaben auf die jeweiligen hydrologischen Jahre.

Alle durchgeführten Arbeiten wurden in Versuchsjournalen dokumentiert.

Der Witterungsverlauf wird durch die meteorologischen Parameter Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Wind dokumentiert. Die Daten der in Tabelle 2 aufgeführten Messstationen wurden genutzt.

Tabelle 2: Verwendete Daten für die Darstellung des Witterungsverlaufes

Zeitraum	Station	Datenausgabe
1961 - 1990	Groß Lüsewitz	LJM Temperatur
1976 - 2000	Satower Straße	LJM Niederschlag
1961 - 1990	Warnemünde	LJM Sonnenscheindauer, zum Vergleich LJM Niederschlag und Temperatur
2000 - 2010	Rostock-Warnemünde	monatliche Sonnenscheindauer; zum Vergleich auch Niederschlag und Temperatur
2000 - 2004	Groß Lüsewitz	monatliche und tägliche Temperatur, beides auch zum Vergleich ab 2005
	Satower Straße	monatliche und tägliche Niederschläge, beides auch zum Vergleich ab 2005
2005 - 2010	Lysimeter Satower Str.	Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte; Daten der anderen Stationen weiterhin zum Vergleich

Um den Witterungsverlauf der hydrologischen Jahre einordnen zu können, wurden die aktuellen Werte mit den langjährigen Mittelwerten (LJM) verglichen. Zur Beurteilung der Niederschlagsereignisse wurde das LJM der Versuchsstation Satower Str. (1976-2000) herangezogen und zur Beurteilung des Temperaturverlaufes die LJM der Messstation Groß Lüsewitz (1961 – 90). Die aktuellen Daten und das LJM zur Sonnenscheindauer (1961 – 1990) lieferte die Station des Deutschen Wetterdienstes in Rostock-Warnemünde.



Abbildung 1: Wetterstation neben der Lysimeteranlage

2 RAHMENBEDINGUNGEN DES LYSIMETERVERSUCHES

Die Aufenthaltsdauer des Wassers und somit der Stoffe im Oberboden und in der bis 1 m Tiefe untersuchten ungesättigten Unterbodenzone ist von den Randbedingungen Bodenaufbau, meteorologische Verhältnisse sowie Bewirtschaftung abhängig.

2.1 Bodeneigenschaften

Der Bau der 68 Behälter umfassenden Lysimeteranlage erfolgte 1977/78. Eine umfassende Einführung zur Geschichte und Versuchsaufbau der Lysimeteranlage findet sich auf der beiliegenden CD.

Innerhalb der Lysimeter gab es zwei Varianten des Bodenaufbaus, die für die Verhältnisse in Nordostdeutschland typisch sind.

Tabelle 3: Bodenaufbau in den Lysimetern

Variante	Lysimeter Nr.	Bodenaufbau
a)	1 – 34	Sl 2/Su 2 schwach lehmiger Sand über schwach schluffigem Sand
b)	35 – 68	Sl 2/Sl 3 schwach lehmiger Sand über mittel lehmigem Sand

Die Behälter wurden mit den ausgewählten Böden befüllt und von Hand verdichtet.

Die Lysimeteranlage diente dann seit Ende der 70er Jahre gut 10 Jahre für Gülleversuche und bis Ende der 90er Jahre für den Vergleich von Bodennutzungssystemen.

Anfang der 90er Jahre erfolgte ein Austausch der obersten Bodenschicht (30 cm). Der neue Krumboden ist ein mittel lehmiger Sand (Sl 3).

Zu Beginn des Lysimeterversuches im Jahr 2000 wurde kein neuerlicher Bodenaustausch durchgeführt. Zur Status quo Bestimmung erfolgte eine Untersuchung des Oberbodens hinsichtlich pH-Wert, Körnung sowie Gehalt an Nähr- und Schadstoffen. Der Oberboden in den Lysimetern wies günstige bodenfruchtbarkeitsbestimmende Parameter auf. Die Qualität des Ausgangsbodens (0 – 30 cm) und des aufgebrauchten Baggergutes ist aus dem Zwischenbericht 2000/2001 auf der beiliegenden CD zu entnehmen.

2.2 Witterungsverlauf

Die erhobenen Wetterdaten zeigen innerhalb der 10 Untersuchungsjahre deutliche Schwankungen und Extrema, auch im Vergleich zu den langjährigen Mitteln.

Es gab z. T. große monatliche Abweichungen in Niederschlag und Temperatur, die Auswirkungen auf den Sickerwasseranfall und das Pflanzenwachstum hatten.

Aus Sicht des Niederschlages wird vor allem das hydrologische Jahr 2006/2007 als deutlich zu nass (+315 mm) und im Gegensatz dazu das hydrologische Jahr 2002/2003 als zu trocken (- 113 mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel eingeschätzt.

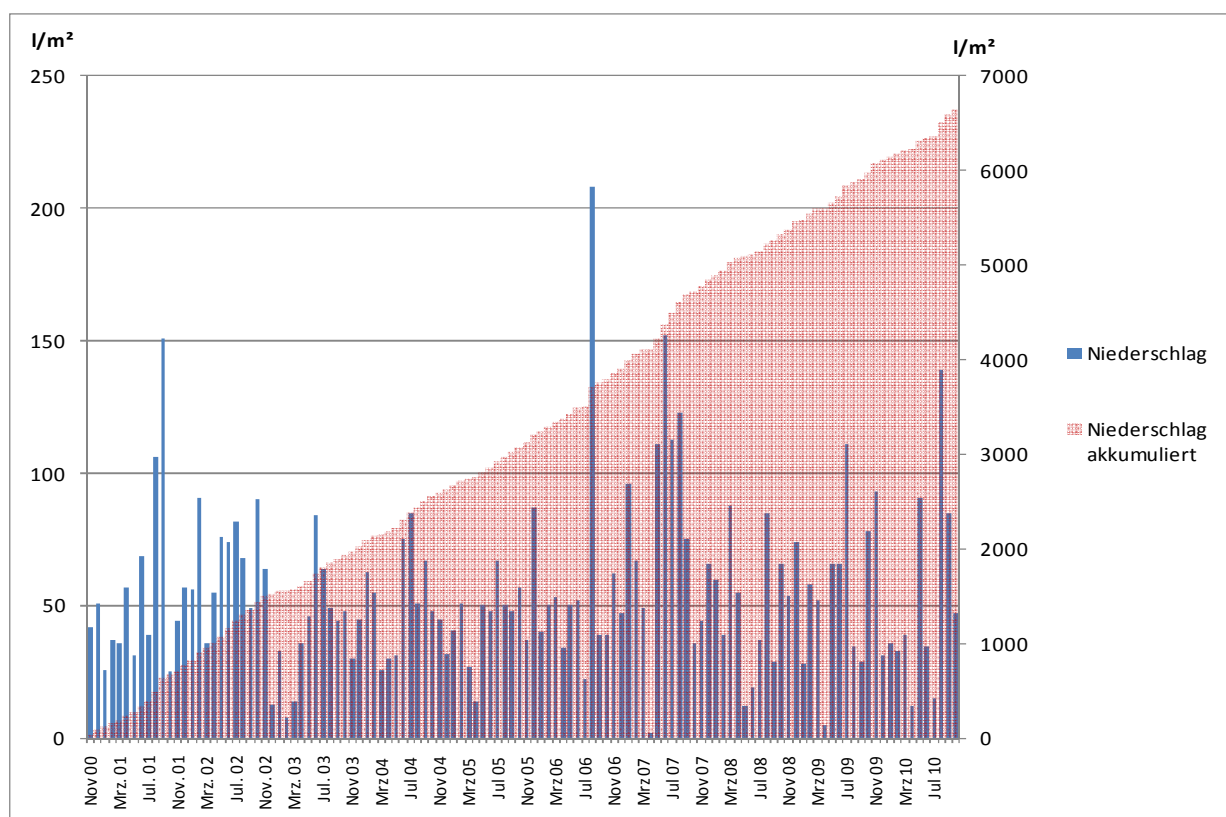


Abbildung 2: Niederschlag der Jahre 2000 bis 2010 am Standort der Lysimeterstation

Aus Sicht des Temperaturverlaufes waren bis auf das hydrologische Jahr 2009/2010 (- 0,6 °C) alle Jahren zu warm.

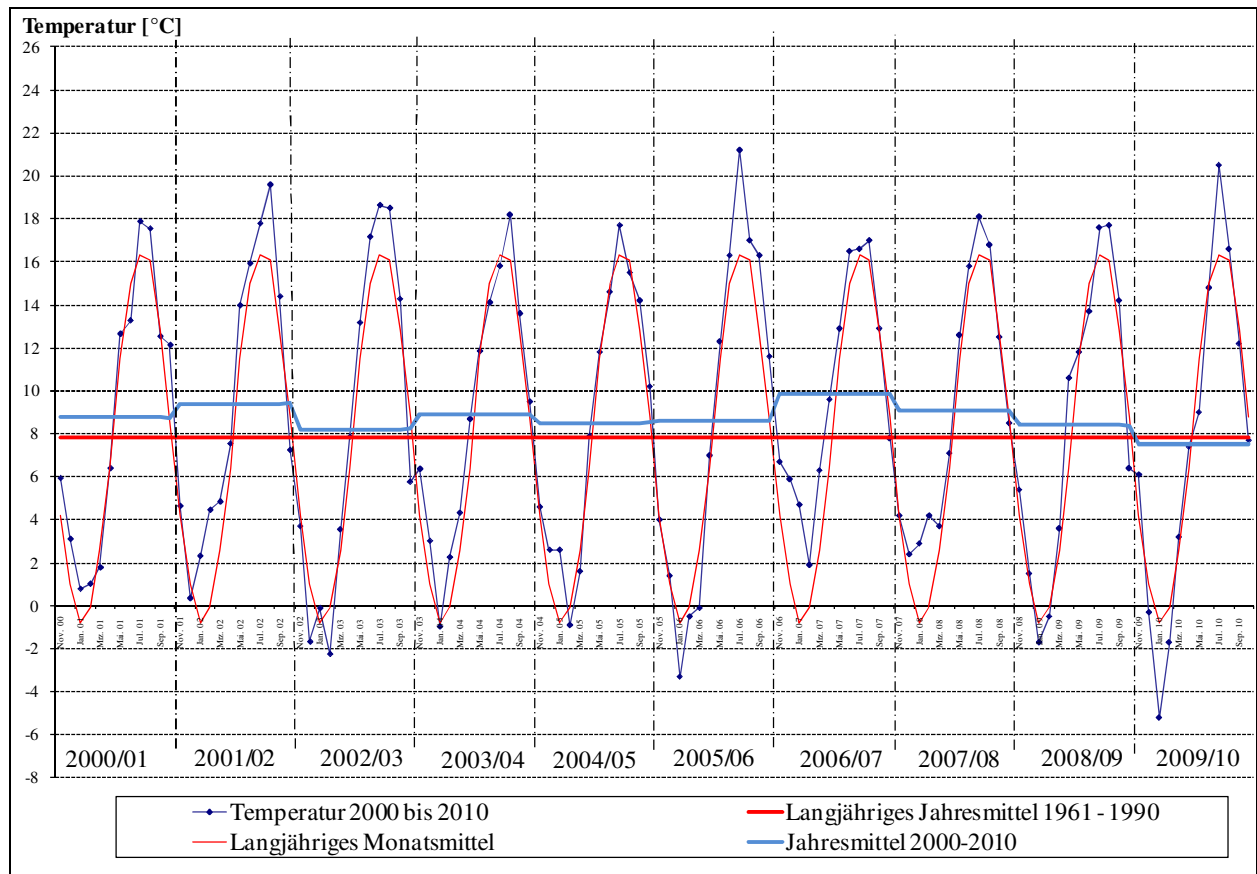


Abbildung 3: Temperaturverlauf über die einzelnen hydrologischen Jahre sowie die LJM

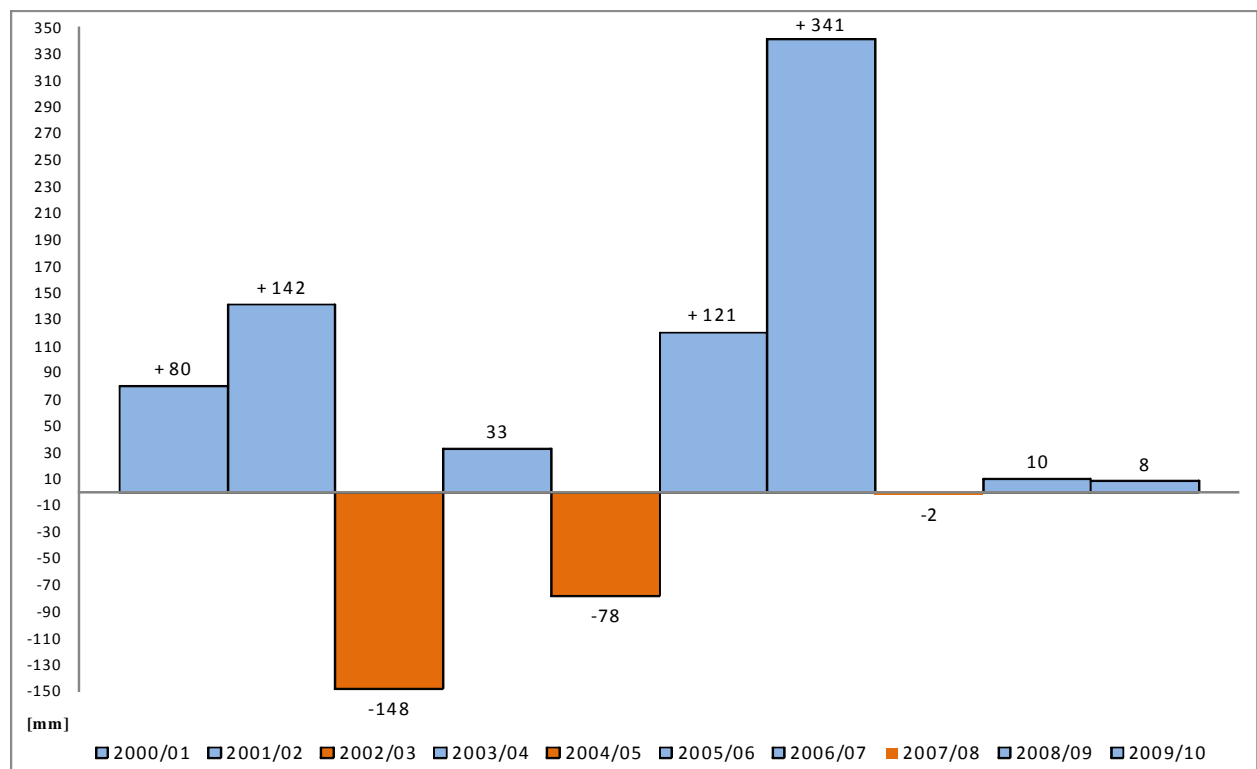


Abbildung 4: Klimatische Wasserbilanz der 10 Untersuchungsjahre

2.3 Kulturpflanze

In den 10 Versuchsjahren wurde auf der gesamten Versuchsfläche (Lysimetern und Randbereiche) immer Mais angebaut.

Maisanbau bietet folgende Vorteile:

- fruchtfolgetechnisch mit sich selbst verträglich ist (Nachbau ohne Bodenermüdung, keine Krankheits- und Schaderregerhäufung)
- einfacher Anbau und Ernte
- einfache Ertragsermittlung und Inhaltsstoffbestimmung

3 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Mit der gewählten komplexen Versuchsanstellung konnten wesentliche, noch offene Fragen zur Risiko- und Gefährdungsabschätzung bei der praktischen Baggergutverwertung im Land- und Landschaftsbau geklärt werden.

Über den Gesamtuntersuchungszeitraum wurden folgende grundsätzlichen Effekte festgestellt:

1. Durch den Baggerguteinsatz ändern sich die **Menge** und die **stoffliche Zusammensetzung** des **Sickerwassers**.
2. Mit zunehmender Aufwandmenge an **Baggergut** und durch die **mineralische N-Düngung**, ist ein **geringerer Sickerwasseranfall** zu verzeichnen. Hier wirkt sich das sehr hohe Wasserspeichervermögen des Baggergutes aufgrund der hohen Gehalte an $C_{org.}$, Ton und Schluff aus. Des Weiteren verbessern sich die Wachstumsbedingungen durch die N-Düngung, was eine verstärkte Wasseraufnahme durch die Pflanze ermöglicht.

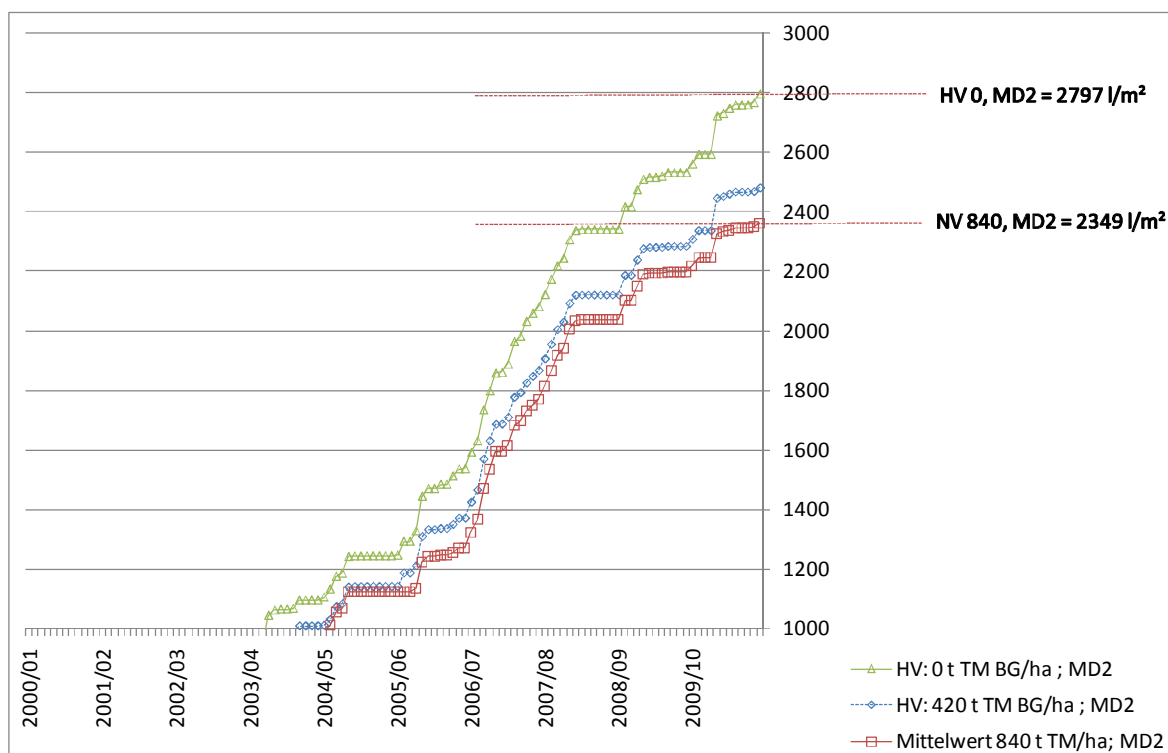


Abbildung 5: Sickerwassermenge nach Varianten abhängig von der Aufwandmenge und der Düngung

3. Bei **einmaliger Ausbringung** einer relativ **großen Menge** an **Baggergut** (420 t TM BG/ha) sind nach einem **starken Austrag** vor allem der leicht auswaschbaren Ionen **im ersten Versuchsjahr** auch nach 9 weiteren Versuchsjahren meist (Ausnahme Chlorid) noch leicht erhöhte Konzentrationen an Nährstoff- und Salzionen (Sulfat, Magnesium, Kalzium) festzustellen.
4. Die **Aufteilung** einer noch **größeren Menge** an **Baggergut** (840 t TM BG/ha) **auf mehrere Teilgaben** in drei aufeinander folgenden Jahren (3 x 280 t TM BG/ha) verhindert einen extrem hohen Austrag von Salz- und Nährstoffionen zu Beginn. Der Austrag in den nachfolgenden Jahren ist etwas höher als bei der Vergleichsvariante im Hauptversuch (HV 420, MD2). In der Summe liegt zwar der Gesamtaustrag an Salzen und Nährstoffen bei den Varianten mit 840 t TM BG/ha i.d.R. (Ausnahme P und N) deutlich höher als bei 420 t TM BG/ha, es erfolgt aber keine Verdoppelung (Mehraustrag nur 30 % bis 70%).
5. Die Aufbringung von **Baggergut führt zu keinem erhöhten Austrag an Nitrat und Phosphor** (Ausnahme Stickstoff NV I – 840 t TM/ha bei C_{org} 2, hier evt. durch den hohen C_{org}-Ausgangsgehalt bedingt). Stickstoff und Phosphor sind fest im Baggergut gebunden, es erfolgt nur eine sehr langsame Freisetzung.

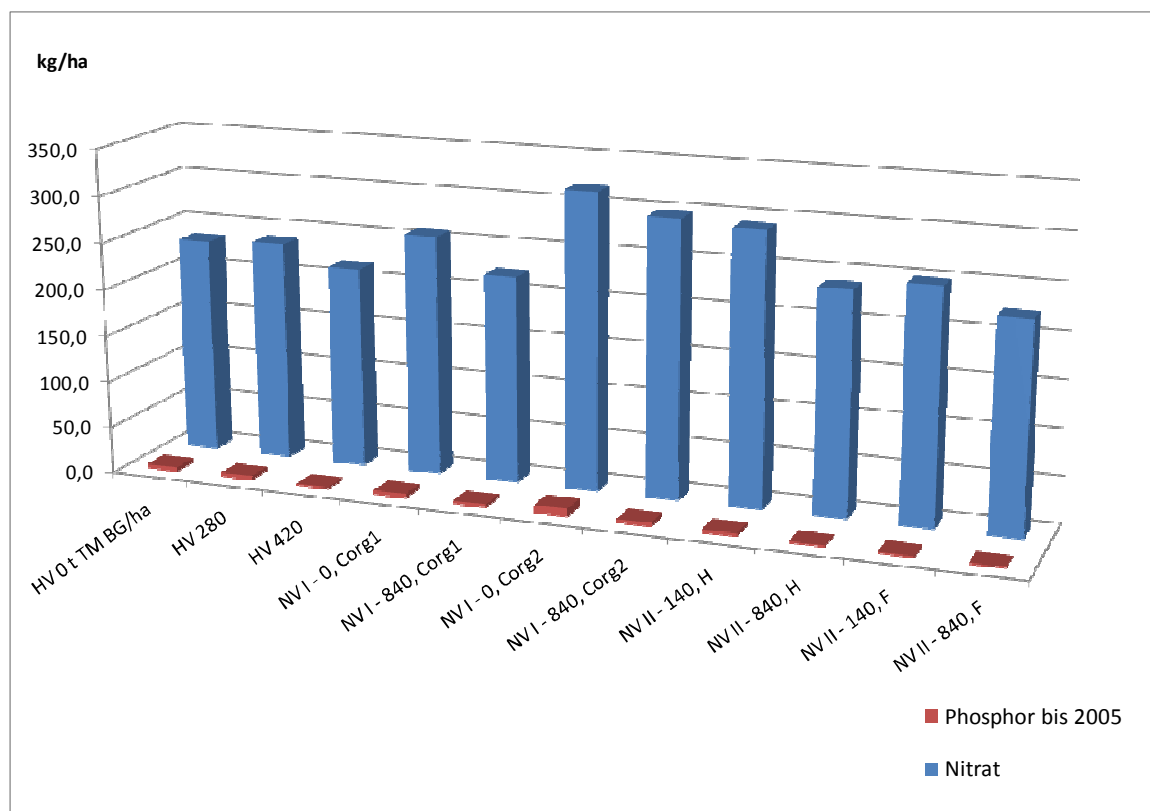


Abbildung 6: Austräge an Nitrat und Phosphor

6. Im Nebenversuch I mit mehrmaliger Baggergutausbringung bei **unterschiedlichem C_{org} -Ausgangsgehalt** ergibt sich **kein signifikanter baggergutbedingter Unterschied beim Gesamtaustrag an Nährstoff- und Salzionen** zwischen den Varianten mit einem niedrigerem C_{org} -Ausgangsniveau (0,93%) und den Varianten mit einem höheren C_{org} -Ausgangsniveau (1,24%, Ausnahme Nitrat-Stickstoff siehe 5.)

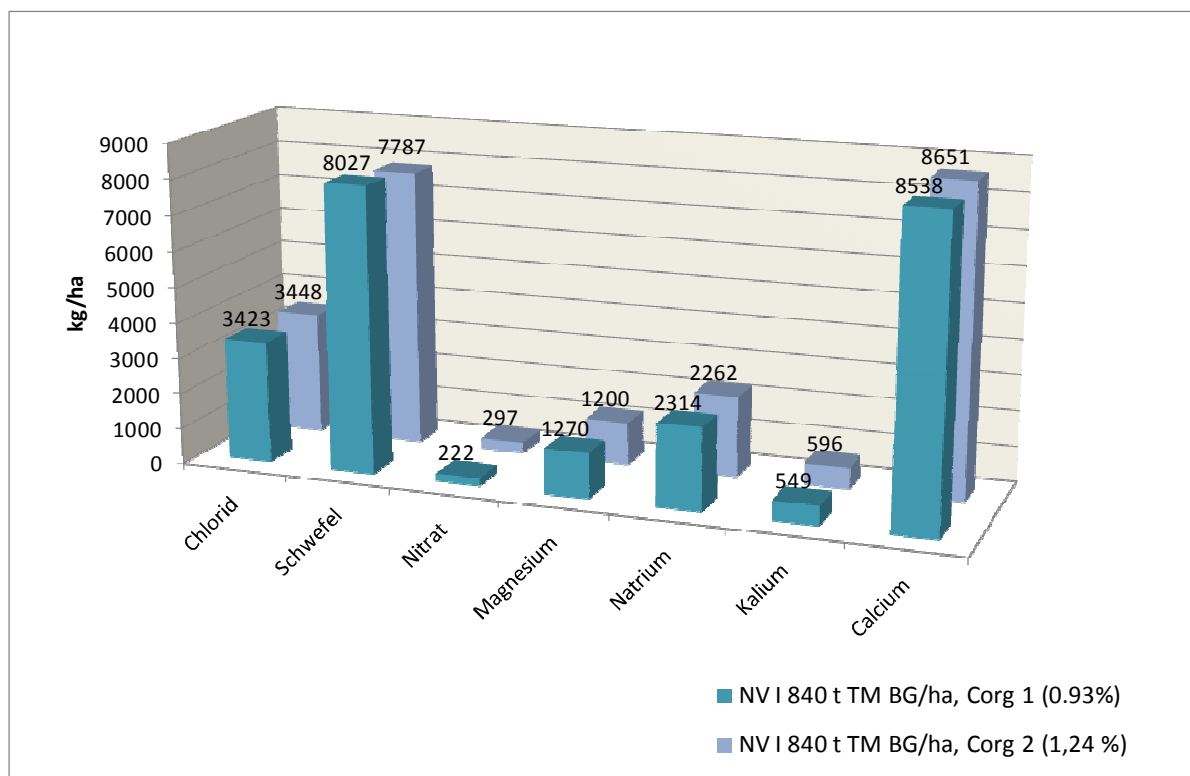


Abbildung 7: Stoffausträge über 10 Jahre bei unterschiedlichem C_{org} -Ausgangsniveau

7. Bei **Frühjahrsausbringung** erfolgte im Vergleich zur Herbstausbringung **teilweise bis zum Versuchsende ein geringerer Gesamstoffaustrag (Ausnahmen Schwefel und Calcium)**, aber vor allem im ersten Jahr ist die Wirksamkeit der nicht ausgewaschenen Salzionen auf die Kulturpflanze stärker.

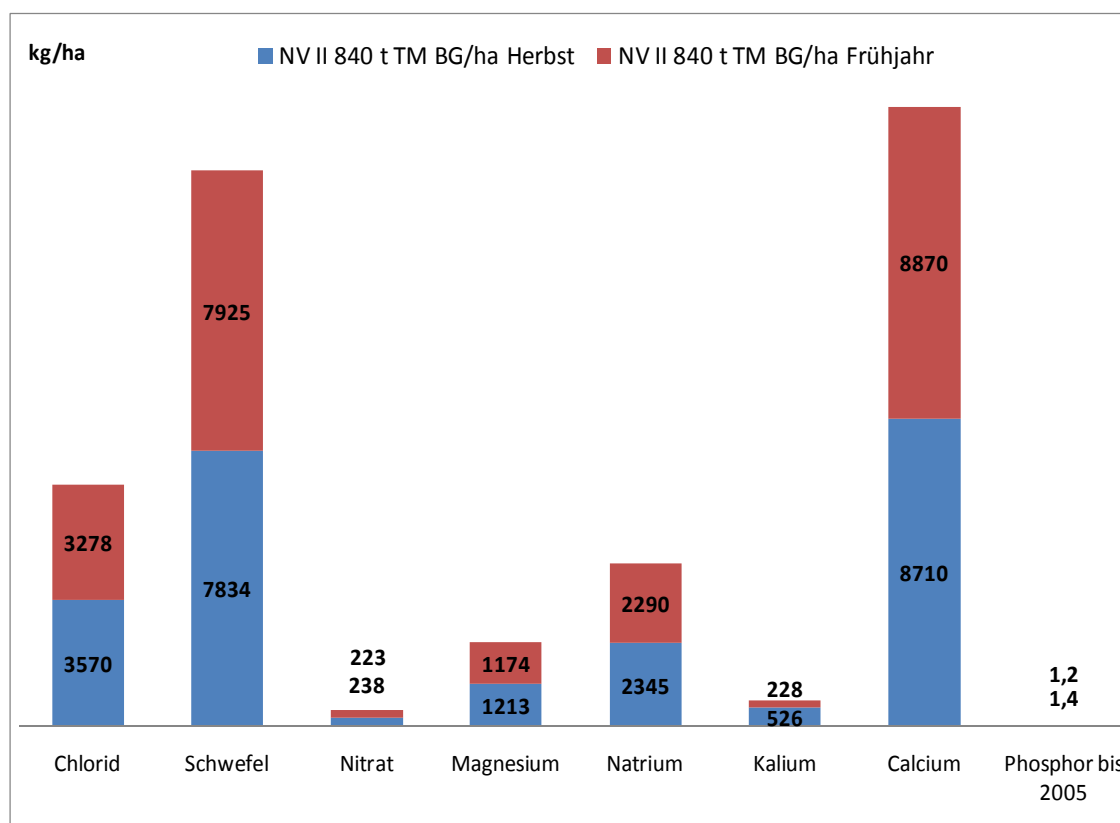


Abbildung 8: Stoffaustrag nach Herbst- und Frühljahrsausbringung

8. Das **Baggergut beeinflusste nicht die Konzentrationen** und damit auch **nicht die Austräge an Schwermetallen und organischen Schadstoffen im Sickerwasser**.
9. Von den **Zinnorganika** wurden übereinstimmend bei allen Varianten (auch ohne Baggerguteinsatz) **nur die Abbauprodukte Dibutylzinn und Monobutylzinn in äußerst geringen Konzentrationen** nachgewiesen. Das deutet auf letzte Rückstände von Pflanzenschutzmittelanwendungen aus vorangegangenen Versuchsanstellungen hin. Die Stoffquelle Baggergut spielt eine untergeordnete Rolle.
10. Die Zufuhr von **Baggergut verbessert** deutlich **die Bodenstruktur, das Wasser- und Nährstoffbindungsvermögen sowie den Nährstoffpool des Bodens**. Durch die unterschiedlich hohe Baggergutaufbringung ist eine deutlich abgestufte Anhebung der bodenfruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften (Anhebung pH, T-Wert, Tongehalt, C_{org} , $CaCO_3$, Nährstoffe) in den einzelnen Varianten feststellbar.
11. **Bei Baggerguteinsatz** ist in Hinblick auf hohe Erträge **kein Verzicht auf eine mineralische N-Düngung**, aber eine Reduzierung des Aufwandes anderer Nährstoffe wie Phosphor, Kalium und Magnesium möglich.

12. Im Hauptversuch führte unabhängig von der Baggergutaufbringung die doppelte N-Gabe zur Aussaat zu einer deutlichen Ertragssteigerung. Die unter 10. erwähnten Vorteile der Baggergutvarianten mit dreimaliger Aufbringung ergaben für die Pflanzen einen weiteren Massezuwachs, da **durch** das **Baggergut** auch **schlechte Witterungsbedingungen** eher **ausgeglichen** werden. Das macht deutlich, dass bei den Pflanzen in den baggergutreichen Varianten die Wachstumsvorteile überwiegen.
13. In den untersuchten **Pflanzenbestandteilen** waren (**keine Anreicherungen** in Bezug auf **Schwermetalle und andere Schadstoffe** in den Varianten mit Baggergutaufbringung gegenüber den Nullvarianten festzustellen (gleich bleibende Qualität).
14. Im **Boden** kam es gegenüber den Nullvarianten durch die Baggergutaufbringung zu einer **geringfügigen Erhöhung** der **Schwermetallkonzentration** bei den Elementen Zink, Arsen, Nickel, Cadmium und Quecksilber. Kupfer, Blei und Chrom zeigten kaum eine Erhöhung der Schwermetallkonzentration im Boden durch den Baggerguteinsatz (Untersuchung nur bis 2005).

3.1 Veränderungen der Bodeneigenschaften

Grundlage der Bewertung sind die Ergebnisse der Bodenprobenahme vor Einrichtung der Lysimeterversuche Ende Oktober 2000, die bodenchemische Kennzeichnung des Baggergutes vor Aufbringung sowie die Ergebnisse der Bodenprobenahmen zum Ende der HJ 2000/01 – 2009/10 nach Abschluss der Vegetationsperiode. Die fruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften verbesserten sich mit zunehmender Baggergutaufwandmenge. Anfangs stiegen die Gehalte an Chlorid, Sulfat und Natrium im Oberboden infolge der Baggergutaufbringung und des damit verbundenen Salzeintrags deutlich an. In den Folgejahren sanken durch die niederschlagsbedingte Auswaschung die Gehalte auf das Niveau der Nullvarianten wieder ab. Bei einigen Schwermetallen (Messung bis 2005) kam es zu einer leichten Erhöhung der Gehalte im Oberboden. Diese liegen aber weit unter denen der VSW für Lehm der BBodSchV.

In den Grafiken der einzelnen Jahresberichte sind zusätzlich zu Vergleichszwecken für die Nährstoffe, in Abhängigkeit der Bodenart, die anzustrebenden, optimalen Bodengehalte nach LUFA Rostock bzw. für Schadstoffe die ebenfalls bodenartabhängigen Vorsorgewerte der BBodSchV aufgeführt. Die den gesamten Untersuchungszeitraum

umfassenden Grafiken des letzten Jahresberichtes 2009/10 sind der beiliegenden CD zu entnehmen. Die Grafiken zu den Schadstoffen (Untersuchungsabschluss 2005) sind in der Anlage des Berichtes 2004/05 auf der beiliegenden CD.

3.1.1 Grundeigenschaften

Wassergehalt (WG)

Aufgrund des sehr guten Wasserspeichervermögens des Baggergutes, ist mit steigender Baggergutaufwandmenge ein höherer Wassergehalt im Oberboden zu verzeichnen. Zum Beispiel konnte durch die Aufbringung von 840 t TM Baggergut/ha eine Erhöhung des Wassergehaltes um ca. 10 % erzielt werden, die auch zum Versuchsende noch gegeben war.

pH-Wert, Kalkgehalt (CaCO₃)

Der hohe Kalkgehalt sowie die dadurch bedingte schwach basische Reaktion des Baggergutes führten durch die Baggergutaufbringung zu einer deutlichen pH-Wertanhebung (eine pH-Stufe). Die Zunahme des Kalkgehaltes im Oberboden mit steigender Baggergutaufwandmenge unterstützt diese Aussage.

Gehalt an Organischer Substanz (C_{org.} bzw. TOC * 1,724)

Mit zunehmender Baggergutaufwandmenge erhöhten sich auch die Gehalte an Organischer Substanz im Oberboden. Das erhöhte Niveau blieb über den gesamten Untersuchungszeitraum erhalten. Das zeigt die hohe Stabilität der über das Baggergut aufgebrauchten Organischen Substanz im Verbund mit dem hohen Feinanteil (mineralisch-organische Komplexe). Es belegt auch die bei anderen Baggergutanwendungen (Rekultivierung von Deponien) festgestellte hohe Aggregatstabilität, die aus Sicht der hier nachgewiesenen Stabilität der organischen Substanz mindestens mittelfristig anhält.

Ton

Da sich der Tongehalt im Boden nach der Baggergutaufbringung nur sehr langsam ändert (Tonverlagerung dauert Jahrhunderte (Gisi 1997)), erfolgte je Variante nur eine Untersuchung nach der Aufbringung. Die dritte Baggergutgabe, bei einer Gesamtaufwandmenge von 840 t TM BG/ha, führte zu einer Verdopplung des Tongehaltes im Oberboden im Vergleich zum Ausgangsniveau.

Kationenaustauschkapazität (T-Wert)

Der T-Wert ändert sich nur in Abhängigkeit der Gehalte an Organischer Substanz und Ton. Da die Baggergutaufbringung nachweislich die Gehalte an Organischer Substanz und Ton erhöhte, wurde auch die Kationenaustauschkapazität in den Oberböden der Varianten mit Baggergutaufbringung deutlich verbessert. Die dritte Baggergutgabe führte bei den entsprechenden Varianten im Vergleich zu den Varianten ohne Baggergutaufbringung zu einer Verdopplung des T-Wertes. Damit war ein deutlich verbessertes Bindungsvermögen für Nähr-, aber auch Schadstoffe gegeben, das aufgrund der Stabilität der beiden Rahmenparameter (OS, Ton) auch bis zum Versuchsende erhalten blieb.

Salzkonzentration (SK)

Die Salzkonzentration ist deutlich von der Baggergutaufwandmenge abhängig. Nach einem Anstieg der SK in Folge der Baggergutaufbringung sank die Salzkonzentration im Laufe der Untersuchungsjahre im Oberboden aller Varianten mit Baggergutgabe deutlich, fast bis auf das Niveau der Nullvarianten, ab.

Sulfat-Schwefel (SO₄²⁻-S)

Die Gehalte an Sulfat im Oberboden stiegen nach der Baggergutaufbringung zunächst stark an, z.B. nach einmaliger Aufbringung von 420 t BG TM/ha um das 420fache. Danach sanken sie bis zum Abschluss der Versuche auf ein Niveau wie bei den Varianten ohne Baggergutaufbringung. Die erhöhten Sulfatausträge über das Sickerwasser zeigen jedoch, dass auch künftig noch beachtliche Mengen aus dem im Boden vorhandenen Schwefel nachgelöst werden, da der über das Baggergut eingebrachte Schwefelvorrat noch lange nicht aufgebraucht ist (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Abnahme des Gehaltes an Salzen und Phosphor im Oberboden, Austrag über Sickerwasser + Entzug Pflanzen im Mittel der 4 Varianten mit 840 t TM BG/ha; MD2 nach 10 Jahren

	Einheit	Sulfat	Schwefel	Chlorid	Natrium	Phosphor
Gehalt im Baggergut	mg/100 g	418	4490	389	457	180
Zufuhr mit 840 t TM BG	kg/ha	3511	37716	3268	3839	1512
Entzug durch Pflanzen	kg/ha	0,04	0,04	0,18		0,1
Austrag über Sickerwasser	kg/ha	23876	7879	3424	2317	4,8
Entzug + Austrag gesamt	kg/ha	23876	7879	3424	2317	4,9
relativ zur Zufuhr*	%	680	21	105	60	0,3

* vernachlässigt wird die Zufuhr über die Düngung

Austauschbares Natrium (Na⁺)

Bei den Varianten mit einmaliger Baggergutaufbringung waren die Gehalte an austauschbarem Natrium nach kurzzeitig starkem Anstieg (2001) bereits bis zum Herbst 2003 zum Teil deutlich (420 t TM BG/ha) wieder zurückgegangen. Bei den Varianten mit mehrfacher Baggergutgabe führte jede Teilgabe bis zur letzten Gabe 2003 zu einer starken Anhebung der Gehalte (ca. das 20-fache zum Ausgangswert). Aber auch bei diesen Varianten sanken die Gehalte im Oberboden bis zum Versuchsende fast wieder auf das Ausgangsniveau zurück.

Chlorid

Im Oberboden der Varianten mit Baggergutgabe stiegen die Gehalte im ersten Jahr nach der Aufbringung bzw. bei Mehrfachaufbringung bis zum Jahr nach der letzten Gabe an, um aber dann rasch wieder auf das Ausgangsniveau zu sinken. Ursachen für kleinere Schwankungen sind zum einen die Salzeinträge durch die Mineraldüngung im Frühjahr und die Auswaschungsintensität im Jahresverlauf und andererseits die Variabilität der Messwerte auf diesem niedrigen Konzentrationsniveau.

3.1.2 Schadstoffe

Schwermetalle (Gesamtgehalte)

Während bei **Blei**, **Kupfer** und **Chrom** kein Einfluss des Baggergutes auf die Gehalte im Oberboden zu verzeichnen war, kam es bei **Nickel**, **Quecksilber**, **Zink**, **Cadmium** und **Arsen** zu einer sehr geringen Erhöhung des Gesamtgehaltes. Bis zum Versuchsende sanken die Gehalte außer bei Arsen aber wieder leicht ab. Alle Gehalte liegen aber deutlich unter den substratspezifischen Vorsorgewerten (VSW) der BBodSchV für die Bodenart Lehm und auch unter der 70 % Grenze dieser VSW, die als Grenzwert für eine landwirtschaftliche Folgenutzung gilt.

Organische Schadstoffe

Die gem. Bundesbodenschutzverordnung untersuchten Organischen Schadstoffe **PAK** und **PCB** lagen ebenfalls deutlich unter der 70 % Grenze des Vorsorgewertes für die Bodenart Lehm.

3.1.3 Nährstoffe und Mikronährstoffe

Gehalt an N_{\min} - (NO_3 -N + NH_4 -N)

Die Gehalte an N_{\min} zeigen seit Versuchsbeginn eine gewisse Abstufung in Abhängigkeit der Baggergutgabe, wobei die absolute Höhe stärker durch die Auswaschungsintensität und den Entzug der Kulturpflanze (Maisertrag) bestimmt wird. Bis zum Herbst 2005 lagen die Gehalte auf ähnlichem Niveau, sanken in den Jahren 2006 und 2007 etwas ab, um 2008 aufgrund der fast völlig ausgebliebenen Auswaschung in der Vegetationsperiode das höchste Niveau während der gesamten Versuchszeit zu erreichen. In den letzten beiden Versuchsjahren lagen die Werte relativ niedrig, aufgrund erheblicher Niederschläge und der resultierenden starken Auswaschung.

Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor

Trotz keiner zusätzlichen mineralischen P-Gabe seit 2001 lag der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor aufgrund der hohen P-Düngung im Frühjahr 2001 und geringer P-Mobilität anfangs auf einem sehr hohen Niveau. Waren in den ersten zwei Jahren noch in allen Varianten ähnliche Gehalte, so differenzierte sich das danach immer stärker entsprechend der Baggergutaufwandmenge. Bei den Varianten mit Baggergut sank das Niveau nur geringfügig ab, aber bei Varianten ohne Baggergut halbierte es sich. Ursache ist der hohe Phosphorvorrat in der Organischen Substanz des Baggergutes, der langsam aber stetig freigesetzt wird. Über alle Varianten wurde ein leichtes Absinken des P-Niveaus im Vergleich zu den Vorjahren ermittelt. Zum Versuchsende ist das niedrigste Niveau seit Beginn der Versuche zu verzeichnen. Es liegt aber immer noch deutlich über dem für landwirtschaftlich genutzte Böden anzustrebendem Niveau.

Gehalt an pflanzenverfügbarem Kalium

Erfolgte für Kalium wegen des ausreichenden Gehaltes an pflanzenverfügbarem Kalium im Oberboden ab dem Frühjahr 2002 keine mineralische Zusatzgabe, so wurde in den Frühjahren 2006 und 2007 nochmals nach Bedarf gedüngt, weil die Gehalte bis 2005 zum Teil deutlich absanken. Über die Jahre blieb aber der gegenüber den Nullvarianten erhöhte K-Gehalt bei Baggergutanwendung im Boden erhalten. Die 2006 und 2007 erfolgte Düngung der Parzellen (auch der Nullparzellen) führte zu höheren Gehalten. Die ab Frühjahr 2008 ausbleibende K-Gabe führte dazu, dass die Gehalte wieder absanken und in diesem Jahr innerhalb des optimalen Kaliumgehaltes für Böden lagen. Dies ist ein Zeichen dafür, dass Kalium stärker als andere Nährstoffe der Auswaschung

unterliegt und auch unter diesen Bodenverhältnissen im Abstand mehrerer Jahre wieder nachgedüngt werden muss.

Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium

Aufgrund der sehr hohen Gehalte an Mg im Baggergut führte eine steigende Aufwandmenge an Baggergut zu einem deutlich höheren Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium im Oberboden. Im Laufe des Untersuchungszeitraums sank der Gehalt geringfügig aber stetig ab, liegt aber nach 10 Versuchsjahren noch immer über dem anzustrebenden, optimalen Magnesiumgehalt im Boden.

Pflanzenverfügbare Gehalte an Mikronährstoffen

Da das eingesetzte Baggergut auch sehr hohe pflanzenverfügbare Gehalte an den Mikronährstoffen **Bor, Zink, Molybdän, Mangan** und **Kupfer** aufwies wurden mit zunehmender Aufwandmenge an Baggergut auch höhere pflanzenverfügbare Gehalte im Oberboden festgestellt. Mit Ausnahme von Mangan war bei allen anderen Mikronährstoffen die höchste Gehaltsklasse E (keine Düngung erforderlich) zur Beurteilung der Nährstoffversorgung gegeben.

Aufgrund des pH-Anstiegs durch das Baggergut, liegt der Gehalt an pflanzenverfügbarem Mangan unter dem Bereich einer optimalen Versorgung, da Mangan ab einem neutralen pH-Wert im Boden zunehmend festgelegt wird. Erst durch die dritte Baggergutgabe im Herbst 2002 kam es zu einem geringfügigen Anstieg des Mangangehaltes, weil das Baggergut trotz schwach basischer Bodenreaktion höhere pflanzenverfügbare Gehalte an Mangan aufwies als der Ausgangsboden.

3.2 Sickerwasser

Bildliche Darstellungen zu den folgenden Aussagen entnehmen Sie bitte den Anhängen der Berichte 2004/05 (Schadstoffe, Mikronährstoffe) und 2009/10 (alle weiteren Parameter) auf der beiliegenden CD.

3.2.1 Sickerwassermenge

Der Sickerwasseranfall ist niederschlags- und vegetationsabhängig, wird aber auch vom Anteil des Baggergutes im Boden beeinflusst. Die nachfolgenden Abbildungen 9 und 10 zeigen deutlich diese Abhängigkeit. Die Varianten mit einem großen Anteil an

Baggergut und höchste Düngung zeichnen sich durch ein hohes Wasserspeichervermögen aus.

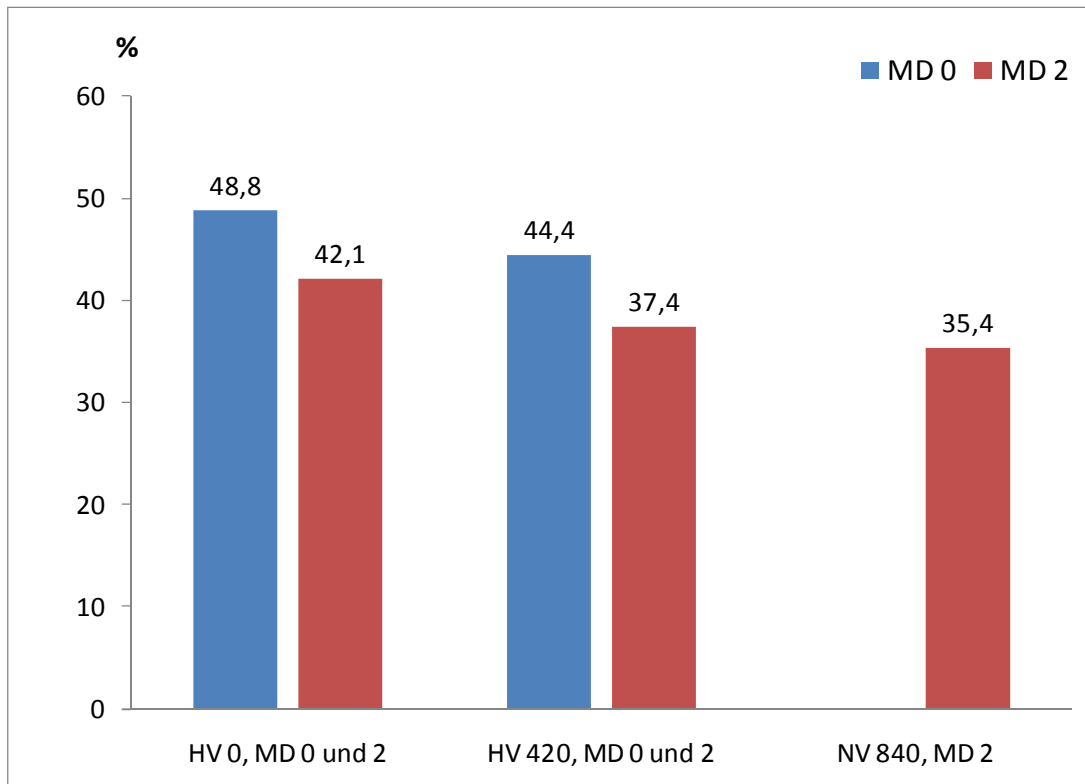


Abbildung 9: als Sickerwasser angefallener Niederschlag in % in Abhängigkeit der Baggergut-aufwandmenge und der Düngung

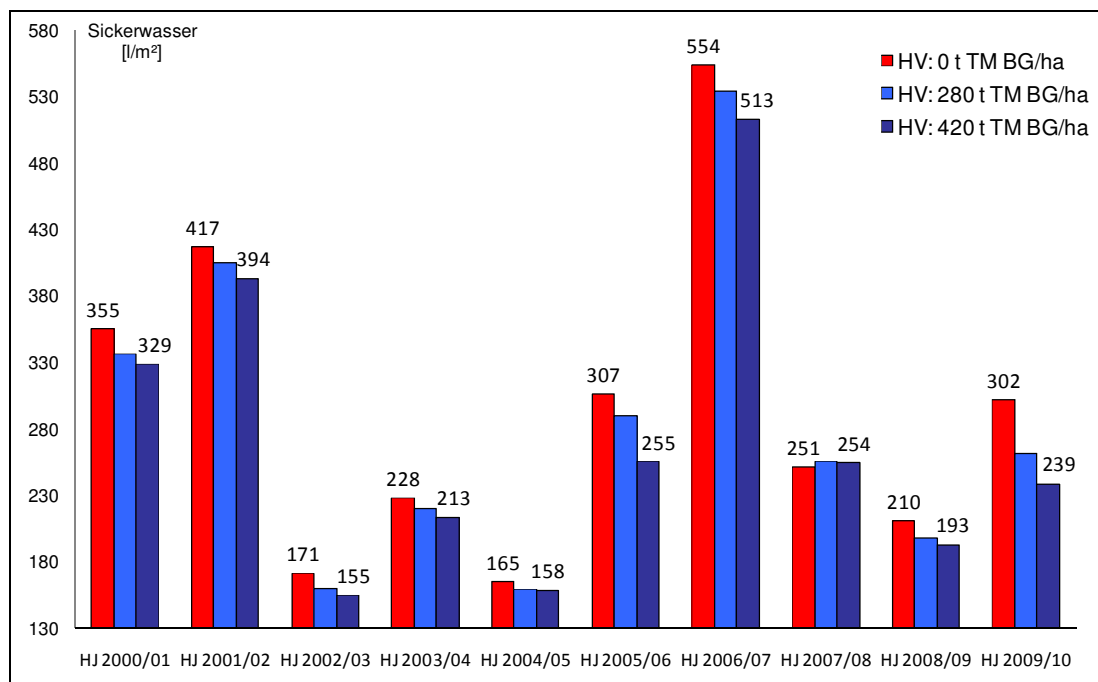


Abbildung 10: Sickerwassermenge Hauptversuch in den HJ 2000/01 bis 2009/10 (im Mittel der Va-rianten, keine Differenzierung nach Düngung)

3.2.2 Sickerwasserqualität

Die Gehalte der einzelnen Parameter wurden im Sickerwasser jeweils monatlich in den 17 Teilvarianten durch die LUFA Rostock ermittelt. Die Leitfähigkeit wurde bei der Probenahme gemessen. Einen Überblick über die Sickerwasserqualität gibt die Tabelle 5.

Tabelle 5: Vergleich der Mittelwerte im Sickerwasser mit Prüfwerten der BBodSchV und Entwurf Mantelverordnung 2011 (Fett gedruckt = Überschreitung, Klammerausdruck Einzelwert)

Parameter	Einheit	BBodSchV Prüfwert 1999	Entw. Mantel- verordnung 2011*	HV 0, MD2	HV 42, MD2	NV 84, MD2
Blei	µg/l	25	7	< 10	< 10	< 10
Cadmium	µg/l	5	0,5	< 0,4	0,5	< 0,4
Chrom, ges.	µg/l	50	7	< 4	< 4	< 4
Kupfer	µg/l	50	14	6,8 (23)	5,7 (22)	5,1
Nickel	µg/l	50	20	< 10	< 10	< 10
Quecksilber	µg/l	1	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
Zink	µg/l	500	58	20	20	20
Chlorid	mg/l		250	30	230	200
Sulfat	mg/l		240	25	950	1415
Nitrat	mg/l		50	33	46	48
Ammonium	mg/l		0,5	0,6 (5,34)	0,5	0,3
Mineralölkohlen- wasserstoffe	µg/l		200	0,2	0,2	-

* Prüfwert für die Konzentration anorganischer und organischer Stoffe im Sickerwasser am Ort der Beurteilung

Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit als Parameter für die Summe aller gelösten Stoffe im Wasser gibt hier einen Überblick über die gelösten Salze im Sickerwasser. Verursachte der Baggerguteinsatz anfangs einen starken Anstieg der Leitfähigkeit im Sickerwasser, sanken im Hauptversuch die Werte der Leitfähigkeit bei Varianten mit Baggerguteinsatz nach der ersten Auswaschungsperiode im Winter 2000/01 deutlich ab und bewegen sich ab dem Zeitraum Sommer 2007 nahezu auf dem gleichen, niedrigen Ausgangsniveau um ca. 500 µs/cm. Nur wenn nach stärkeren Niederschlägen die Auswaschung zunimmt steigt kurzfristig die Leitfähigkeit im Sickerwasser wieder an. In den Nebenversuchen ergaben sich durch die Mehrfachbaggergutaufbringung mehrere Perioden mit deutlicher Zunahme der Leitfähigkeit. Aber auch bei diesen Varianten nahm langfristig gesehen die Leitfähigkeit ab. Seit dem Sommer 2007 hat sich ein gleichbleibendes Niveau einge-

stellt, wobei die Leitfähigkeit im Sickerwasser der Varianten mit der höchsten Baggergutaufwandmenge (840 t TM/ha) aber immer noch um das 2- bis 3-fache höher ist als bei den Varianten ohne Baggerguteinsatz.

pH-Wert

Die pH-Werte des Sickerwassers bewegten sich mit Werten zwischen 7,2 und 8,9 im schwach bis mäßig basischen Bereich. Die im HJ 2000/01 festgestellte Differenzierung zwischen den Varianten mit Baggerguteinsatz - niedrigere pH-Werte und den Varianten ohne Baggergutaufbringung - höhere pH-Werte, verblasste in dieser Deutlichkeit im Laufe des Untersuchungszeitraums. Der jahreszeitliche Gang (höhere Werte im Herbst, niedrigere Werte im Frühjahr) ist in allen Varianten gegeben. Aber die Streuung der Werte ist sehr hoch.

Chlorid (Cl⁻)

Im Hauptversuch erfolgte nach der Baggergutaufbringung ein rascher Anstieg des Konzentrationsniveaus im Sickerwasser. Nach dem Konzentrationsmaximum im auswaschungsintensiven Winter des ersten Untersuchungsjahres fiel das Niveau sehr stark ab und erreichte bereits im zweiten Untersuchungsjahr das Niveau der Nullvariante. Dieses niedrige Konzentrationsniveau blieb bis zum Versuchsende bestehen.

In den Nebenversuchen ergaben sich bei den Varianten mit mehrfacher Baggergutaufbringung zunächst nach jeder weiteren Baggergutgabe auch weitere Konzentrationsmaxima, welche aber deutlich unter dem ersten Konzentrationsmaximum lagen. Danach sanken auch bei diesen Varianten die Gehalte an Chlorid im Sickerwasser auf das Niveau der Nullvarianten ab. Zeitweise wurden nur noch kleinere Schwankungen durch die höhere Auswaschungsintensität in den Herbst- und Wintermonaten augenfällig. Zudem wurden Effekte durch die Auswaschung vorhandener Düngesalze in den vergleichsweise sorptionsschwächeren, weil nicht mit Baggergut bzw. nur mit wenig Baggergut versorgten, Varianten, in den letzten Jahren sichtbar.

Sulfat (SO₄²⁻), Natrium (Na⁺), Magnesium (Mg²⁺), Kalzium (Ca²⁺), Kalium (K⁺)

Bei einmaliger Baggergutaufbringung im Hauptversuch sanken nach einem Konzentrationsmaximum im Winter des ersten Untersuchungsjahres 2000/01 die Gehalte im Sickerwasser zögernd aber stetig wieder ab. Die Konzentrationsniveaus erreichten nach 5 -7 Jahren das Niveau der Nullvarianten (Natrium, Kalium) bzw. lagen nur geringfügig dar-

über, was auch bis zum Versuchsende anhielt (Sulfat, Magnesium, Kalzium). Bei Kalium war nach 5 Jahren das Ausgangsniveau am schnellsten erreicht.

In den Varianten mit mehrmaliger Baggergutaufbringung stiegen anfänglich die Gehalte im Sickerwasser deutlich an, meist ohne das Konzentrationsmaximum der Baggergutvarianten des Hauptversuches zu erreichen und schwankten dann bis zu Beginn des HJ 07/08 auf hohem Niveau mit erheblicher Amplitude (meist im Sommer geringer und dann im Winter wieder etwas höher, anfangs natürlich auch bedingt durch die noch folgenden Baggergutaufbringungen). Dann sanken die Gehalte stetig, liegen aber immer noch, weitaus deutlicher als im Hauptversuch, über dem Niveau der Nullvarianten (Ausnahme Natrium). Für die weiterhin erhöhten Gehalte bei den Varianten mit der höchsten Baggergutgabe von 840 t TM BG/ha ist der große Elementvorrat im Baggergut verantwortlich, der weiterhin Ionen nachliefert. Die Konzentration an Na^+ nahm jedoch im Gegensatz zu den anderen Salz-Ionen innerhalb der letzten 2 Jahre fast bis auf das Niveau der Nullvarianten ab.

Die Konzentrationsentwicklung bei Kalium wurde über die Versuchsdauer durch die Vorversuche, insbesondere der Gülleversuche von 1978 – 87, beeinflusst. Bei der Betrachtung des Elementes Kalium ist zu beachten, dass hier die Nachwirkungen der Vorversuche die Effekte des Baggergutes abschwächen und sogar teilweise überdecken (s.a. Bericht 2009/10 Pkt. 3.2.5 auf der CD)

Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+) und Phosphor ($\text{P}_{\text{ges.}}$)

Durch die Baggergutaufbringung ist kein interpretierbarer Unterschied bei Nitrat, Ammonium und Phosphor zwischen den Varianten im Hauptversuch bzw. in den Nebenversuchen zu erkennen. Für den gesamten Untersuchungszeitraum ist festzustellen, dass durch das Baggergut kein Mehraustrag dieser Stoffe induziert wird. Das eingearbeitete Baggergut ist also in der Lage, sowohl das düngungsbedingt zugeführte als auch das aus dem Baggergut frei werdende leicht auswaschbare Nitrat und Ammonium durch das höhere Sorptionsvermögen gut zurückzuhalten. Bei Phosphor zeigt sich, dass aus dem Baggergut kein Phosphor ausgewaschen wird, im Gegenteil, das Baggergut ist in der Lage gedüngtes bzw. bodenbürtiges Phosphor vor der Auswaschung zurückzuhalten (niedrigeres Konzentrationsniveau als bei Nullvarianten, siehe Bericht 2004/05 auf der CD).

Der Trend der jahreszeitlichen Schwankungen (auswaschungsbedingt im Winter niedrige bzw. im Sommer höhere Werte) ist bei allen Versuchsvarianten zu beobachten. Die

Untersuchungen auf Phosphor und Ammonium wurden wegen gegebener Aussagesicherheit nach dem HJ 2004/05 eingestellt.

Gehalte an Mikronährstoffen

Trotz hoher Gehalte an verfügbarem **Bor, Molybdän, Mangan und Eisen** im Baggergut wurden im Sickerwasser normale (B, Mo) bzw. nur geringe (Fe, Mn) Gehalte festgestellt. Das ermittelte Konzentrationsniveau liegt deutlich unter den Grenzwerten der TVO. Nur bei großer Auswaschungsintensität sind bei den Varianten mit Baggergutgabe erhöhte Mikronährstoffkonzentrationen festzustellen. Wobei dann eher bei den Varianten mit nur einmaliger Baggergutgabe. Vermutlich sind bei den Varianten mit 840 t TM BG/ha die zwar absolut höheren, pflanzenverfügbaren und damit potentiell auswaschbaren, Gehalte aber wegen des deutlich verbesserten Sorptionsvermögens besser gebunden und können so nicht ausgewaschen werden.

Da bei allen untersuchten Elementen seit Frühjahr 2001 kein direkter Baggerguteinfluss gegeben war, wurde keine Frachtenberechnung bezüglich einer Grundwasserbeeinträchtigung durchgeführt und die Untersuchung mit dem HJ 2004/05 eingestellt.

Gehalte an Schadstoffen

Schwermetalle

Der Lysimeterversuch hat gezeigt, dass das Baggergut selbst bei den Varianten mit 840 t TM BG/ha zu keiner Konzentrationserhöhung einzelner Schwermetalle im Sickerwasser geführt hat (Abbildung 11).

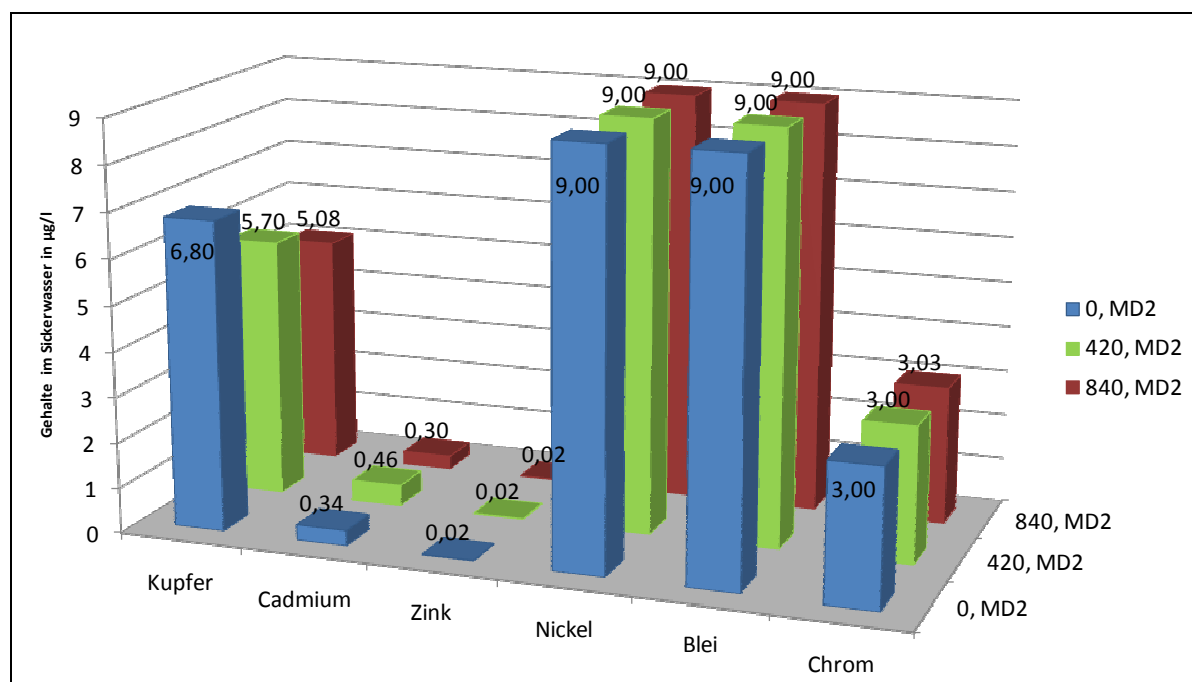


Abbildung 11: Mittlere Schwermetallgehalte im Sickerwasser bis 2005

Organische Schadstoffe

Die Gehalte an IR-Kohlenwasserstoffe und Zinnorganika lagen im Bereich der Nachweisgrenze bzw. konnten nicht nachgewiesen werden. Eine Beeinflussung durch das Baggergut wurde nicht festgestellt.

Deshalb wurde auch die Untersuchung auf Schadstoffe im Sickerwasser mit dem HJ 2004/05 eingestellt.

3.2.3 Stoffaustrag

Der Stoffaustrag wird aus dem Sickerwasseranfall und der Stoffkonzentration im Sickerwasser berechnet, so dass eine hohe Konzentration im Sickerwasser nicht automatisch auch den höchsten Stoffaustrag bedeuten muss. Vergleichsweise geringe Sickerwassermengen können hier wieder relativieren. Von der Bezugsebene Lysimeteroberfläche (Austrag in g/Lysimeter) wurde zuerst auf die Grundeinheit g/m² umgerechnet und dann auf die relevante landwirtschaftliche Vergleichsebene Hektar (Austrag in kg/ha) hochgerechnet.

Chlorid und Kalium

Bei den Varianten mit einmaliger Baggergutausbringung war schon im Herbst 2001 ein Großteil des Chlorids ausgewaschen, und so konnte ab dem HJ 2001/02 im Vergleich zu

den Nullvarianten nur noch ein minimal erhöhter Austrag verzeichnet werden. Trotz wiederholter Baggergutgabe bei den Varianten mit Baggergutaufbringung der Nebenversuche I und II (jetzt 840 t TM BG/ha) ging auch hier der Austrag an Chlorid seit dem HJ 2001/02 gegenüber dem HJ 2000/01 deutlich zurück. Trotz doppelter Aufwandmenge im Vergleich zur Variante mit 420 t TM BG/ha des Hauptversuches lag der Austrag bei 840 t TM BG/ha nur um 22 % höher.

Im Oberboden der Varianten mit mehrfacher Baggergutaufbringung wurde nach dem ersten größeren Austrag durch das verbesserte Sorptions- und Wasserhaltevermögen ein Teil des Chlorids zurückgehalten. Nach den relativ geringen Austrägen in den Jahren 2004/05 und 2005/06 ist der Austrag an Chloridionen im Jahr 2006/07 durch den enormen Sickerwasseranfall in allen Varianten noch einmal angestiegen. Die Berechnung des Chloridaustrages bis zum Ende des HJ 2006/07 ergab, dass bereits über 95 % des Chlorids ausgewaschen waren. So ist nachvollziehbar, dass später selbst bei Starkniederschlagsereignissen nicht mehr in großem Umfang leicht lösliches Chlorid auswaschbar wird. In den letzten Jahren ist auffällig, dass meist sogar die Varianten ohne Baggerguteinsatz den höheren Chloridaustrag zeigen. Hier spielen das bessere Sorptions- und Wasserhaltevermögen des Baggergutes und der damit verbundene geringere Sickerwasseranfall eine entscheidende Rolle. Dass es sich in den letzten Jahren beim ausgetragenen Chlorid vorwiegend um Chlorid aus der Mineraldüngung handelt, zeigt ein Vergleich gedüngter und ungedüngter Varianten des Hauptversuches. So weist die Variante HV 0, MD 0 einen Austrag von ca. 98 kg Chlorid/ha auf, aber bei der Variante HV 0, MD 2 lag der Austrag bei ca. 370 kg/ha. In der Variante des Hauptversuches mit einer Baggergutaufbringung von 420 t TM BG/ha und höchster Mineraldüngungsstufe (MD 2) sind es dagegen nur 256 kg Chlorid/ha.

Kalium wird fast ähnlich wie Chlorid leicht ausgewaschen, so dass der Hauptaustrag im Hauptversuch bei den Baggergutvarianten in den ersten beiden Jahren lag.

Insbesondere der seit Versuchsbeginn relativ hohe Austrag bei der Variante mit einer Frühjahrsausbringung von 140 t TM BG/ha hängt aber möglicherweise auch mit Nachwirkungen der Vorversuche bei den betreffenden Lysimetern zusammen.

Deutlich spiegelt sich auch bei Kalium das auswaschungsintensive hydrologische Jahr 2006/07 in allen Varianten (auch Nullvarianten) mit höheren Austrägen wider.

Sulfat, Magnesium, Kalzium und Natrium

Die Austräge an Sulfat, Magnesium und Kalzium sowie Natrium sind abhängig von Baggergutaufwandmenge, Düngung und Sickerwasseranfall. Bei allen Varianten mit Baggergut, ist in den ersten Jahren ein höherer Austrag nach der ersten Baggergutaufbringung deutlich zu erkennen. Abhängig von der Baggergutaufwandmenge und des Sickerwasseranfalls nahm der Stoffaustrag in den Jahren nach der Baggergutaufbringung zum Teil ab. Ursache für die Erhöhung der Austräge bei Natrium erst im 2. Jahr, aber auch für die Unterschiede zwischen den Varianten, ist die relativ langsame Verlagerung des Natriums. Dass die Erhöhung bei den Varianten mit zweiter Baggergutgabe stärker und länger anhaltend war als bei den Varianten mit einmaliger Aufbringung, liegt an der absolut größeren Gesamtmenge, die aufgebracht wurde.

Gut zu erkennen ist bei allen genannten Parametern das sehr niederschlags- und damit auswaschungsintensive Jahr 2006/07. Bei den Varianten mit mehrfacher Baggergutaufbringung (Gesamt 840 t TM BG/ha) war bis zum HJ 2006/07 nur ein etwas höherer Austrag zu verzeichnen als bei der Variante mit einmaliger Aufbringung von 420 t TM BG/ha. Das änderte sich mit dem HJ 2006/07 als aufgrund der intensiven Auswaschung bei diesen Varianten ein deutlich höherer Austrag erfolgte, z. T. das dreifache gegenüber der Variante mit 420 t TM BG/ha im Hauptversuch. Selbst das durch die sehr hohe Baggergutaufwandmenge von 840 t TM BG/ha deutlich verbesserte Sorptions- und Wasserhaltevermögen im Oberboden konnte in diesem niederschlagsreichen HJ die angefallenen Wassermengen nicht mehr zurückhalten, so dass auch bei diesen Varianten ein erhöhter Sickerwasseranfall verbunden mit einem erhöhten Stoffaustrag auftrat. Das heißt, von den bisher im Bodenkörper gehaltenen großen Mengen an Ionen (Nachlieferung durch hohes Stoffpotential im Baggergut), war bis zum HJ 2005/06 nur ein Teil ausgewaschen. Die Austräge bei den Varianten mit einmaliger Baggergutaufbringung waren geringer, da ein Großteil der Ionen hier bereits ausgewaschen war. In den folgenden weniger auswaschungsintensiven HJ bis zum Versuchsende ging der Stoffaustrag bei allen Varianten mit Baggergutaufbringung wieder zurück. Im letzten Versuchsjahr wurden bei Sulfat, Magnesium und Natrium im Haupt und Nebenversuch mit Baggergutaufbringung die geringsten Austräge seit Versuchsbeginn ermittelt, was auch mit den bisher geringsten Gehalten im Sickerwasser korreliert.

Austrag an Nitrat und Phosphor

Durch den Einsatz von Baggergut sind im Hauptversuch kaum große Unterschiede beim Austrag von Nitrat feststellbar. Insgesamt ist der Nitrataustrag in der Variante mit 420 t BG/ha sogar noch geringer (18,1 kg/ha) als der Austrag der Nullvariante (26,3 kg/ha). In den Nebenversuchen ist der Gesamtaustrag der Nullvariante (bzw. 140 t BG/ha) ebenfalls leicht höher, als bei den Varianten mit Baggergutaufbringung.

Es wird deutlich, dass vor allem Baggergut den Austrag an Nitrat bei Starkniederschlagsereignissen effektiver zurückhält.

Phosphor wurde nur bis zum Jahr 2005 gemessen. Doch zeigte sich auch ein fast identisches Verhalten wie bei Nitrat.

3.3 Ernteerträge

3.3.1 Quantität

Die Ertragsermittlung fand in jedem hydrologischen Jahr getrennt nach Gesamtpflanze und Kolbenertrag statt. Über alle Versuchsjahre lässt sich feststellen: Bei den Varianten des Hauptversuches war der Einfluss auf die Gesamtpflanzenentwicklung durch die mineralischen N-Düngung stärker als durch die Baggergutaufbringung. Unabhängig von der Höhe der Baggergutgabe stieg mit zunehmender N-Düngung nicht nur der Ertrag sondern i.d.R. auch der Trockenmassegehalt. Eine ausreichende Versorgung mit Makronährstoffen sichert sowohl eine kräftige Pflanzenentwicklung (Frischmasseertrag), als auch eine rechtzeitige Abreife in der Vegetationsperiode (Trockenmasseertrag). Eine optimale mineralische N-Düngung hat im Hauptversuch den Trockenmasseertrag gegenüber einer Nulldüngung meist deutlich erhöht. Der Baggerguteinsatz hat dagegen auf den Trockenmassegehalt keine so deutliche Auswirkung. Die Verdopplung der N-Gabe bei den Varianten des Hauptversuches führt unabhängig von der Baggergutaufwandmenge fast immer zu wesentlichen Zuwächsen beim Frischmasseertrag und auch zu einer deutlichen Erhöhung des Trockenmasseertrages (Abbildung 12).



Für die erreichten Ertragssteigerungen in den Varianten mit mehrmaligen Baggerguteinsatz (Ausnahme NV II, FA, FM- und TM-Ertrag) sind vor allem die, durch die nochmalige Baggergutzufuhr, weiter verbesserte Bodenstruktur, das erhöhte Wasser- und Nährstoffbindungsvermögen sowie der über das Baggergut verbesserte Nährstoffpool als Ursachen zu nennen.

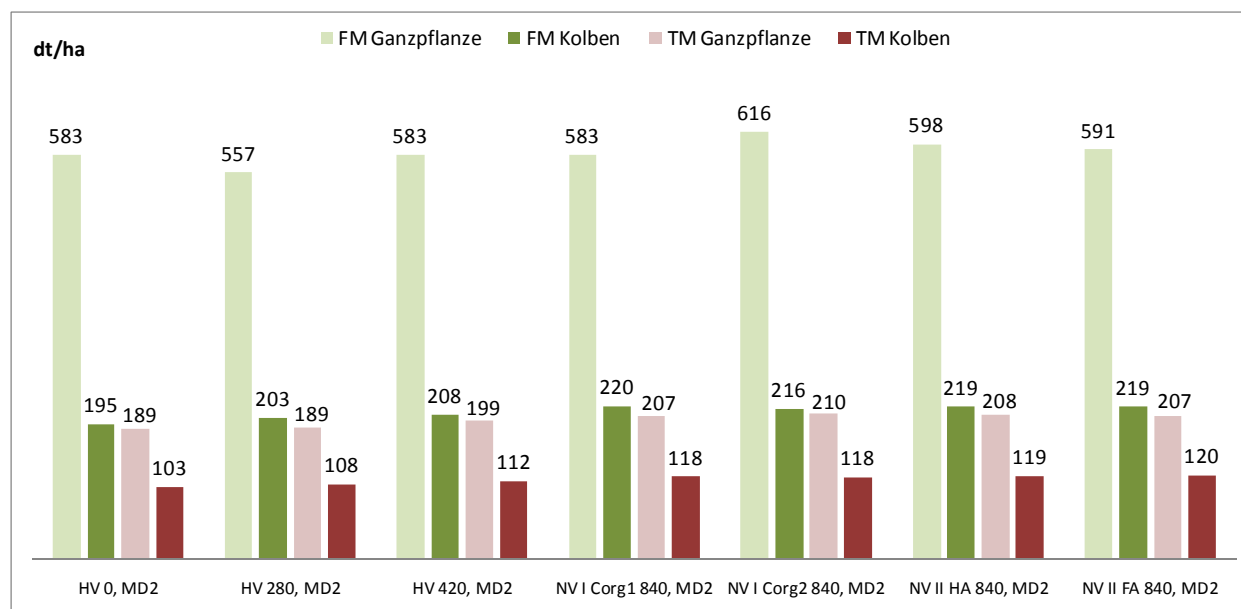


Abbildung 12: mittlere Ernteerträge nach Frisch- und Trockenmasse über die 10 Versuchsjahre (nur MD2-Düngung)

3.3.2 Qualität

Um eine Beeinflussung der Qualität des Erntegutes durch das Baggergut beurteilen zu können, wurden in den ersten 5 Versuchsjahren Untersuchungen zum Stoffpfad Boden – Pflanze durchgeführt. Diese Untersuchungen ergaben keine signifikante Beeinflussung des Erntegutes durch das Baggergut (Abbildung 13 und 14).

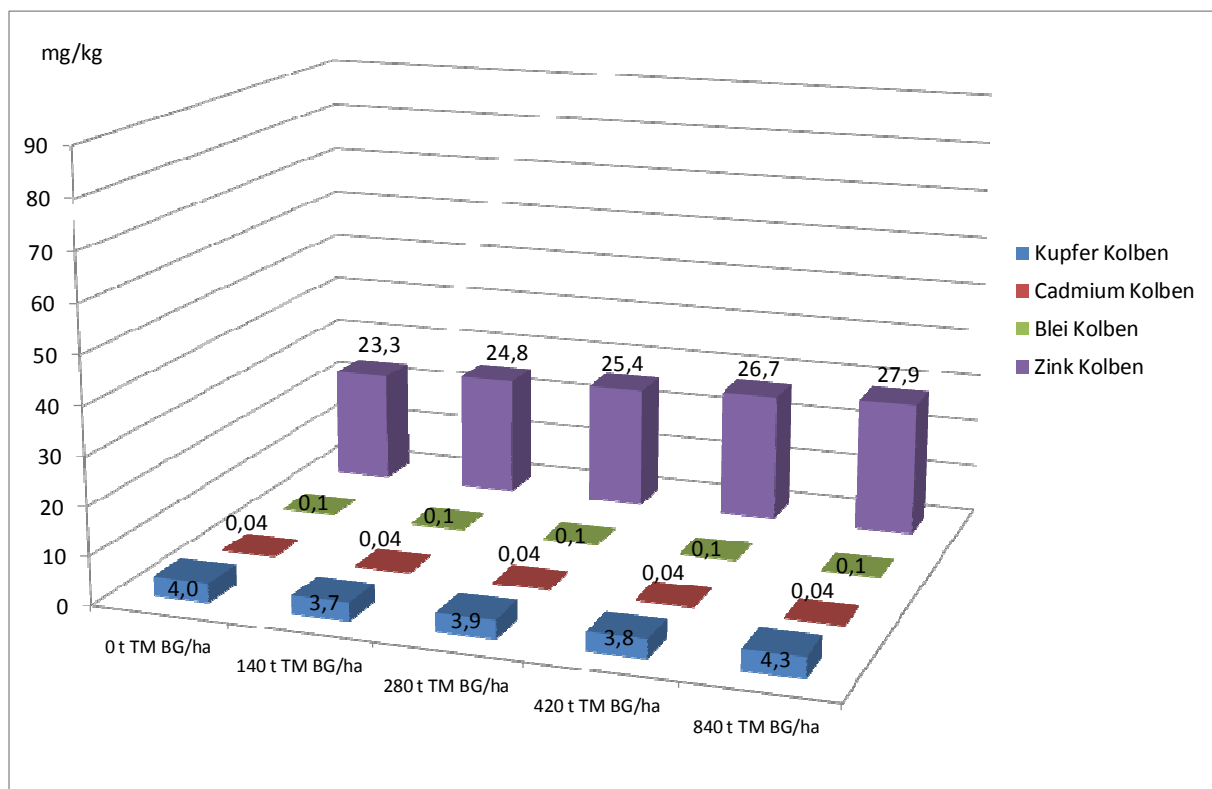


Abbildung 13: Schwermetallgehalte im Kolben im Mittel über die 10 Versuchsjahre

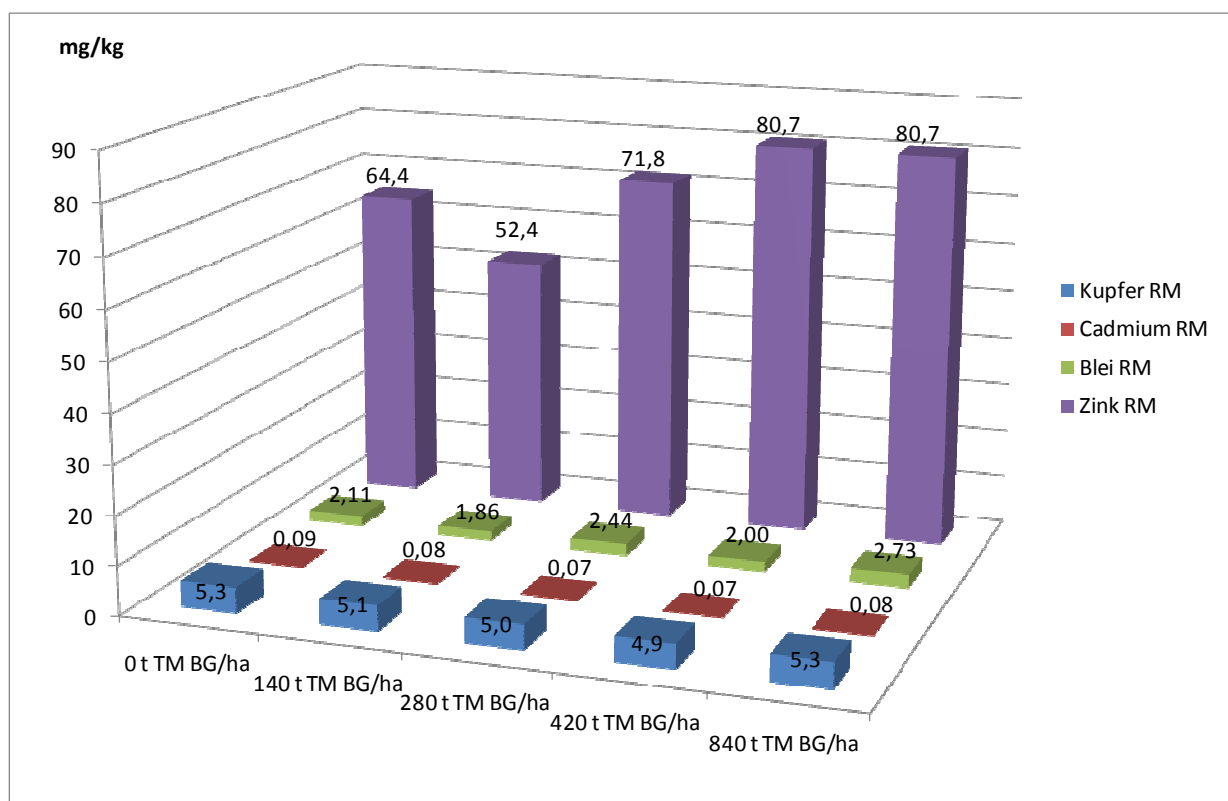


Abbildung 14: Schwermetallgehalte im Restmais (RM) im Mittel über die 10 Versuchsjahre

4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der gewählten komplexen Versuchsanstellung konnten wesentliche, noch offene Fragen zur Risiko- und Gefährdungsabschätzung bei der praktischen Umsetzung der Baggergutverwertung im Land- und Landschaftsbau geklärt werden.

Bodenqualität

Der Einsatz von Baggergut zur Herstellung bzw. Verbesserung von Oberböden gemäß BBodSchV führt nachweislich zu einer deutlichen Verbesserung bodenfruchtbarkeitsbestimmender Eigenschaften bei keiner Gefährdung des Stoffpfades Boden – Pflanze bzw. Boden – Grundwasser durch Schadstoffe.

Sickerwasser

Durch das verbesserte Wasserhaltevermögen sinkt der Sickerwasseranfall deutlich, um bis zu 17 % (bei 840 t TM BG/ha). Aufgrund seiner Herkunft aus Brackgewässern (Salzgehalt 1 – 3 %) führt der Baggerguteinsatz zu z. T. extremen Konzentrationserhöhungen bei Salzen aber auch leicht auswaschbaren Makronährstoffen (K, Mg, Ca) im Sickerwasser. Trotz der Minderung des Sickerwasseranfalls durch den Baggerguteinsatz ergibt sich immer noch eine Vervielfachung der Austräge an den betreffenden Ionen (Kalium – Verdopplung, Chlorid – Verdreifachung, Kalzium - 4fache, Magnesium – 6fache, Natrium – 20fache, Sulfat-Schwefel – 45fache). Aber die beiden besonders umweltrelevanten Stoffe Stickstoff und Phosphor (z. B. Gewässereutrophierung) werden aufgrund des guten Sorptionsvermögens im Baggergut (insbesondere P) und seiner hohen Humusstabilität (keine N-Freisetzung) kaum ausgewaschen. Im Vergleich zu den Nullvarianten ist der Austrag sogar geringer.

Pflanze

Die deutliche Verbesserung bodenfruchtbarkeitsbestimmender Eigenschaften durch das Baggergut führte wie auch schon in vorangegangenen Versuchen in Rastow und Rederank (HENNEBERG, JANZEN, 1997; HENNEBERG, JANZEN 1999) zu meist leichten Ertragserhöhungen von ca. 10 %. Der Baggerguteinsatz sichert eine normale Erntegutqualität. Der hohe Salzgehalt im Baggergut hat darauf keinen Einfluss.

Anwendungszeitpunkt

Bezüglich der Grundwassergefährdung kann kein maßgebender Unterschied zwischen Herbst- und Frühljahrsausbringung gesehen werden. Dennoch ist die **Herbstaubringung der Frühljahrsausbringung vorzuziehen:**

- bessere arbeitswirtschaftliche und fruchtfolgeunabhängige Einordnung im Landwirtschaftsbetrieb,
- bessere Befahrbarkeit bindiger Standorte und
- erste Auswaschung von Salzen aus der oberen Bodenschicht bereits im ersten Winter bei darauf folgendem Frühljahrsanbau (positiv bei salzempfindlichen Kulturen)

Auswahl Leitparameter zur Beurteilung

Die drei deutlich voneinander differenzierten Versuchsansätze lassen des Weiteren eine Aussage darüber zu, welche Kenngrößen aus dem breiten Analytikspektrum als **Leitparameter zur Beurteilung** potenzieller Umweltbelastungen zweckmäßig sind:

1. Grundparameter zur Kennzeichnung Baggergut und Ausgangsboden (Körnung, TOC, Kalk, Salzkonzentration, T-Wert)
2. Einzelparameter (Salz- und Makronährstoffionen Chlorid, Schwefel, Natrium, Stickstoff, Phosphor, Magnesium, Kalium, Kalzium)
3. Schadstoffparameter nur aus Sicht der Anforderungen des Bodenschutzes

Diese ausgewählten Parameter ermöglichen die sichere, schnelle und Kosten sparende einzelfallbezogene Abschätzung einer potenziellen Grundwasserbeeinträchtigung, um eventuell eine Einsatzmengenbegrenzung bzw. ein Einsatzverbot zu veranlassen.

Die nachfolgenden Tabellen 6 bis 10 geben, auf Grundlage der Ergebnisse der Lysimeterversuche, einen Überblick über die gewählten Leitparameter und deren zeitlicher Veränderung nach Baggerguteinsatz.

Tabelle 6: Grad der Konzentrationsänderung - Nebenversuche (sehr hohe Gabe in 3 Teilgaben)

	1. Aufbringung	2. Aufbringung	3. Aufbringung	nach 5 Jahren	nach 7 Jahren
Leitfähigkeit	+++	++	++	+	+
Chlorid	+++	+++	+++	o	o
Sulfat	+++	+++	+++	+++	+++
Natrium	+++	+++	+++	+	+
Kalium	+	+	+	+	o
Magnesium	+++	+++	+++	+(+)	+
Kalzium	++(+)	++	++	+	+
Nitrat	o	o	o	o	o
Phosphor	o	o	o	o	o

Tabelle 7: Grad der Konzentrationsänderung - Hauptversuch (eine hohe Gabe)

	Jahr nach der Aufbringung	nach 5 Jahren	nach 10 Jahren
Leitfähigkeit	+++	+	o
Chlorid	+++	o	o
Sulfat	+++	+++	++
Natrium	+++	++	o
Kalium	++	o	o
Magnesium	+++	++	+
Kalzium	+++	+	o
Nitrat	o	o	o
Phosphor	o	o	o

Tabelle 8: Grad der Austragsänderung (bei sehr hoher Gabe in 3 Teilgaben)

	nach 10 Jahren
Chlorid	+
Sulfat	+++
Natrium	+++
Kalium	+
Magnesium	++
Kalzium	+
Nitrat	o
Phosphor	o

+++ = extreme Erhöhung, > 10-fach

++ = sehr starke Erhöhung, 5 - 10fach

+ = deutliche Erhöhung, Verdopplung bis 5fach

o = im Bereich der Nullvarianten/ der Hintergrundwerte Ausgangsboden

Tabelle 9: Grad der Veränderung der Bodeneigenschaften (eine hohe Gabe)

	420 t TM BG/ha	nach 5 Jahren	nach 10 Jahren
Wassergehalt	+	+	+
pH-Wert	++	++(+++)	+++
Kalk	+++	+++(++)*	+++
Salzkonzentration	+++	+++	+
Sulfat-Schwefel	+++	+++	++
Natrium	++	+	+
Chlorid	++	o(+)	o
TOC	(+) ++	(+) ++	(+) ++
Nmin	o	o(+)	+
Phosphor	o	o(+)	+
Magnesium	++	+(++)	+(++)
Kalium	+	o(+)	o(+)
Ton	+	+	+
T-Wert	+	+	+

Kalk +++(++)* : Einstufung ++ würde auf Analytikschwankung beruhen

+++ = extrem Erhöhung (> 5 fache)

++ = starke Erhöhung (> Verdopplung bis 5-fache)

+ = Erhöhung (Veränderung > 20 % bis Verdopplung)

o = im Bereich der Nullvarianten/ der Hintergrundwerte Ausgangsboden (Veränderung max. 20 %)

Tabelle 10: Grad der Veränderung der Bodeneigenschaften (sehr hohe Gabe in 3 Teilgaben)

	280 t TM BG/ha	560 t TM BG/ha	840 t TM BG/ha	nach 5 Jah- ren	nach 7 Jah- ren
Wassergehalt	+	+	+	+	+
pH-Wert *	++	++	+++	+++	+++
Kalk	+++	+++	+++	+++	+++
Salzkonzentration	+++	+++	+++	+++	++
Sulfat-Schwefel	+++	+++	+++	+++	+++
Natrium	++	++	+++	++	++
Chlorid	+	++	+++	o	o
TOC	+	++	++	++	++
N _{min}	o(+)*	+(+++)	++	++(+++)	++(+++)
Phosphor	o(+)	o	+	+	+
Magnesium	+	++	++	++	++
Kalium	o(+)	+	+(++)	+	+
Ton	+	+	++	++	++
T-Wert	+	+	++	++	++

N_{min}

o(+)* : Einstufung + würde auf Analytikschwankung beruhen

+++ = extrem Erhöhung (> 5 fache)

++ = starke Erhöhung (> Verdopplung bis 5-fache)

+ = Erhöhung (Veränderung > 20 % bis Verdopplung)

o = im Bereich der Nullvarianten/ der Hintergrundwerte Ausgangsboden (Veränderung max. 20 %)

pH-Wert *

+++ = extrem erhöht (> 1,0 pH-Stufe)

++ = stark erhöht (> 0,5 bis 1 pH-Stufe)

+ = erhöht (Veränderung > 0,2 bis 0,5 pH-Stufen)

o = im Bereich der Nullvarianten/ der Hintergrundwerte
Ausgangsboden (Veränderung max. 0,2 pH-Stufen)

Abschließend ist festzustellen, dass der Einsatz von organik-, feinanteil- und nährstoffreichem Baggergut im Landbau eine empfehlenswerte Verwertungsoption ist, die bei ordnungsgemäßer Durchführung (Beachtung rechtlicher Vorgaben und Anwendung guter fachliche Praxis) eine nachhaltige bodenverbessernde Wirkung erzielt, den Ertrag stabilisiert bzw. zum Teil erhöht sowie eine hohe Qualität des Erntegutes sichert.

Aus Sicht einer potenziellen Umweltgefährdung besteht nur hinsichtlich des Austrags der untersuchten Salzionen und der Makronährstoffe Magnesium und Kalium ein Gefährdungspotenzial für den Stoffpfad Boden – Grundwasser. Hier ist durch eine Einzelfallprüfung der Einsatz des Baggergutes an sich und die maximale Höhe der Aufwandmenge abzuklären.

LITERATUR

ARBEITSENTWURF MANTELVERORDNUNG (2011) - Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material

BBODSCHV – BUNDESBODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert

Gisi, U. (1997): Bodenökologie, 2. neu bearb. und erw. Auflage -. Stuttgart Thieme

HELCOM (2000) – Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets

HENNEBERG M. (2000 – 2010): Lysimeterberichte unveröff.

HENNEBERG M., JANZEN K. (1997): Einrichtung und Weiterführung des Pilotprojektes Rastow zur Prüfung von Schlick als Bodenverbesserungsmittel (1993-1997). Im Auftrag des Umweltministeriums M-V und der Hansestadt Rostock Tief- und Hafenbauamt. unveröffentl. Abschlussbericht.

HENNEBERG M., JANZEN K. (1999): Einrichtung und Betreuung des Praxisexperimentes Rederank zur Verwertung von gereiftem Baggergut als Bodenverbesserungsmittel im ökologischen Landbau. Im Auftrag der Hansestadt Rostock Tief- und Hafenbauamt. unveröffentl. Abschlussbericht.

KrWG – Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), enthalten im Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts*) vom 30.März 2011

OSPAR (1998): Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantik

RICHTER, G.; BORG, H.; MEIBNER, R.: Fachbeiträge „Feld- und Lysimeterversuche zur Retardation von Sulfat in Böden“

SCHACHTSCHABEL, P. ET AL (1989): Lehrbuch der Bodenkunde, 12. neu bearb. Auflage – Stuttgart Fischer Verlag

ANLAGEN

- CD Bericht 2004/05 inkl. Grafiken
Bericht 2009/10 inkl. Grafiken,
Einführung zur Geschichte und Versuchsaufbau der Lysimeteranlage,
Poster als pdf
Zusammenfassung 10 Jahre Lysimeterversuche