

# **Verhalten von Recycling-Materialien in der Umwelt: Labor- und Feldversuche**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich Geowissenschaften

der Johannes Gutenberg-Universität

in Mainz

vorgelegt von

Morten Karnuth

geb. in Karlsruhe

Mainz

November 2003

Erklärung:

Hiermit versichere ich gemäß § 11 (3) der Promotionsordnung vom 30. April 1990, dass ich diese als Dissertation vorgelegte Arbeit selbständig verfasst und alle benutzten Hilfsmittel und Quellen in der Arbeit angegeben habe. Sie ist weder als Prüfungsarbeit für eine andere Prüfung noch ganz oder teilweise als Dissertation an einer anderen Fakultät oder einem anderen Fachbereich eingereicht worden.

Mainz, den 24.11. 2003

(Morten Karnuth)

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung: 20. November 2003

Wissenschaftliche Forschung läuft immer darauf hinaus,  
dass es plötzlich mehrere Probleme gibt,  
wo es früher ein einziges gegeben hat.

Norman Mailer

## Danksagung

Als meinem „Doktorvater“ möchte ich Herrn Prof. Dr. D. Schenk für die Vergabe und Betreuung dieser Promotion ganz herzlich danken. Die stete Diskussionsbereitschaft sowie zahlreiche Anregungen und konstruktive Vorschläge haben das Gelingen dieser Arbeit erst möglich gemacht. In dieser Hinsicht gilt mein besonderer Dank auch Herrn PD Dr. Th. Hofmann, dem ich zudem für die umfangreiche Hilfe bei Konzeption und Ausführung der Feldversuche sowie die Übernahme des Koreferates danke.

Herrn Dr. B. Fischer sowie insbesondere Frau M. Homann vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung in Bonn möchte ich für die stets gute und fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes „Elution von Stoffen aus Recycling-Materialien in Bauwesen“ danken. Den Mitgliedern des projektbegleitenden wissenschaftlichen Beirats danke ich ebenfalls für die bisweilen kritischen, aber stets weiterführenden Diskussionen sowie die Hilfsbereitschaft hinsichtlich der Beschaffung von Recycling-Materialproben und Literatur.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie sowie bei den zahlreichen studentischen Helfern bedanken. Dabei gilt mein besonderer Dank zunächst Frau I. Schäfer, Frau N. Schuwirth sowie Frau A. Bernsee, die ihre Diplomarbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes verrichteten und somit zu dessen Gelingen wesentlich beigetragen haben. Für die umfangreiche Unterstützung bei der Aufbereitung und Analyse der sehr zahlreichen Proben aus Labor- und Feldversuchen sowie für die tatkräftige Hilfe bei den Geländearbeiten zu den Feldversuchen danke ich ganz herzlich Frau C. Berg, Frau Dr. A. Steil, Frau M. Veidt, Frau Y. vom Eyser, Frau N. Burguet Palomo, Frau C. Pies, Frau I. Lüdders, Frau R. Walter, Herrn M. Mengen, Herrn M. Back, Herrn D. Maixner sowie Herrn Th. Lob.

Herrn Dr. F. Enzmann möchte ich ganz besonders danken für die Entwicklung von Computerprogrammen, die für die Durchführung und Auswertung von Labor- und Feldversuchen essentiell waren sowie für die unkomplizierte Hilfe bei anfallenden computerbezogenen Problemen. Ihm sowie meinen Kollegen Frau A. Christ, Frau N. Schuwirth, Frau Dr. S. Simon, Herrn Dr. W. Bott sowie Herrn Dr. H. Schmitt danke ich für die sehr angenehme und kollegiale Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr. M. Kersten danke ich für die konstruktiven Anregungen sowie die umfangreiche Hilfe bei der Beschaffung von Fachliteratur.

Frau Dr. G. Abbt-Braun, Herrn Dr. Ch. Specht sowie Herrn G. Metreveli vom Engler-Bunte Institut der Universität Karlsruhe danke ich für die tatkräftige Hilfe bei der Analyse und Bewertung von Huminstoffen in Sickerwasserproben. Für die Analyse von Proben möchte ich mich ebenfalls bei Herrn P. Bickelmaier und Herrn Dr. Bergholz vom HLUK in Wiesbaden bedanken. Der Standortverwaltung der Lüttich-Kaserne in Köln und Herrn Schröder sei für die Hilfe zur erfolgreichen Durchführung der Feldversuche sowie für die Bereitstellung einer Übernachtungsmöglichkeit gedankt.

## Zusammenfassung

Im Baugewerbe fallen jährlich mehrere Millionen Tonnen an Baureststoffen an, die nach erfolgter Aufbereitung als Recycling-Baustoffe erneut verwendet werden können. Die Wiederverwertung dieser Sekundärrohstoffe hat neben der Substitution natürlicher mineralischer Massenbaustoffe den weiteren Vorteil der Einsparung von Deponieraum, in diesem Zusammenhang wird ebenfalls ein wichtiger Beitrag zur Abfallentsorgung geleistet.

Allerdings besteht bislang Unklarheit hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Stofffreisetzung aus den aufbereiteten Baureststoffen sowie der Parameter, die zur Beurteilung im Wesentlichen heranzuziehen sind. Des Weiteren gilt es der Frage nachzugehen, welche Laborversuche am besten geeignet sind, um eine realistische Prognose zum Stoffaustrag aus Recycling-Baustoffen in die Umwelt unter Freilandbedingungen treffen zu können. Es besteht ebenfalls Forschungsbedarf in Bezug auf die Identifikation von Stoffkomponenten in den Recycling-Materialien, welche für die Freisetzung bestimmter Stoffe verantwortlich zu machen sind.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl Labor- als auch Feldversuche mit Recycling-Materialien durchgeführt. Bei den Feldversuchen wurden zwei Freiland-Lysimeter gebaut, die jeweils mit unterschiedlichen Recycling-Materialien befüllt wurden. Die Untersuchung der Stofffreisetzung unter Freilandbedingungen fand über einen Zeitraum von 21 Monaten statt, parallel dazu wurden sowohl Extraktions- als auch Elutionsverfahren im Labor angewandt. Neben den beiden Testfeld-Materialien wurden bei den Laborversuchen zusätzlich 17 weitere Recycling-Baustoffe aus 12 Bundesländern zur Schaffung einer größeren statistischen Absicherung untersucht.

Bei den Stoffkomponenten tritt Betonbruch bei der Mehrzahl der untersuchten Materialien als dominante Stoffgruppe auf, wodurch die ermittelten Werte zur Säureneutralisationskapazität aus pH-stat Versuchen sehr hoch sind. Eine aus den pH-stat Versuchen abgeleitete zeitliche Abschätzung des Puffervermögens unter Freilandbedingungen zeigt, dass die Recycling-Materialien einen Säureeintrag per Niederschlagswasser über einen Zeitraum von mehreren zehntausend Jahren puffern können, bevor sich ein pH-Wert von 5 bzw. 4 einstellt. Für pH-stat Versuche bei verschiedenen pH-Werten tritt nach Erschöpfung der Pufferkapazität eine erhöhte Stofffreisetzung bei niedrigen pH-Werten auf. Demnach ist die Säureneutralisationskapazität der Recycling-Materialien als wesentliche Einflussgröße auf die verstärkte Freisetzung, insbesondere von Metallen, anzusehen. Die Feldversuche zeigen jedoch, dass eine durch weitere Einflussgrößen ( $\text{CO}_2$ -Vorkommen, Temperatur) gesteuerte signifikante Stofffreisetzung bereits vor Erschöpfung der Pufferkapazität stattfinden kann.

Im Hinblick auf ermittelte Konzentrationen und Massenanteile folgt aus einer vergleichenden Ergebnisbetrachtung, dass weder Ammoniumnitrat-Extraktion, pH-stat Versuch bei pH 4 noch S4- und Modifizierter S4-Test genauere Prognosen zum Stoffaustrag aus den Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen ermöglichen. In diesem Zusammenhang zeigen Langzeitversuche beim S4- und Modifizierten S4-Test, dass elementspezifisch die vorgeschriebene Versuchslaufzeit von 24 Stunden

nicht ausreicht, bis weitgehend konstante Gehalte bei den Recycling-Materialien auftreten. Allerdings hat bei längeren Laufzeiten der Schüttelvorgang eine verstärkte Oberflächenvergrößerung durch Materialabrieb zur Folge, was dementsprechend Stofffreisetzungs-, Sorptions- und Fällungsvorgänge und damit ermittelte Konzentrationen beeinflusst. Daher sind diese Verfahren für eine Abschätzung der Stofffreisetzung aus den Recycling-Materialien als ungeeignet anzusehen.

Mit einem Langzeit-Standtest (Material in Originalkorngröße) sowie Schüttelversuchen mit unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen (Material fein gemahlen) lassen sich die bei S4- und Modifiziertem S4-Test auftretenden Einflüsse durch Materialien in verschiedenen Korngrößen sowie Materialabrieb besser kontrollieren. Diese Versuchskombination erlaubt Rückschlüsse auf die Löslichkeit und Verfügbarkeit von Stoffen in den Recycling-Materialien, allerdings zeigen sich nur bei wenigen Elementen vergleichbare Maximalkonzentrationen bzw. Massenanteile zu den Feldversuchen.

Die Ergebnisse aus Säulenversuchen weisen auf eine gute Vergleichbarkeit mit den Feldversuchen hin, was sich an denselben vorherrschenden Prozessen bei der Freisetzung für eine Reihe von Stoffen zeigt (u.a.  $\text{SO}_4$ , Ca, Al, Cr). Dabei ist die Betrachtung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses als sinnvolle und weiterführende Vorgehensweise für den Vergleich zwischen Säulen- und Feldversuchen anzusehen.

Bei mehreren Stoffen (Mg, Sb, As, Cu, Mn) treten ähnliche Konzentrationshöchstwerte bei Säulen- und Feldversuch auf. Der Vergleich aufsummierter Massenanteile zeigt für den Säulenversuch, dass bei einer Reihe von Stoffen (Cl, Na, Cr, Cu, Co, As) eine grobe Abschätzbarkeit für eine Langzeitprognose unter Freilandbedingungen existiert. Demnach kann für bestimmte Elemente durch Erhöhen der Beregnungsrate im Vergleich zu natürlichen Verhältnissen ein Zeitraffereffekt bei den Säulenversuchen erzielt werden.

Als wesentliche Parameter für die Stofffreisetzung aus den Recycling-Materialien sind neben  $\text{CO}_2$ -Einfluss und pH-Wert ebenfalls der Temperatureinfluss und die Material-Heterogenität anzusehen. Unterschiede in der einzusetzenden Korngröße bei den Laborversuchen haben des Weiteren einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Aus diesem Grund empfiehlt sich bei Laborversuchen die Untersuchung von Material in Originalkorngröße mit Ausnahme des pH-stat Versuches, da hierbei durch Verwendung von fein gemahlenem Material ein Zeitraffereffekt erzielt werden kann.

Die Bildung von Sekundärphasen, die in zeitweilig hohen Trübungswerten resultiert, weist auf komplexe Vorgänge im Freiland hin, die sich nicht ohne weiteres im Labor nachvollziehen lassen. Die Komplexität der Stofffreisetzungsprozesse bei den Feldversuchen erhöht sich durch das Auftreten huminstoffähnlicher Substanzen in den Sickerwässern beider Becken und der Bindung einiger Stoffe (Zn, Cr, Mo) hieran. Von den Stoffkomponenten konnte Asphalt als Quelle für die Freisetzung dieser Substanzen identifiziert werden.

Es ist demzufolge nicht möglich, aus einem einzelnen der angewandten Laborversuche eine umfassende und präzise Prognose zum Stoffaustrag aus Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen abzuleiten. In Abhängigkeit von der Fragestellung ist vielmehr eine Kombination verschiedener Verfahren wie Säulen- und pH-stat Versuche zur bestmöglichen Beurteilung der Stofffreisetzung für kurz- und langfristige Zeiträume anzustreben.

## Summary

Several million tons of solid wastes accumulate each year in the building industry which can be reused after a proper processing has taken place. The recycling of these demolition waste materials enables the substitution of natural mineral building materials as well as the saving of space for disposal. This implies an important contribution for waste management.

Up to now still some vagueness exists regarding the constituent release from recycled materials and its temporal distribution. Factors that control these leaching patterns have to be identified as well. Another question which has to be answered concerns the kind of laboratory tests which enable a proper and reliable prediction regarding the release of substances under natural conditions. Research also has to focus on the examination of individual components within the demolition waste materials and their characterization in terms of the leaching of specific substances.

In order to answer these questions field and laboratory tests have been carried out with recycled demolition waste materials. For field tests two field lysimeters were built and filled up with two different kinds of materials. Investigations on the release of substances under natural conditions took place for 21 months. In comparison to field tests several extraction and elution tests were carried out in the laboratory. Besides the two materials already investigated under natural conditions 17 other recycled demolition waste materials were used for laboratory tests to reach a better statistical covering of derived results.

Among the individual components of the recycled materials concrete debris represents the dominant group and has therefore a remarkable impact on the buffer capacity derived from pH static tests. An evaluation of the buffer capacity under natural conditions based on the results of pH static tests shows, that the recycled materials buffer an acid entry via rain water for a time period of several ten thousand years until a pH with values between 5 and 4 develops. pH static tests adjusted to various pH values (2, 4, 6, 8) show an increased constituent release at lower pH values as soon as the buffer capacity has vanished. Hence the buffer capacity of recycled materials can be regarded as a major factor in terms of an increased constituent release especially for metals. Nevertheless field tests show that due to other factors (CO<sub>2</sub> pool, temperature) a significant leaching of constituents can happen already before the buffer capacity of the recycled materials has vanished.

A comparison of measured leachate concentrations (mg/l) and transformed constituent release (mg/kg of solid material) derived from field and laboratory tests has been carried out. According to the results neither the extraction test with ammonium nitrate and the pH 4 static test nor batch tests following the S4-Test (DIN 38414-4) and the Modified S4-Test enable a proper assessment of leaching from recycled materials under natural conditions. In this context long term batch tests following the S4- and Modified S4-Test show that for certain substances the prescribed test length of 24 hours is not long enough until constant concentrations have been reached. An extended movement of the samples in the batch tests results on the other hand in an increase of the surface

area because of friction. This creates a significant influence on constituent release, sorption and precipitation processes and therefore on the overall concentrations obtained from these tests. Hence batch tests following the S4- and Modified S4-Test are not suitable for a reliable assessment of constituent release from recycled materials.

A combination of long term tests where samples are not shaken (with material in its original grain size) and batch tests performed with varying liquid/solid ratios (with ground material) enables a better control of factors like friction which occur when the S4- and Modified S4-Test are carried out. Results derived from this test combination provide useful information on solubility and availability of substances. Nevertheless a comparison with field tests shows comparable maximum concentrations only for a few elements.

A comparison of column and field tests points to the same specific processes which dominate the constituent release for a couple of elements ( $\text{SO}_4$ , Ca, Al, Cr). A standardisation of derived results from column and field tests by using the liquid/solid ratio enables a sound comparability. In this context the liquid/solid ratio from both tests is related to the summed up amount of percolated water which has to be divided by the overall material mass in the lysimeter and the column respectively.

Similar maximum concentrations in column and field tests occur for several elements (Mg, Sb, As, Cu, Mn). A comparison of the constituent release shows that for a couple of substances (Cl, Na, Cr, Cu, Co, As) a rough long term prognosis based on column tests is possible for the evaluation of recycled materials under natural conditions. Regarding column tests this shows that for specific elements an increase in irrigation intensity compared to natural conditions enables a time-lapse effect.

Important factors for the release of substances from recycled demolition waste materials comprise the influence of  $\text{CO}_2$  and pH as well as temperature and heterogeneity of the material. Differences in grain size for various laboratory tests have an essential impact on results in addition. Therefore the use of material in its original grain size has to be advised for laboratory tests. The pH static test represents an exception of this recommendation since a time-lapse effect can be achieved by using ground material.

Secondarily composed mineral phases during the field tests which result in temporarily high values for turbidity give an indication for the complexity of processes which happen under natural conditions. Another aspect that underlines the complexity of processes is the appearance of humic acid-like substances in seepage water from both field lysimeters and the sorption of specific substances (Zn, Cr, Mo) to these. Among the individual components in the recycled demolition waste materials asphalt could be identified as the source for the humic acid-like substances.

This shows that it is not possible to carry out a proper and reliable prediction on the release of substances out of recycled materials under natural conditions simply based on one of the applied laboratory tests. Dependent on the desired information rather a combination of various tests like the column and pH static test should be used in order to obtain the best possible assessment of the constituent release in the short and long term.

# Inhaltsverzeichnis

<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>I</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>IV</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Anlass .....	1
1.2 Aufgabenstellung .....	2
<b>2 Wissenschaftliche Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Extraktionsverfahren .....	3
2.2 Elutionsverfahren .....	4
2.3 Recycling-Baustoffe .....	7
2.4 Wichtige Einflussgrößen auf die Sickerwasserzusammensetzung .....	13
2.4.1 Prozesse beim Stofftransport .....	13
2.4.2 Parameter und Mechanismen bei der Stofffreisetzung .....	15
2.4.3 Bildung von Sekundärmineralen .....	17
2.4.4 Verhalten von Metallen .....	19
2.4.5 Huminstoffe .....	21
<b>3 Material und Methoden.....</b>	<b>23</b>
3.1 Charakterisierung der Recycling-Materialien .....	23
3.2 Feldversuche .....	25
3.3 Laborversuche .....	27
3.4 Analytik .....	31
3.4.1 Hauptelemente (Anionen und Kationen).....	32
3.4.2 Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle) .....	33
3.5 Ermittlung von Massenanteilen .....	33
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>35</b>
4.1 Charakterisierung der Recycling-Materialien .....	35
4.1.1 Siebanalysen .....	35
4.1.2 Stoffliche Zusammensetzung.....	36
4.1.3 Röntgen-Fluoreszenz-Analyse.....	38
4.1.4 Aufschluss mit Königswasser .....	40
4.1.5 Röntgen-Diffraktometrie.....	41
4.1.6 Oberflächenmessung mit BET .....	41

4.2	Feldversuche .....	42
4.2.1	Abflussverhalten .....	42
4.2.2	Bestimmung der Versickerungsintensität.....	42
4.2.3	Bestimmung von Dichte und Gewicht der Lysimeterkomponenten.....	43
4.2.4	Klimatische Parameter.....	43
4.2.5	Untersuchung des Kiesel in den Lysimetern.....	43
4.2.6	Untersuchungen zu Haupt- und Spurenelementen, pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit .....	44
4.2.7	Untersuchungen zur Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen.....	50
4.2.8	Untersuchungen zum Einfluss huminstoffähnlicher Substanzen und von partikelgebundenem Stofftransport.....	51
4.3	Laborversuche .....	55
4.3.1	Ammoniumnitrat-Extrakt .....	55
4.3.2	Kationenaustauschkapazität.....	56
4.3.3	S4-Verfahren und Modifiziertes S4-Verfahren .....	56
4.3.4	pH-stat Versuche .....	58
4.3.5	Säulenversuche.....	61
4.3.6	Weitere Elutionsversuche .....	64
<b>5</b>	<b> Interpretation und Diskussion.....</b>	<b>68</b>
5.1	Charakterisierung der Recycling-Materialien .....	68
5.1.1	Korngröße, Elementgehalte und Stoffgruppen .....	68
5.1.2	Pufferkapazität.....	70
5.1.3	Bindungsstärke von Stoffen.....	73
5.2	Statische Verfahren.....	79
5.2.1	Vergleichbarkeit und Versuchsdauer von S4- und Modifiziertem S4-Test ....	79
5.2.2	Einfluss der Korngröße auf die Stofffreisetzung .....	79
5.2.3	Aussagekraft der Kombination Schüttelversuche und Standtest .....	83
5.3	Feld- und Säulenversuche .....	85
5.3.1	Ursachen für auftretende pH-Werte.....	85
5.3.2	Bildung von Sekundärphasen und deren Einfluss auf Sorption .....	88
5.3.3	Prozesse bei der Hauptelementfreisetzung .....	90
5.3.4	Prozesse bei der Spurenelementfreisetzung .....	94
5.4	Übertragbarkeit von Labor- auf Feldversuche.....	105
5.4.1	Extraktionsverfahren und statische Verfahren.....	105
5.4.2	Säulenversuche .....	109
<b>6</b>	<b> Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>115</b>
6.1	Bewertung der Recycling-Materialien .....	115
6.2	Bewertung der angewandten Laborverfahren.....	116
6.3	Ausblick.....	119
<b>7</b>	<b> Literatur.....</b>	<b>121</b>

---

<b>I Anhang</b> .....	<b>A-M</b>
I.1. Abkürzungsverzeichnis .....	A
I.2. Abbildungsverzeichnis .....	B
I.3. Tabellenverzeichnis .....	C
I.4. Daten .....	D-M
Charakterisierung der Recycling-Materialien .....	D
Feldversuche mit Material RCL 1 und 2 .....	E
Ammoniumnitrat-Extrakt .....	F
S4-Test (Langzeitversuche und nach DIN 38414-4) .....	G
Modifizierter S4-Test (Langzeitversuche und nach TP Min-StB) .....	H
pH-stat Versuche .....	I
Säulenversuche mit Material RCL 1 .....	J
Schüttelversuche und Langzeit-Standtest mit Material RCL 1 und 2 .....	K
Einzelkomponenten Material RCL 1 .....	L
S4-Test (zur Materialheterogenität) mit Material RCL 1 und 2 .....	M

# 1 Einleitung

## 1.1 Anlass

Seit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW/AbfG) vom 27. September 1994 ist der Recyclinggedanke gesetzlich verankert. Nach § 4 dieses Gesetzes sind Abfälle in erster Linie zu vermeiden, in zweiter Linie stofflich zu verwerten oder zur Gewinnung von Energie zu nutzen. Die Verwertung von Abfällen hat Vorrang vor deren Beseitigung, wobei die stoffliche Verwertung die Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) beinhaltet.

Aufbereitete Baureststoffe, so genannte Recycling-Baustoffe, setzen sich hauptsächlich aus den Komponenten Bauschutt und Straßenaufbruch zusammen. Nachdem sie zunächst in Bauwerken zum Einsatz kamen, erfolgt nach deren Rückbau die Aufbereitung in mobilen oder stationären Anlagen für den späteren Verwendungszweck. Im Jahr 1998 fielen 58,5 Mio. t Bauschutt und 14,6 Mio. t Straßenaufbruch an, wobei vom Bauschutt ca. 71 % und vom Straßenaufbruch etwa 86 % zu Recycling-Produkten aufbereitet werden konnten. Bis zum Jahr 2010 wird die jährliche Abfallmenge an Baureststoffen auf ca. 100 bis 130 Mio. t ansteigen. Diese Zahlen deuten die Wichtigkeit der Substitutions- und Recyclingmöglichkeiten von Baustoffen in der Bundesrepublik Deutschland an. Bei Abschätzung der tatsächlichen Verfügbarkeit geologischer Sand- und Kiesvorräte aus tertiären und quartären Bildungen in Deutschland ist zu beachten, dass diese durch Nutzungen wie Siedlungsräume, Straßen, Eisenbahnen sowie durch Wasser- und Naturschutzgebiete auf sehr langfristigem Zeitraum eingeschränkt sein kann. Durch die Verwertung von im Baugewerbe anfallenden Reststoffen werden diese natürlichen Ressourcen geschont. In diesem Zusammenhang muss ebenfalls die Umweltinanspruchnahme durch die Abfallwirtschaft mit der Flächeninanspruchnahme durch Deponien beachtet werden. Die Verwertung von Recycling-Baustoffen ermöglicht die Einsparung von Deponieraum und leistet einen Beitrag zur Abfallentsorgung (BRB 2002a, BMVBW & BMVG 1998, GSF 1997, KWTB 2000, SRU 2000).

Vor einer Wiederverwertung von Recycling-Baustoffen muss allerdings gewährleistet sein, dass hierdurch keine nachteiligen Einflüsse auf die Umwelt entstehen. Das Wasserhaushaltsgesetz vom 12. November 1996 schreibt in den § 26, 27 und 34 vor, dass Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden dürfen, dass eine schädliche Verunreinigung des oberirdischen Gewässers bzw. des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Bei dem Aufbringen von Recycling-Baustoffen auf oder in das Schutzgut Boden finden ebenfalls das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 Anwendung. Hiernach ist eine Sickerwasserprognose durchzuführen die sicherstellt, dass keine nachteiligen Einflüsse auf die Umwelt, insbesondere auf das Schutzgut Grundwasser, entstehen. Die Sickerwasserprognose kann zum einen auf Grund von Materialuntersuchungen im Labor erfolgen, wobei nach GERTH (2001) die nach BBodSchV zur Bestimmung der Quellkonzentration für anorganische Schadstoffe vorgesehenen Laborverfahren als nicht ausgereift anzusehen sind. Des Weiteren kann die Sickerwasserprognose auf der Grundlage

von in-situ Untersuchungen oder durch Rückrechnung von Grundwasseruntersuchungen im Abstrom durchgeführt werden.

Nach QUEVAUVILLER et al. (1996) ist es erforderlich, aus der großen Anzahl an existierenden Elutionsverfahren die jeweils Geeigneten für unterschiedliche Materialien und Fragestellungen zu identifizieren. Hiernach besteht eine passende Vorgehensweise darin, Feld- und Laborversuche durchzuführen und Ergebnisse miteinander zu vergleichen, um auf diese Art Informationen zu Übertragbarkeit und Aussagekraft der unterschiedlichen Verfahren zu erhalten. In Bezug auf Recycling-Baustoffe ist bislang unklar, inwieweit die Ergebnisse von Labor- und Feldversuchen miteinander vergleichbar sind und welche Laborverfahren eine verlässliche, belastbare Prognose zum Stoffaustrag ermöglichen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Stofffreisetzung aus diesen Materialien sowohl unter Freilandbedingungen als auch bei Laborverfahren. Hier gilt es insbesondere die dominanten Parameter zu identifizieren.

## 1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zum einen Feldversuche durchgeführt, um das Elutionsverhalten von Recycling-Baustoffen unter naturnahen Bedingungen studieren zu können. Dazu wurden zwei Testfelder mit einer Fläche von jeweils ca. 36 m<sup>2</sup> eingerichtet, die mit zwei unterschiedlich zusammengesetzten Recycling-Baustoffen befüllt wurden. Beide Materialien waren ohne Deckschicht direkt dem Niederschlag ausgesetzt, wodurch bei den Feldversuchen eine Betrachtung unter „worst-case“-Bedingungen erfolgte. Im Vergleich dazu wurden sowohl Extraktionsverfahren (Ammoniumnitrat-Extraktion, Königswasser-Aufschluss) als auch Elutionsverfahren (S4-Test, Modifizierter S4-Test, pH-stat Versuche, Säulenversuche) im Labor durchgeführt. Es galt der Frage nachzugehen, welche Parameter im Freiland und im Labor wesentlichen Einfluss haben auf die Stofffreisetzung und inwiefern Aussagen im Hinblick auf einen experimentellen „Zeitraffereffekt“ getroffen werden können. Ebenso sollte die Übertragbarkeit der angewandten Labor- auf die Feldversuche beurteilt werden. Neben der zeitlichen Entwicklung der Stofffreisetzung wurde das Augenmerk ebenfalls auf Einflussgrößen wie stoffliche Zusammensetzung des Materials, eingesetzte Korngröße und Art des Extraktions- bzw. Elutionsmittels gelegt. Außer den beiden Testfeld-Materialien wurden bei den Laborversuchen zusätzlich 17 weitere Recycling-Baustoffe aus 12 Bundesländern zu Schaffung einer größeren statistischen Absicherung untersucht.

Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Elution von Stoffen aus Recycling-Materialien im Bauwesen“, das vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung in Bonn finanziell gefördert wurde. Die Projektabwicklung erfolgte unter der Federführung der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen

Elutions- und Extraktionsverfahren finden eine weit verbreitete Anwendung, um die Freisetzung von Stoffen aus Materialien zu beurteilen. Extraktion bezieht sich dabei auf Trennverfahren, bei denen mit Hilfe eines geeigneten Lösungsmittels Bestandteile aus dem zu bewertenden Material herausgelöst werden. Handelt es sich um Extraktionsverfahren, bei denen das Lösungsmittel neutrales bzw. schwach saures oder basisches Wasser ist, werden diese als Elutionsverfahren bezeichnet (DIBT 2000, HLUG 2001).

Grundsätzliche Anforderungen an Elutions- und Extraktionsverfahren sind, dass sie möglichst

- natürliche Gegebenheiten gut widerspiegeln,
- mit einem vertretbaren Aufwand (Zeit, Apparaturen, Kosten) durchzuführen sind und
- reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Bereits bei der Auswahl von Elutions- und Extraktionsverfahren ist zu beachten, dass durch die Wahl eines bestimmten Verfahrens ein großer Einfluss auf das Versuchsergebnis ausgeübt wird, da die Versuchsbedingungen der einzelnen Verfahren sehr unterschiedlich sind. In Bezug auf die BBODSCHV ist davon auszugehen, dass Materialuntersuchungen im Labor (Elution, Extraktion) zukünftig allgemein als die in der Routine am meisten geeignete Methode angesehen werden (BLANKENHORN 1994, LICHTFUSS 2000, QUEVAUVILLER et al. 1996, SCHMID 2001).

### 2.1 Extraktionsverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit kamen der „Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen“ nach DIN 38414 Teil 7 sowie die „Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung“ nach DIN 19730 zum Einsatz. Die hierbei erzielten Resultate sind in hohem Maße verfahrensabhängig, wodurch bei der Deutung der analytischen Resultate die angewandten Extraktionsverfahren unbedingt berücksichtigt werden müssen.

Generell werden Aufschlussverfahren dafür eingesetzt, den in einer Probe enthaltenen gesamten Verbindungs- oder Elementgehalt bzw. Anteile davon freizusetzen, um eine qualitative und quantitative Analyse zu ermöglichen. In der BBODSCHV wird der **Königswasserextrakt** als Methode für die Bestimmung des Gesamtgehaltes anorganischer Schadstoffe genannt. Allerdings können mit diesem Verfahren nicht alle Mineralien vollständig in Lösung gebracht werden, insbesondere Blei- und Chromminerale werden häufig nur teilweise aufgeschlossen. Nach HLUG (2001) stellen Mineralien, die durch den Aufschluss mit Königswasser nicht in Lösung gebracht werden können, in der Regel auch keine Umweltgefährdung dar. Da beim Probenaufschluss mit Königswasser die Silicatstruktur der Probe nicht zerstört oder nur wenig angegriffen wird (im Gegensatz zum Aufschluss mit Flusssäure), werden die mit diesem Verfahren ermittelten Elementgehalte auch als „Pseudototal-Elementgehalte“ bezeichnet. Mit Königswasser oder anderen Säureaufschlüssen lassen sich reproduzierbar ca. 80 – 100 % der in der Probe vorhandenen Schwermetalle freisetzen. Dieser Anteil reicht

häufig zur Beschreibung der stofflichen Zusammensetzung der Probe, womit der höhere Aufwand bei Durchführung eines Aufschlusses zur Bestimmung von Totalgehalten (Aufschluss mit Flusssäure) in diesem Fall nicht erforderlich ist. Die Aufschlussbedingungen beim Königswasserextrakt mit hoher Säurekonzentration sowie hoher Temperatur mit dem Ziel der Zerstörung der Probenmatrix führen dazu, dass über die Art der Bindung der einzelnen Elemente bzw. die in der Probe ursprünglich vorhandenen Verbindungen keine Aussagen mehr getroffen werden können (VOIGT & WIPPERMANN 1998).

Die **Ammoniumnitratlösung** ist ein wirkungsvolles Extraktionsmittel für wasserlösliche anorganische Stoffe, gilt jedoch im Vergleich zu anderen Extraktionsverfahren als schwächeres Lösungsmittel. Dabei liegt der ursprüngliche Einsatzbereich des Ammoniumnitrat-Extraktes bei der Bestimmung von pflanzenverfügbaren Nährstoffen und Schwermetallen in Böden. Die Ermittlung von verschiedenen, physikalisch an Feststoffe gebundenen Metallen spielt für die Abschätzung der Mobilisierbarkeit aus Böden und Abfällen eine wichtige Rolle. Hierbei wird versucht, den Übergang von Metallen aus dem Boden über das Bodenwasser in die Pflanze, z.B. mit Hilfe von Neutralsalzlösungen wie Ammoniumnitrat, nachzubilden. In der mobilen Fraktion werden wasserlösliche und austauschbare (=unspezifisch adsorbierte) Schwermetalle sowie leicht lösliche Metallkomplexe erfasst. Mittels der Gehalte an mobilen, nachlieferbaren und fixierten Schwermetallanteilen können Informationen gewonnen werden über die Schwermetall-Bindungsformen. Nach HLUG (2001) führt die Ammoniumnitrat-Extraktion eventuell zu einer Überschätzung der Extrahierbarkeit/Eluierbarkeit von Schadstoffen (QUEVAUVILLER et al. 1993a, QUEVAUVILLER et al. 1993b, ZEIEN & BRÜMMER 1989).

## 2.2 Elutionsverfahren

Die Elutionsverfahren lassen sich übergeordnet unterteilen in

- Flaschentests (bzw. Schütteltests) und
- Säulenversuche.

Beide Verfahren können statisch durchgeführt werden, d.h. die Elutionsflüssigkeit wird über den gesamten Zeitraum nicht ausgetauscht, oder sie können dynamisch durchgeführt werden, indem die Elutionsflüssigkeit entweder kontinuierlich oder stufenweise ausgetauscht wird. Bei den Flaschentests wird das Material mit dem Elutionsmittel in eine Flasche gegeben, die danach verschlossen wird. Erfolgt die Bewegung der Flaschen z.B. mittels eines Überkopfschüttlers oder eines Schwingtisches, wird diese Versuchsanordnung auch als Schütteltest bezeichnet.

Bei den Elutionsverfahren kann durch die Auswahl einer bestimmten Methode auf die charakteristischen Merkmale der physikalischen und chemischen Randbedingungen bei der Elution Einfluss genommen werden. Es gibt eine Reihe physikalischer und chemischer Faktoren, die das Elutionsverhalten beeinflussen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Physikalische und chemische Einflussfaktoren auf das Elutionsverhalten (nach GDCH 1996, VAN DER SLOOT et al. 1998)

<b>Physikalische</b> Einflussfaktoren auf das Elutionsverhalten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• geometrische Form und Korngröße des Materials</li> <li>• Homogenität / Heterogenität der Feststoffmatrix</li> <li>• Versuchszeitraum</li> <li>• Fließrate des Eluenten bzw. Wasser/Feststoff-Verhältnis</li> <li>• Temperatur während der Elution</li> <li>• Porosität der Feststoffmatrix</li> <li>• Permeabilität der Matrix</li> <li>• Art der Bewegungserzeugung und Bewegungsfrequenz (bei Schütteltests)</li> </ul>
<b>Chemische</b> Einflussfaktoren auf das Elutionsverhalten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösungsgleichgewicht oder kinetisch kontrollierte Freisetzung</li> <li>• Potentielle Auslaugbarkeit der Inhaltsstoffe</li> <li>• pH-Wert</li> <li>• Komplexierung durch anorganische oder organische Inhaltsstoffe</li> <li>• Redox-Bedingungen</li> <li>• Sorptionsprozesse</li> </ul>

Viele dieser Einflussgrößen werden durch die Versuchsdurchführung festgelegt, sie sind teilweise aber auch vom zu untersuchenden Material vorgegeben. Da diese Faktoren auf die Ergebnisse eines Elutionsversuches wesentlichen Einfluss haben, kommen Versuche, die unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden, zu unterschiedlichen Resultaten.

Elutionsversuche werden häufig mit dem Ziel durchgeführt, mittel- oder langfristige Prognosen für das Elutionsverhalten der zu untersuchenden Materialien abzugeben. Die Zeitraffung ist ein vielfach angestrebter Effekt, um den zeitlichen Aufwand der Elutionsversuche möglichst gering zu halten. Hierfür können in Elutionstests verschiedene Randbedingungen verändert werden, wie Wasser/Feststoff-Verhältnis, Korngröße und Durchflussrate. Allerdings muss beachtet werden, dass bei Änderung dieser Randbedingungen häufig auch Parameter wie z.B. der pH-Wert beeinflusst werden, was bei der Interpretation einer möglichen Beschleunigung von Elutionsprozessen unbedingt berücksichtigt werden muss (GDCH 1996, VAN DER SLOOT et al. 1998, VAN DER SLOOT 1998).

Es wurden das **S4-Verfahren** (nach DIN 38414 Teil 4), das **Modifizierte S4-Verfahren** (nach TP MIN-STB Teil 7.1.1, FGSV 1999) sowie das **pH-stat Verfahren** als Schütteltests mit statischer Versuchsanordnung angewandt. **Säulenversuche** wurden unter dynamischen Bedingungen durchgeführt.

Die Schüttelversuche nach **S4- und Modifizierter S4-Test** eignen sich für die schnelle Überprüfung des Elutionsverhaltens von Feststoffen, insbesondere zur Ermittlung von leicht löslichen Stoffen (z.B. Salzen). Allerdings sind Rückschlüsse auf das tatsächliche

Verhalten der Feststoffe (z.B. in einer Ablagerung) nur begrenzt möglich. Bei der Elution nach DIN 38414 Teil 4 und TP MIN-STB Teil 7.1.1 stellt sich ein chemisches Milieu in der wässrigen Phase ein, das ausschließlich von der Feststoffphase bestimmt wird. Unter natürlichen Bedingungen können bei längerer Ablagerungsdauer beispielsweise Änderungen des pH-Wertes und des Redox-Potentials auftreten, welche in den Eluatn aus dem S4- und Modifizierten S4-Test nicht erfasst werden.

Der **pH-stat Versuch** wurde als Routinetest zur Beurteilung der Elution von Schwermetallen aus Abfällen und Böden entwickelt. In einem Schüttelversuch wird die Reaktion des Feststoffes unter kontrollierten Bedingungen mit der Lösungsphase erzwungen, indem ein festgelegter pH-Wert in der Elutionsflüssigkeit durch eine kontinuierliche und geregelte Zugabe von Säure oder Base eingestellt wird.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts von sauren Bodenlösungen wird entscheidend von der Pufferkapazität des Abfalls bzw. Bodens bestimmt. Mit dem pH-stat Versuch kann das Pufferverhalten besonders gegenüber Säureeintrag (saurer Regen) zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Materialien abgeschätzt werden. Die Säureneutralisationskapazität ist zur Erstellung einer Langzeitprognose geeignet um zu ermitteln, nach wie viel Jahren bei einem Material mit einer pH-Wert Erniedrigung und somit einer verstärkten Schwermetallfreisetzung zu rechnen ist. Dabei muss beachtet werden, dass verschiedene Vorgehensweisen wie beispielsweise unterschiedliche Schüttelgeschwindigkeit oder Verwendung von Materialien mit unterschiedlicher Korngröße selbst beim gleichen Material zu voneinander abweichenden Ergebnissen führen können (KARIUS & HAMER 2001, PASCHKE et al. 1999).

Bei **Säulenversuchen** wird das Material in Säulen eingebaut und von einem Eluenten durchströmt, der die gelösten Stoffe abtransportiert. Während bei der statischen Versuchsdurchführung die Flüssigkeit im Kreis geführt wird, durchfließt bei der dynamischen Versuchsdurchführung die Elutionsflüssigkeit das Probenmaterial nur einmalig, so dass die Probe stets mit neuer Flüssigkeit beregnet wird. Außerdem kann die Durchströmung entweder von oben nach unten (Simulation ungesättigter Verhältnisse) oder von unten nach oben (Simulation gesättigter Verhältnisse) erfolgen. Säulenversuche sind in der Regel wesentlich aufwändiger als Flaschen- bzw. Schütteltests, spiegeln aber natürliche Bedingungen realistischer wieder. Durch den Wechsel von Feucht- und Trockenphasen können praxisnahe Gegebenheiten simuliert werden. Es handelt sich bei den Säulentests um zeitlich ausgedehnte Versuchsdurchführungen, bei denen der zeitliche Verlauf der Elution verfolgt werden kann (GDCH 1996, POON et al. 1999, VAN DER SLOOT et al. 1998).

In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile von Schüttel- und Säulentests gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Schüttel- und Säulentests (nach GDCH, 1996)

Testverfahren	Vorteile	Nachteile
Schütteltests	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Versuchsdurchführung</li> <li>• schnelle Verfügbarkeit der Messwerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbringung mechanischer Energie beeinflusst Messergebnisse</li> <li>• geringe Übertragbarkeit der Ergebnisse auf natürliche Gegebenheiten</li> <li>• nur wassergesättigte Bedingungen werden widerspiegelt</li> </ul>
Säulentests	<ul style="list-style-type: none"> <li>• physikalische Eigenschaften der Materialproben können berücksichtigt werden</li> <li>• gute Simulation der langsamen Durchsickerung möglich</li> <li>• kontinuierliche Elution kann über lange Zeiträume modelliert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ungleichmäßiges Packen der Säule kann zur Ausbildung bevorzugter Sickerwege führen</li> <li>• Einhaltung einer vollständigen und gleichmäßig über den Probenquerschnitt verteilten Durchströmung ist nicht kontrollierbar</li> <li>• Möglichkeit des verstärkten Dichtsetzens der Säule</li> <li>• Wandeffekte sind nicht auszuschließen</li> <li>• lange Versuchsdauer</li> <li>• Probleme der Reproduzierbarkeit</li> </ul>

### 2.3 Recycling-Baustoffe

Beim Neubau, Umbau oder Abbruch von Bauwerken entstehen Abfälle, die nach Tabelle 3 folgendermaßen untergliedert werden:

Tabelle 3: Definition, Zusammensetzung und Herkunft von Bauabfällen (nach SRU 2000, TA SIEDLUNGSABFALL 1993)

Bauabfälle	Definition	Zusammensetzung	Herkunft
Bodenaushub	nicht kontaminiertes, natürlich gewachsenes oder bereits verwendetes Erd- oder Felsmaterial	Mutterboden, Sand, Kies, Lehm, Ton, Steine, Fels etc.	Gartenbau, Landschaftsbau, Straßenbau, Tiefbau
Bauschutt	mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen	Erdreich, Beton, Ziegel, Kalksandsteine, Mörtel, Gips, Leichtbaustoffe, Fliesen, Steinwolle etc.	Hochbau
Straßenaufbruch	mineralische Stoffe, die hydraulisch, mit Bitumen oder Teer gebunden oder ungebunden im Straßenbau verwendet werden	Asphalt, Teer, Beton, Sand, Kies, Schotter, Pflaster- und Randsteine etc.	Straßenbau
Baustellenabfälle	nicht mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen	Metalle, Holz, Kunststoffe, Verpackungsmaterial (Papier, Kartonagen), Kabel, Farben, Lacke, Klebstoffe, Isoliermaterialien etc.	Hochbau

Es handelt sich hierbei um Materialien, die zunächst in mobilen oder stationären Anlagen aufbereitet werden. Anschließend können sie als Recycling (RCL)-Baustoffe bzw. Sekundärrohstoffe eingesetzt werden und natürliche mineralische Massenbaustoffe wie Sand, Kies oder Schotter substituieren. Dabei werden Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle als so genannte Baureststoffe zusammengefasst. Die Verwendungsmöglichkeiten von RCL-Baustoffen liegen hauptsächlich im Straßen- und Wegebau (Tabelle 4), wo sie beispielsweise als Frostschutz- und Schottertragschichten eingesetzt werden können.

Tabelle 4: Verwertung und Deponierung von Baureststoffen Anfang der 90er Jahre (nach GSF 1997)

	Tiefbau [Mio. t]	Verfüllmaterial, Landschafts- bau, Lärmschutzwall [Mio. t]	Deponien [Mio. t]
Bauschutt	9,7	3,4	23,1
Straßenaufbruch	8,4	3,1	20,1
Baustellenabfälle	4,5	1,8	10,8
Summe	23	8	54

Bei diesem so genannten „down cycling“ werden gebrauchte Baustoffe aus dem Hoch- und Straßenbau nach der Aufbereitung z.B. in Tragschichten verwendet. Weitere Verwendungsmöglichkeiten von RCL-Baustoffen umfassen (nach BMVBW & BMVG 1998, KÄSTEL 1992):

- Lärmschutzwälle
- Bauwerkshinterfüllungen, Verfüllung von Leitungsgräben
- Bodenverfestigung, Untergrundverbesserung
- Park- und Sportplätze sowie Rad- und Gehwege

RCL-Baustoffe können in folgende Stoffgruppen untergliedert werden:

- Naturstein
- Beton (z.B. Fahrbeton, Hochbaubeton)
- Schlacke (z.B. Hochofenschlacke)
- Asphalt
- Klinker, Ziegel, Mauerwerk, Putze
- Mineralische Leichtbaustoffe, Dämmstoffe
- Metalle, Holz, Glas, Kunststoffe

(BMVBW & BMVG 1998, CARLE 1993, GSF 1997, KRASS et al. 1999a, KWTB 2000, WÖRNER et al. 2001)

**Beton** ist eine in Bezug auf das Elutionsverhalten besonders relevante Stoffgruppe der RCL-Baustoffe und wird aus Zement, Zuschlagstoffen und Zugabewasser hergestellt. Zuschlagstoffe für Beton sind Gemenge von ungebrochenen oder gebrochenen Körnern aus natürlichen oder künstlichen mineralischen Stoffen. **Zement** ist ein anorganisches, fein gemahlene, hydraulisch wirkendes Bindemittel für Mörtel und Beton. In Tabelle 5

sind in der Zementchemie übliche Abkürzungen der chemischen Bestandteile aufgelistet.

Tabelle 5: In der Zementchemie gebräuchliche Abkürzungen (TAYLOR 1997)

Chemische Formel	in der Zementchemie gebräuchliche Abkürzung
CaO	C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
SiO <sub>2</sub>	S
H <sub>2</sub> O	H
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
MgO	M
SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$

Ausgangsstoffe für die Zementherstellung sind Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) und Stoffe bzw. Stoffgemische mit einem hohen Anteil an Siliciumoxid (SiO<sub>2</sub>), Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Diese Oxide sind als Hydraulefaktoren für die hydraulische Erhärtung verantwortlich, da sich in der eigentlichen Verfestigungsreaktion aus den eingesetzten Oxiden nach der Zugabe von Wasser verschiedene Minerale bilden. Durch Brennen und Abkühlen der natürlichen Zementrohstoffe entstehen Klinkerminerale. Sie bestehen im Wesentlichen aus den in Tabelle 6 dargestellten Klinkerphasen.

Tabelle 6: Hauptklinkerphasen (nach STARK & WICHT 2000)

Bezeichnung der reinen Phase	Formel	Abkürzung	Name der Klinkerphase	Anteile im Klinker [Massen-%]
Tricalciumsilicat	3 C • S	C <sub>3</sub> S	Alit	40-80
Dicalciumsilicat	2 C • S	C <sub>2</sub> S	Belit	0-30
Tricalciumaluminat	3 C • A	C <sub>3</sub> A	Aluminat	3-15
Calciumaluminatferrit	4 C • A • F	C <sub>4</sub> (A,F)	Aluminatferrit	4-15

Die Klinkerphasen sind in der Lage, in unterschiedlichen Mengen Fremdionen einzubauen. Der Spurenelementgehalt des Klinkers hängt im Wesentlichen von den jeweiligen Gehalten der Elemente in den Roh- und Brennstoffen ab. Art und Konzentration der Spurenelemente in den Ausgangsstoffen zur Klinkerherstellung werden bei Stoffen natürlichen Ursprungs von deren geochemischer Verteilung in den Lagerstätten bestimmt. Aus diesem Grund kann die Konzentration in verhältnismäßig weiten Grenzen schwanken. Beim Brennprozess werden nicht oder nur schwer flüchtige Elemente, wie z.B. Cr, Ni und Zn, vorwiegend im Klinker eingebunden.

Zement entsteht durch die Reaktion von Wasser mit den Klinkerphasen und Calciumsulfat. Die Zumahlung von Calciumsulfat (Gips und/oder Anhydrit) zu Zement in geringen Mengen dient der gezielten Steuerung von Verarbeitungseigenschaften und der Festigkeitsentwicklung. Durch Hydratation erhärtet der sich bildende Zementleim zu Zementstein als Bestandteil des Betons.

Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen), Calciumhydroxid (Portlandit, CH,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) und untergeordnet Folgeprodukte des Calciumaluminats und des Calciumaluminatferrits bilden im Wesentlichen den Zementstein. Träger der Erhärtung und damit der Festigkeit des Zementsteines sind die faserförmigen CSH-Phasen, wobei die Festigkeit von der Art und Beschaffenheit der bei der Umsetzung der Klinkerphasen Alit und Belit mit Wasser entstehenden Neubildungen abhängt. In Zementstein wurden CSH-Phasen unterschiedlicher Zusammensetzung gefunden (Tabelle 7), deren jeweilige Entstehung bei der Zementerhärtung von einer Reihe von Einflussgrößen abhängt (z.B. Temperatur, Wasser/Zement-Verhältnis, Zusammensetzung des Zementes).

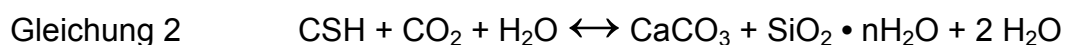
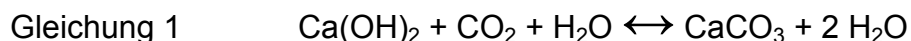
Tabelle 7: Zusammensetzung einiger Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen) (nach HENNING & KNÖFEL 1997)

Name	Summenformel	Abkürzung
Hillebrandit	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_2\text{SH}$
Afwillit	$3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
Foshagit	$5 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_5\text{S}_3\text{H}_3$
Riversideit	$5 \text{ CaO} \cdot 6 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_3$
9-Å-Tobermorit	$5 \text{ CaO} \cdot 6 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_2$
11-Å-Tobermorit	$5 \text{ CaO} \cdot 6 \text{ SiO}_2 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$
14-Å-Tobermorit	$5 \text{ CaO} \cdot 6 \text{ SiO}_2 \cdot 9 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_9$
Okenit	$3 \text{ CaO} \cdot 6 \text{ SiO}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_6$

Bei dem Vorhandensein einer Aluminatphase (z.B. Tricalciumaluminat) und Gips entstehen die komplexen Calcium-Aluminatsulfathydrate

- Monosulfat ( $\text{AF}_m$ ) und
- Trisulfat (Ettringit,  $\text{AF}_t$ ).

Das basische Milieu des Zementsteins und damit des Betons wird durch hydroxidische Festphasen erzeugt. Ein wichtiger Prozess bei der Auslaugung von Beton ist die **Carbonatisierung**, unter der man die chemische Reaktion von alkalischen Bestandteilen des Zements mit  $\text{CO}_2$  zu Carbonaten versteht. Die Carbonatisierung schreitet im Zementstein von außen nach innen fort und hat eine Änderung von Struktur und wesentlichen Eigenschaften des Betons zur Folge. Die aus  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  gebildete Kohlensäure reagiert mit Calciumhydroxid (Gleichung 1) oder  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{OH}^-$ -Ionen aus CSH- (Gleichung 2) oder hydratisierten Calciumaluminat-Phasen unter Bildung von Calciumcarbonat. Nach BIN SHAFIQUE et al. (1998) ist langfristig die wesentliche chemische Auswirkung der Carbonatisierung ein Absinken des pH-Wertes von etwa 13 auf 8,3.



Bei Überschreitung der Sättigungsgrenze fällt Calciumhydroxid als Feststoff aus, der im Zementstein in Form von Calciumhydroxidkristallen eingebettet ist. Während der Umwandlung des gelösten  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in  $\text{CaCO}_3$  gehen Teile des kristallinen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in Lösung, so dass die Calciumhydroxidlösung im Porensystem solange gesättigt bleibt,

bis keine Teile des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mehr nachgelöst werden. Im Laufe der Zeit wird nicht nur das Calciumhydroxid carbonatisiert, sondern auch die übrigen Hydratphasen. CSH-Phasen wandeln sich im Carbonatisierungsbereich in Calciumcarbonat und Kieselgel um. Aus Ettringit entstehen Calciumcarbonat, Aluminiumhydroxid und Gips, aus Monosulfat entsteht Monocarbonat. Leichtlösliche Natrium- und Kaliumhydroxide werden nach Verbrauch des reaktionsfähigen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ebenfalls in Carbonate umgewandelt. Eine Quelle für die löslichen Alkalien sind hydraulische Bindemittel bzw. alkalihaltige Zusatzmittel. Als Folge des Carbonatisierens schwindet der Zementstein (BDZ 2000, BDZ 2001, BECKERT & HARTMANN 1976, DOW & GLASSER 2003, GAUGLITZ & MÜLLER-HÖPPE 1999, HENNING & KNÖFEL 1997, KOENSLER 1989, REVERTEGAT et al. 1992, SPRUNG & RECHENBERG 1994, TAYLOR 1997, VDZ 2000, WALTON et al. 1997).

Feuchtigkeitsbedingungen sowie Verwendungsdauer beeinflussen im Wesentlichen die Carbonatisierungsreaktionen in den oberen Schichten des Zementsteins innerhalb des Betons. In Poren, die teilweise Wasser enthalten, findet eine schnellere Carbonatisierung statt als in Poren, die vollständig wassergesättigt bzw. nahezu trocken sind (Abbildung 1). Dies ist auf die um den Faktor von etwa 10000 schnellere Diffusion von  $\text{CO}_2$  in der Luft als in Wasser zurückzuführen (HOUST & WITTMANN 2002, VAN DER SLOOT et al. 1998).

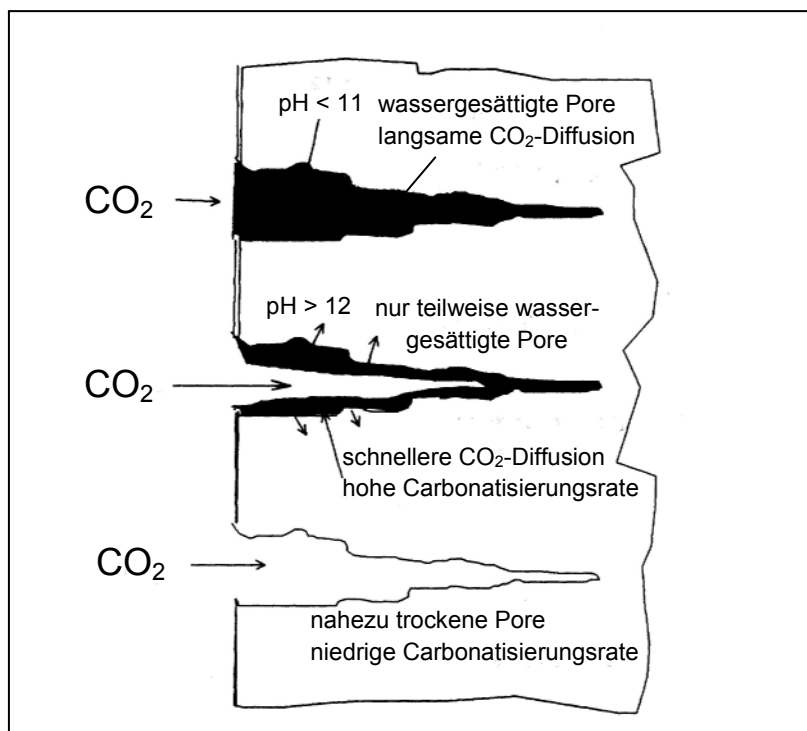
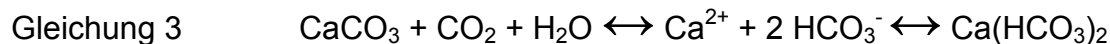


Abbildung 1: Abhängigkeit der Carbonatisierungsrate von der Wassersättigung der porösen Matrix (nach VAN DER SLOOT et al. (1998))

Durch **Auslaugung** kann eine Zonierung an der Oberfläche des Betons entstehen. Zunächst wird der Portlandit aufgelöst, gefolgt von Monosulfat und Ettringit, wobei Monosulfat ab einem pH-Wert von 11,6 oder niedriger instabil wird, während sich Ettringit ab einem pH-Wert von 10,7 oder niedriger auflöst. Anschließend werden auch die CSH-Phasen angegriffen. **Inkongruente** Löslichkeit, bei der das Verhältnis der Ionen in der festen Phase ungleich dem in der flüssigen Phase ist, spielt bei der Verwitterung von

CSH-Phasen in den zementbürtigen Komponenten der Recycling-Baustoffe eine wichtige Rolle. Dabei hängt das Ausmaß der inkongruenten Lösung vom Ca/Si-Verhältnis der auftretenden CSH-Phasen im Feststoff ab (BERNER 1988). Nach HARRIS et al. (2002) wird Calcium anfänglich bevorzugt gelöst aus CSH-Phasen, bevor nach einer bestimmten Zeitdauer und in Abhängigkeit vom Ca/Si-Verhältnis die Stofflösung ein eher kongruentes Verhalten aufweist.

Gelöstes CO<sub>2</sub> im Wasser der Porenlösung kann wiederum Calciumcarbonat auflösen und dadurch Hydrogencarbonat bilden (Gleichung 3), wobei jedoch Reaktionen mit hydroxidischen Phasen (Gleichung 1 und Gleichung 2) eine stärkere Rolle spielen.



Die Aufnahme von Kohlensäure ist stark vom Feuchtigkeitszustand des Zementsteins abhängig. Neben Betonbruch können als weitere zementbürtige Komponenten Zementputz bzw. Putzmörtel in Recycling-Baustoffen auftreten (BDZ 2000, BDZ 2001, TAYLOR 1997, VDZ 2000).

Gebrannte Erzeugnisse wie **Ziegel**, Kacheln und Fliesen werden aus Ton, Lehm oder anderen tonigen Materialien mit Zusatz von Sand bzw. anderen Stoffen hergestellt. Nach KWTB (2000) wurden 1997 für die Ziegelproduktion etwa 22 Mio. t trockener Ton abgebaut, wovon über die Hälfte (13 Mio. t) auf rund 10 Mio. t Mauerziegel entfielen. Beim Brennvorgang werden die Tonminerale hauptsächlich zu Alumosilicaten umkristallisiert, wobei die chemische Zusammensetzung weitgehend von der Beschaffenheit des mineralischen Rohstoffes abhängt. In Abhängigkeit von der Brenntemperatur sind u.a. folgende Phasen am Aufbau des Ziegels beteiligt:

- Calciumsilicat
- Cristobalit (SiO<sub>2</sub>)
- Hämatit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Mullit (3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • 2 SiO<sub>2</sub>)

Schwermetalle können im Rohstoff zwar leicht angereichert sein, werden jedoch beim Brennvorgang zum Teil ausgetrieben oder in eine stabile, schwer lösliche Matrix eingebunden. Hinsichtlich der pH-Bedingungen, die sich bei Kontakt von Ziegelbruch mit Wasser einstellen, ergab ein Perkolationsversuch in einem Lysimeter mit Ziegelbruch von HOLNSTEINER (1997) pH-Werte im neutralen Bereich.

Im Primärkreislauf finden Ziegel hauptsächlich Anwendung im Hochbau, wobei an Ziegeloberflächen Salzausblühungen durch eindringende Feuchtigkeit entstehen können, wenn die Salze durch Verdunsten des Wassers kristallisieren. Neben Mauerwerken kommen Salzausblühungen auch als Ablagerungen auf Betonoberflächen vor, wobei es sich um leicht wasserlösliche Salze handelt. Hierzu gehören neben Carbonaten auch Sulfate, Chloride und Nitrate (Tabelle 8) (ARNOLD 1981, BECKERT & HARTMANN 1976, HOLNSTEINER 1997). Weiterführende Untersuchungen zur Charakterisierung von Ziegeln wurden von HAMER & KARIUS (2002) durchgeführt.

**Asphalt** wird als eine weitere Stoffgruppe in Recycling-Baustoffen verwendet, wobei diese Komponente ein Gemisch aus Bitumen oder bitumenhaltigen Bindemitteln und

Mineralstoffen darstellt. Hinsichtlich der genaueren Zusammensetzung von Asphalt ergab eine Studie von LINDGREN (1996) einen Gesteinsgehalt von ca. 95 %, während bituminöse Bindemittel zu etwa 5 % in Asphalt vorkamen.

Das aus dem Straßenbau anfallende Asphaltgranulat ist ein Gemisch aus Asphaltdecke und Asphalttragschicht einer Straßenbefestigung. Laborversuche nach DIN 38414 – Teil 4 mit Asphaltgranulat ergaben pH-Werte im neutralen Bereich. Jährlich etwa 40 Mio. t an hergestelltem und eingebautem Asphalt sowie 10 Mio. t aus Straßenrückbau sowie Erhaltungsmaßnahmen bereits Mitte der 80er Jahre weisen auf die Bedeutung der Wiederverwertung dieser Stoffkomponente hin (KRASS & MERKEL 1989a, 1989b).

Tabelle 8: Salze in Mauerwerken (nach ARNOLD 1981)

Carbonate		Sulfate	
Calcit	CaCO <sub>3</sub>	Gips	CaSO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
Dolomit	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Bassanit	CaSO <sub>4</sub> · ½ H <sub>2</sub> O
Magnesit	MgCO <sub>3</sub>	Epsomit	MgSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O
Natrit	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10 H <sub>2</sub> O	Mirabilit	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10 H <sub>2</sub> O
Nahcolit	NaHCO <sub>3</sub>	Thenardit	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Kalicinit	KHCO <sub>3</sub>	Arcanit	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Chloride		Nitrate	
Halit	NaCl	Nitrocalcit	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4 H <sub>2</sub> O
Sylvin	KCl	Nitromagnesit	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O
Bischofit	MgCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	Nitronatrit	NaNO <sub>3</sub>
Antarticit	CaCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	Nitrokalit	KNO <sub>3</sub>

## 2.4 Wichtige Einflussgrößen auf die Sickerwasserzusammensetzung

Entscheidend für das Vorkommen verschiedener Spezies im Wasser und dessen hydrochemische Zusammensetzung sind Wechselwirkungen der gelösten Spezies untereinander, Wechselwirkungen mit Gasen und festen Phasen sowie der Stofftransport.

### 2.4.1 Prozesse beim Stofftransport

Beim Transport gelöster Wasserinhaltsstoffe sind Prozesse wie Advektion, Diffusion, Dispersion, Adsorption und Desorption von Bedeutung.

**Advektion** ist der Stofftransport mit dem Trägermedium Wasser und somit die Mitnahme gelöster Inhaltsstoffe, wobei die Konzentrationsverteilung eines Stoffes beim advektiven Transport in unveränderter, nicht abgeflachter Form verlagert wird.

Molekulare **Diffusion** bewirkt den Ausgleich von Konzentrationsunterschieden auf Grund der Brown'schen Molekularbewegung und trägt wie die Dispersion zu einer Vermischung, Abflachung und Verbreiterung der Stoffverteilung bei. Diffusion tritt im Unterschied zu Dispersion sowohl bei sich bewegendem als auch bei ruhendem Wasser auf.

**Dispersion** beschreibt den Massenfluss, der sich auf Grund von Geschwindigkeitsfluktuationen ergibt, die aus der Geometrie und dem Aufbau des Gesteinskörpers resultie-

ren. Dabei können transportierte Stoffteilchen sowohl in Fließrichtung (longitudinale Dispersion) als auch senkrecht dazu (transversale Dispersion) zunehmend auseinander geraten. Diffusion und Dispersion werden häufig auch als hydrodynamische Dispersion zusammengefasst. (DYCK & PESCHKE 1995, ISENBECK-SCHRÖTER 1995).

Mit Diffusionsvorgängen gehen oftmals Adsorption oder Ionenaustausch als Reaktionen mit der Feststoffmatrix einher (DREVER 1982). Bei der **Sorption** kann nach SPOSITO (1998) die Anreicherung von Stoffen an Oberflächen über drei verschiedene Mechanismen ablaufen:

- diffuser Ionenschwarm
- Anlagerungskomplex (außersphärischer Komplex, unspezifische Sorption)
- Durchdringungskomplex (innersphärischer Komplex, spezifische Sorption)

Beim diffusen Ionenschwarm sind Ionen in der Bodenlösung nicht in Oberflächenkomplexen gebunden, sondern über elektrostatische Anziehung an Bodenpartikeln adsorbiert und können sich frei in der Bodenlösung bewegen.

Die Komplexbildung liefert einen entscheidenden Beitrag zur Lösung und Fällung von Mineralen und kann elektrostatisch, kovalent oder eine Kombination aus beiden sein. Elektrostatisch gebundene Komplexe (Anlagerungskomplexe) sind durch Einlagerung von einem oder mehreren Wassermolekülen weniger stabil als kovalent gebundene Komplexe (Durchdringungskomplexe). Während sich austauschbare Ionen auf den Oberflächen noch relativ leicht lösen und weg diffundieren, können die im Kristallgitter sitzenden Ionen nicht so einfach verdrängt werden. Zu ihrer Loslösung ist eine starke Einwirkung auf die Bindungen nötig, die die Mineralstruktur zusammenhalten.

Während nullwertige Komplexe kaum Austauschprozessen unterliegen, zeigen positiv oder negativ geladene Komplexe Wechselwirkungen mit anderen Ionen und Oberflächen. Die hauptsächliche Wirkung des pH-Wertes auf Komplexe ist, dass bei einem niedrigen pH-Wert freie Metallkationen und protonierte Anionen, bei einem hohen pH dagegen Carbonate oder Hydroxyl-Komplexe bevorzugt vorliegen. Somit ist der Effekt des pH auf die Sorption von Metallkationen grundsätzlich das Ergebnis von Ladungsänderungen an Bodenpartikeln, da die elektrostatische Anziehung der Oberfläche für ein Metallkation erhöht wird bei pH-Anstieg. Sorption ist temperaturabhängig, da sie mit steigender Temperatur sinkt (MATTHEß 1990, MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002, SPOSITO 1998).

Beim **Ionenaustausch** beschreibt die Ionenaustauschkapazität die Molmenge adsorbierter ionischer Ladung, die von einer Einheitsmasse des Austauschermaterials desorbiert werden kann. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist dabei abhängig von der Bindungsform und der Austauscherart. Bei den meisten Anwendungen stimmt die Ionenaustauschkapazität mit der maximalen Adsorption von leicht austauschbaren Ionen überein.

Der wichtigste Sorptionsmechanismus im Boden ist der Kationenaustausch, d.h. die Adsorption an negativ geladene Bestandteile unter Desorption einer äquivalenten Menge anderer Kationen. Der Kationenaustausch bildet die chemische Grundlage bei der Pufferung von Protonen und Metallkationen in der Bodenlösung (Pufferkapazität) und folgt einer selektiven Reihe, die neben den Eigenschaften des Austauschers im Wesentlichen durch die Wertigkeit und Größe der ausgetauschten Ionen bestimmt wird.

Die Neigung zur Sorption wird umso höher, je höher geladen und je kleiner ein Kation ist. Protonen bilden hier eine Ausnahme, da deren Sorptionsverhalten meist dem eines 2- oder 3-wertigen Kations entspricht. Wichtige Kationenaustauscher sind Tonminerale, Metalloxyde und -hydroxide sowie Huminstoffe, die permanente bzw. in Abhängigkeit vom pH-Wert variable Ladung tragen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Kationenaustauschkapazität (KAK) einiger Substanzen bei pH 7 und deren pH-Abhängigkeit (nach MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002)

Substanz	KAK [meq/100 g]	pH-Abhängigkeit
Tonminerale		
Kaolinit	3-15	hoch
Illit und Chlorit	10-40	gering
Smectit-Montmorillonit	80-150	nicht oder kaum vorhanden
Vermiculit	100-150	vernachlässigbar
Mn(IV) und Fe(III) Oxyhydroxide	100-740	hoch
Huminstoffe	100-500	hoch

Als Anionenaustauscher wirken Aluminium- und Eisenoxide und in geringem Maß auch bestimmte Tonminerale, die bei niedrigem pH-Wert positive Oberflächenladungen ausbilden können. Jedoch spielt der Anionen- im Gegensatz zum Kationenaustausch im Boden eine eher untergeordnete Rolle.

Da der Ladungsnullpunkt weit unter pH 3 liegt tragen Tonminerale in normalen pH-Bereichen von Böden meist negative Ladungen und können somit im Wesentlichen Kationen sorbieren.

Aluminium, Eisen und Mangan bilden die wichtigsten Oxid- und Hydroxidminerale. Zu den Eigenschaften der Oxide aller drei Metalle zählt, dass die elektrische Oberflächenladung in Abhängigkeit vom pH-Wert variiert. Unter alkalischen Bedingungen ist die Ladung negativ, wodurch Kationen sorbiert werden können. Unter sauren Bedingungen ist die Ladung dagegen positiv, was eine Sorption von Anionen ermöglicht. Der Ladungsnullpunkt von Aluminium- und Eisenoxiden liegt bei einem pH-Wert von etwa 8 - 9. Manganoxide haben einen niedrigeren Ladungsnullpunkt als Eisenoxide, wodurch die Sorption von Anionen bei Eisenoxiden vergleichsweise einfacher auftreten kann (ISENBECK-SCHRÖTER 1995, KOß 1997, MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002, SAVRIC 2001, SELIM & SPARKS 2001, SPOSITO 1998).

#### 2.4.2 Parameter und Mechanismen bei der Stofffreisetzung

Ein wichtiger Parameter bei der Stofffreisetzung ist die **Reaktionskinetik**, da neben Fällungs- und Sorptionsreaktionen auch Lösungsreaktionen kinetisch limitiert sein können (MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002). Im Hinblick auf die durchgeführten Feld- und Laborversuche ist umso eher mit dem Erreichen eines Gleichgewichtszustandes zu rechnen, je länger die Kontaktzeit des Eluenten mit dem Material ist, da langsame Reaktionen weiter fortschreiten können. Im Gegensatz dazu ist bei kürzerer Kontaktzeit nur bei schnelleren Reaktionen von einem Gleichgewichtszustand auszugehen, woge-

gen die Freisetzung von Stoffen mit langsamer Lösungskinetik limitiert ist.

Aus den Elutionsversuchen ermittelte Ergebnisse können sowohl als Konzentration als auch als Massenanteil dargestellt werden.

Konzentrationsangaben ermöglichen einen Vergleich der **Löslichkeit** in Abhängigkeit von Randbedingungen wie dem pH-Wert (VAN DER SLOOT et al. 1998). Bei Laborversuchen spielt zudem die Verfahrensart mit statischer oder dynamischer Versuchsanordnung eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Stofflöslichkeit. Bei statischen Versuchen kann die Stoffkonzentration bei ausreichend langer Versuchsdauer zunehmen, bis das chemische Gleichgewicht erreicht ist und die hierbei auftretende Konzentration von der Löslichkeit des Stoffes abhängig ist. Bei dynamischer Versuchsanordnung werden gelöste Stoffe abtransportiert und Stoffkonzentrationen werden von der Kontaktzeit des Eluenten mit dem Material beeinflusst.

Aussagen zur **Verfügbarkeit** eines Stoffes erhält man durch die Umrechnung von Konzentration in Massenanteil (VAN DER SLOOT et al. 1998). Wenn ein Stoff eine limitierte Verfügbarkeit in der Festphase besitzt, kann nur eine begrenzte Menge dieses Stoffes in Lösung gehen. Dementsprechend werden Stoffkonzentrationen bei einer schnelleren Reaktionskinetik zu einem früheren Zeitpunkt zurückgehen als bei langsamen Reaktionen.

Mit der Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen lässt sich feststellen, ob die Stofffreisetzung von der Löslichkeit oder der Verfügbarkeit des Stoffes bestimmt wird. Vergleichbare Konzentrationen bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen weisen auf eine von der Löslichkeit kontrollierte Freisetzung hin. Dementsprechend zeigen vergleichbar hohe Massenanteile bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen an, dass die Stofffreisetzung von der Verfügbarkeit des Stoffes im Material limitiert wird.

Nach VAN DER SLOOT et al. (1998) können vorherrschende Mechanismen bei der Stofffreisetzung aus der Umrechnung von Ergebnissen in **Freisetzungsraten** und einer doppel-logarithmischen Auftragung gegen die Zeit ermittelt werden. Dabei ist zum einen kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche ohne zusätzlich wirksame interne Diffusionsprozesse möglich, des Weiteren kann porenraumretardierte Freisetzung erfolgen. Außerdem resultieren kurzfristig oberflächliche Stoffabwaschung („surface wash-off“) sowie langfristig die Freisetzung aus heterogenen Korngemischen in einer gleichen Steigung bei doppel-logarithmischer Auftragung (Abbildung 2).

Während des Versuchsverlaufs auftretende Prozesse wie Porenraumverkleinerung durch Ausfällung oder Änderungen der chemischen Randbedingungen durch atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Einfluss müssen bei der Interpretation berücksichtigt werden, da sie zu Unstetigkeiten bei der doppel-logarithmischen Ergebnisauftragung führen. Ebenso kann vor allem zu Beginn der Stofffreisetzung der Prozess der oberflächlichen Abwaschung vorherrschen und eine später dominante porenraumretardierte Freisetzung überlagern (Abbildung 2). In diesem Fall ist für die Beurteilung des langfristig vorherrschenden Freisetzungsprozesses die porenraumretardierte Freisetzung als wesentlich anzusehen (VAN DER SLOOT et al. 1998).

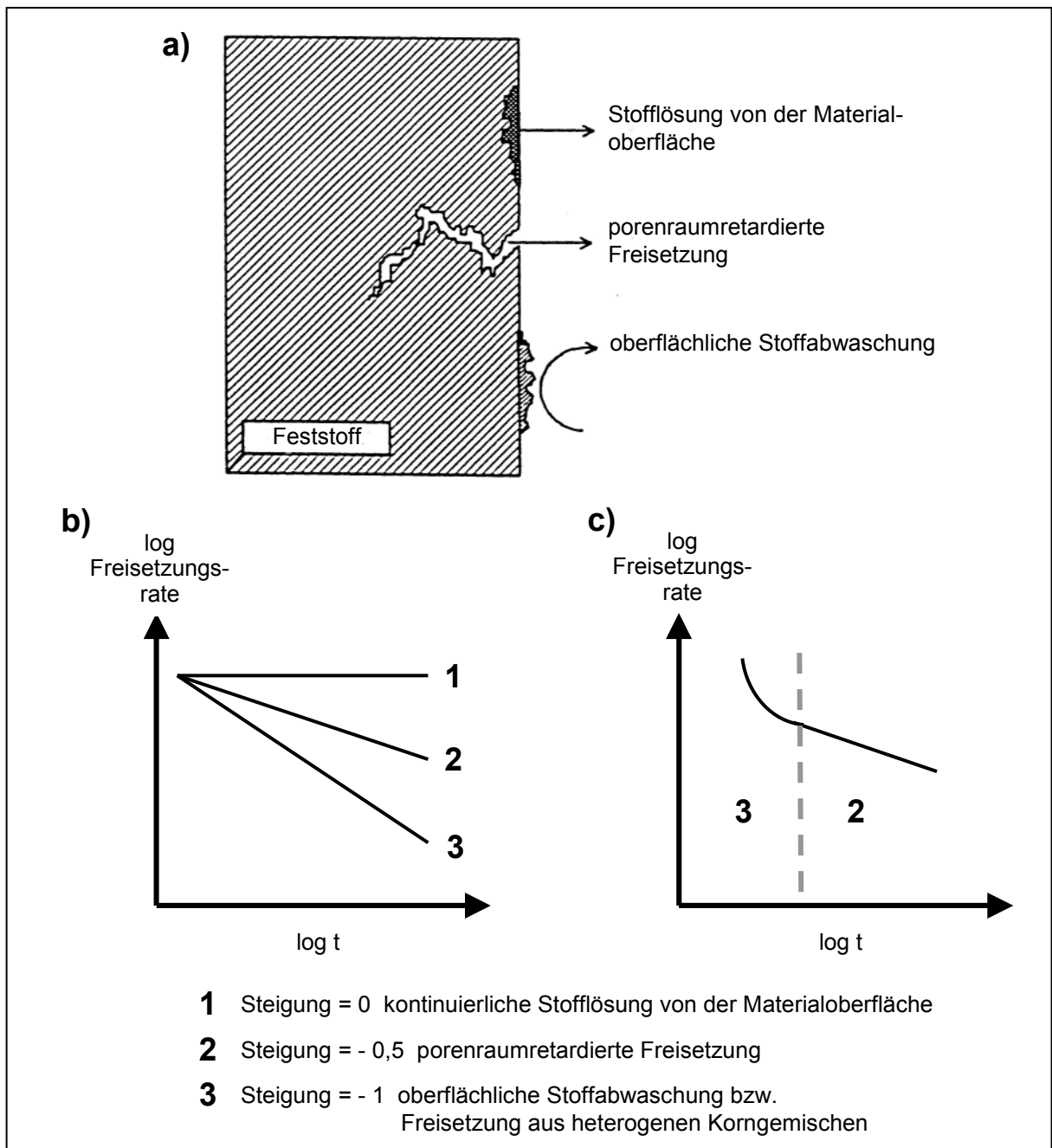


Abbildung 2: a), b) auftretende Prozesse bei der Stofffreisetzung; c) Überlagerung von Prozessen (a) nach VAN DER SLOOT & DE GROOT (1990); b), c) nach VAN DER SLOOT et al. (1998))

### 2.4.3 Bildung von Sekundärmineralen

Neu gebildete Minerale werden als **Sekundärminerale** bezeichnet und weisen oft Tonfraktionsgröße auf. Nach GERTH (2001) können Eisenoxide Schwermetalle und Oxoanionen nicht nur stark adsorbieren, sondern bei Neubildungsvorgängen auch inkorporieren, was die Bedeutung von Sekundärmineralen als Speicherminerale andeutet. Cadmium, Mangan, Zink, Kobalt und Selen gehören zu den Metallen, die an Calcit sorbiert werden können (COMANS & MIDDELBURG 1987, PEZZAROSSA & PETRUZZELLI 2001).

Neben Portlandit und Gibbsit können sich CSH-Phasen und Ettringit als weitere bedeutsame Sekundärminerale bilden (KERSTEN 1996, PALITZSCH 2002, SAVAGE et al. 1992, SPEISER et al. 2000). Im Rahmen dieser Untersuchung betreffen diese sekundä-

ren Speicherminerale insbesondere die zementbürtigen Materialien in den Recycling-Baustoffen.

Nach SCHMIDT-DÖHL (1996) können in Beton eindringende Sulfationen zusammen mit den im Zementstein vorhandenen calcium- und aluminium- bzw. eisenhaltigen Phasen Ettringit bilden. Als Aluminium- oder Eisenquelle können vor allem die im Zementstein vorhandenen  $AF_m$ -Phasen dienen. Zur Neubildung von Ettringit werden große Mengen an Calcium verbraucht, wodurch die im Zementstein vorhandene Portlanditmenge erheblich vermindert wird. Von einer sekundären Ettringitbildung wird auch bei SPRINGENSCHMID et al. (1993) berichtet. In der Ettringitstruktur können  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$  sowie  $OH^-$  durch geeignete andere Spezies substituiert werden (Tabelle 10). Nach VAN DER SLOOT (2000) ist diese Substitution bedeutsam bei pH-Werten größer 10.

Tabelle 10: Substitutionsmöglichkeiten für Ionen in Ettringit als Mineral und synthetischer Stoff (nach GOUGAR et al. 1996)

$Ca^{2+}$	$Al^{3+}$	$SO_4^{2-}$	$OH^-$
$Pb^{2+}$	$Cr^{3+}$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
$Cd^{2+}$	$Si^{4+}$	$Cl^-$	
$Co^{2+}$	$Fe^{3+}$	$OH^-$	
$Ni^{2+}$	$Mn^{3+}$	$CrO_4^{2-}$	
$Zn^{2+}$	$Ni^{3+}$	$AsO_4^{3-}$	
	$Co^{3+}$	$SeO_4^{2-}$	
		$NO_3^-$	
		$MoO_4^{2-}$	
		$ClO_3^-$	
		$SO_3^{2-}$	

CSH-Phasen können sich als Neubildungen in Porenräumen bilden. Die Immobilisierung von im Sickerwasser gelösten Ionen kann bei den CSH-Phasen durch Mechanismen wie Sorption oder Substitution an Zwischenschichten erfolgen. Eine Auflistung der Ionen, die durch CSH-Phasen immobilisiert werden können, ist in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Spezies, die nachweislich durch CSH-Phasen immobilisiert werden können (nach GOUGAR et al. 1996)

durch CSH-Phasen immobilisierte Spezies
Li, Na, K
Mg, Ni, Co, Hg, Zn, Cd
Al, Fe, Cr
Pb, Cl
$OH^-$ , $CO_3^{2-}$ , $SO_4^{2-}$

Bei CSH-Phasen wird vermutet, dass sie erhalten bleiben können, solange sie durch den Carbonatpuffer stabilisiert werden. Nach Abbau des Carbonatpuffers können durch Auflösung der CSH-Phasen hierdurch ursprünglich immobilisierte Ionen freigesetzt und

mit dem Sickerwasser abtransportiert werden (GOUGAR et al. 1996, KERSTEN 1996, SAVAGE et al. 1992, TRABER et al. 2000).

#### 2.4.4 Verhalten von Metallen

Metalle wie Al und Fe zählen zu den komplexbildenden Elementen, da sie unter verschiedenen äußeren Bedingungen sowohl als Kation als auch als Anion auftreten können. Dabei werden Schwermetalle durch eine Dichte  $> 3,5 - 5 \text{ g/cm}^3$  von den Leichtmetallen unterschieden. Halbmetalle bilden den Übergang von den Nichtmetallen zu den Metallen. Zu den Schwermetallen, die die umfangreichste Gruppe der Metalle darstellen, gehören u.a. Pb, Cd, Cr, Co, Fe, Cu, Mn, Mo, Ni, Se, Zn und Sn. Al ist ein Leichtmetall, Sb, As, Si und Se zählen zu den Halbmetallen (FALBE & REGITZ 1998, KEUNE 1989).

Nach VAN DER SLOOT et al. (1998) zeigen viele Metalle eine erhöhte Löslichkeit sowohl bei niedrigem als auch bei hohem pH-Wert. Die Abhängigkeit der Löslichkeit von Schwermetallen in Bezug auf pH- und Eh-Wert ist in Abbildung 3 dargestellt.

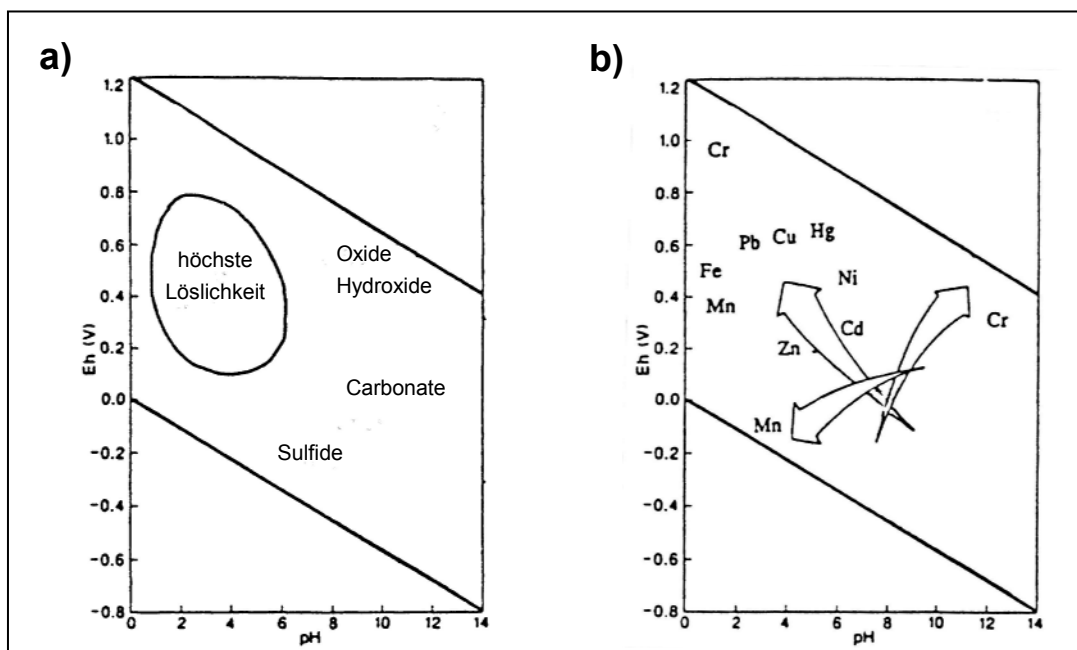


Abbildung 3: Löslichkeit von Schwermetallen in Bezug auf pH- und Eh-Werte (ohne Berücksichtigung gelöster und fester organischer Substanz): a) die Löslichkeit kontrollierende wichtigste Minerale; b) tendenziell zunehmende Löslichkeit (nach FÖRSTNER (1987) in BOURG (1995))

Redoxpotential, pH-Wert, Temperatur und Zusammensetzung der Lösung sind entscheidende Faktoren für die Spezierung der Elemente in der Lösung (VOIGT 1990). Nach BOURG (1995) ist insbesondere bei Metallen die **Spezierung** ein wesentlicher Faktor, um zu einem besseren Verständnis des Stoffverhaltens in der Umwelt zu gelangen.

Für **Arsen**, das im Rahmen dieser Untersuchung eine herausragende Rolle bei Feld- und Laborversuchen mit den Recycling-Baustoffen spielt, kann der Einfluss der Spezierung auf das Stoffverhalten beispielhaft dargestellt werden. Arsenit und Arsenat sind mit

ihren jeweiligen Spezies (Tabelle 12) die Hauptformen, in denen Arsen auftritt (MATERA & LE HECHO 2001).

Tabelle 12: Spezies, in denen Arsenit und Arsenat unter anderem auftreten können (nach MATERA & LE HECHO 2001)

<b>Arsenit (As (III))</b>	<b>Arsenat (As (V))</b>
$\text{H}_3\text{AsO}_3$	$\text{H}_3\text{AsO}_4$
$\text{H}_2\text{AsO}_3^-$	$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$
$\text{HAsO}_3^{2-}$	$\text{HAsO}_4^{2-}$
$\text{AsO}_3^{3-}$	$\text{AsO}_4^{3-}$

Da Oxidations- bzw. Reduktionsvorgänge relativ langsam ablaufen, treten Arsenat und Arsenit nach JAIN & LOEPPERT (2000) oftmals gleichzeitig sowohl unter reduzierenden als auch oxidierenden Bedingungen auf. Allerdings ist Arsenat nach MANNING & GOLDBERG (1997) bei oxidierenden Bedingungen dominant, vorwiegend mit seinen anionischen Spezies. Dabei kann die Oxidation von Arsenit zu Arsenat bei neutralen pH-Werten sehr langsam ablaufen, bei stärker alkalischen oder sauren Bedingungen ist jedoch ein schnellerer Ablauf möglich (TURNER 1981). Arsenit kommt bei pH 7 hauptsächlich als neutrales Molekül in der Form  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  (Tabelle 13) vor. Es ist in dieser Form im Vergleich zu den anionischen Spezies von Arsenat mobiler, da es auf den meisten Mineraloberflächen weniger stark adsorbiert wird.

Tabelle 13: Auftreten vorherrschender gelöster Arsenspezies bei verschiedenen pH-Werten (nach JAIN & LOEPPERT 2000)

	<b>vorherrschende gelöste Spezies</b>		
	pH 4	pH 7	pH 9
<b>Arsenit (As (III))</b>	$\text{H}_3\text{AsO}_3$	$\text{H}_3\text{AsO}_3$	$\text{H}_3\text{AsO}_3$ $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$
<b>Arsenat (As (V))</b>	$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$	$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ $\text{HAsO}_4^{2-}$	$\text{HAsO}_4^{2-}$

Nach RAVEN et al. (1998) haben Arsenitspezies bei demselben pH-Wert einen weniger negativen Ladungscharakter als Arsenatspezies. Daher erfolgt bei Arsenitspezies eine geringere Abstoßung bei ansteigenden pH-Werten mit einhergehender Zunahme der negativ geladenen Oberflächen. Hierdurch nimmt die Sorption von Arsenit bei ansteigendem pH weniger stark ab im Vergleich zu Arsenat.

Hinsichtlich der Sorption kann Arsenat unter oxidierenden Bedingungen stabile inner-sphärische Komplexe mit Eisenhydroxiden bilden. Arsenat kann ebenfalls komplex an Oberflächen von Eisen- und Aluminiumverbindungen gebunden werden, wobei es bei Eisenoxiden an der Oberfläche liegende  $\text{OH}^-$ -Ionen ersetzen kann. Spezifische Adsorption von neutralen Arsenspezies an amorphen Eisenoxiden ist ebenfalls möglich. Auch an Calcit wurde Sorption von Arsenat nachgewiesen, welche von pH 6 bis 10 zunimmt und maximale Werte zwischen pH 10 und 12 erreicht (KEON et al. 2001, MATERA & LE HECHO 2001, MYNENI et al. 1998a, OBERMANN & CREMER 1992, TRETNER 2003, TURNER

1981).

Nach JAIN & LOEPPERT (2000) verhalten sich Arsenat und Arsenit bei der Bindung an Eisenoxiden hinsichtlich des pH-Wert Einflusses gegensätzlich, wenn sie beide in Lösung auftreten. Während bei zunehmenden pH-Werten im Bereich 3-10 die Adsorption von Arsenat an Eisenoxid zurückgeht, nimmt sie bei Arsenit mit ansteigendem pH-Wert zu mit einem Maximum bei pH 9.

An den Rändern von Tonmineralen kann Arsen ebenfalls sorbiert werden, wobei die Adsorption von Arsenit und Arsenat an Kaolinit stark vom pH-Wert abhängig ist. Sorption an Kaolinit ist bei Arsenat am stärksten im pH-Bereich von 4 bis 6 und nimmt dagegen bei Arsenit beständig zu im pH-Bereich von 4 bis 9. Der Einfluss des pH bezieht sich neben Auswirkungen auf die Spezierung auch auf das Vorhandensein von Sorptionsstellen bei den Tonmineralen. Generell spielt der Kationenaustausch bei Tonmineralen die dominante Rolle, jedoch können Sorptionsstellen für Anionen an freigelegten Kationen oder den Tonmineralrändern auftreten (BOTHE JR. & BROWN 1999, FROST & GRIFFIN 1977, MATERA & LE HECHO 2001, OSCARSON et al. 1980).

Arsenat kann auch an Ettringit gebunden werden (Tabelle 10). In dem für Ettringit typischen pH-Bereich sind die dominanten Arsenatspezies  $\text{HAsO}_4^{2-}$  und  $\text{AsO}_4^{3-}$  (MYNENI et al. 1997, VENHUIS 2001). Sorption von Arsenat an Ettringit in der Form  $\text{AsO}_4^{3-}$  kann nach MYNENI et al. (1998b) an der Oberfläche durch Substitution von  $\text{OH}^-$  bzw. in der Matrix durch Substitution von  $\text{SO}_4^{2-}$  erfolgen.

Sorption von Arsen an Huminstoffen ist ebenfalls möglich, wobei neben dem pH-Wert auch der Gehalt an Huminstoffen eine wichtige Rolle spielt. Bei zunehmend alkalischeren Verhältnissen nimmt mit ansteigender Löslichkeit der Huminstoffe ihre Fähigkeit ab, Arsen zu binden (MATERA & LE HECHO 2001, WAGEMANN 1978).

**Selen** ist ein weiteres Element, das die Bedeutung der Spezierung für das Stoffverhalten aufzeigt. Es kann unter anderem als Selenit ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) oder Selenat ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) auftreten, wobei Selenit unter mäßig oxidierenden Bedingungen vorkommt und weniger löslich ist als Selenat, das bei alkalischen und unter stärker oxidierenden Bedingungen auftritt. Bei niedrigen pH-Werten ist Selen stärker von Sorptionsprozessen betroffen im Vergleich zu hohen pH-Werten, bei denen Desorptionsprozesse wirksam werden können (PEZZAROSSA & PETRUZZELLI 2001).

In Abhängigkeit von der Spezierung können demnach insbesondere bei Metallen Sorptionsprozesse signifikant beeinflusst werden mit entsprechenden Auswirkungen auf Stoffkonzentrationen im Wasser.

#### 2.4.5 Huminstoffe

Huminstoffe sind von gelblicher bis schwarzer Farbe und besitzen nach KOß (1997) die höchste Kationenaustauschkapazität und spezifische Oberfläche natürlich vorkommender Stoffe. Die organischen Substanzen von Huminstoffen werden als refraktäre organische Säuren (ROS) bezeichnet und spielen in natürlichen Systemen eine wichtige Rolle, da bis zu 80 % des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC) auf ROS zurückgeführt werden können. Gelöster organischer Kohlenstoff kann abhängig von den Randbedingungen in aquatischen Systemen Konzentrationen zwischen 0,5 bis 40 mg/l DOC einnehmen (FRIMMEL et al. 2002).

Huminstoffe können unterteilt werden in Humine, Humin- und Fulvinsäuren. Fulvinsäuren sind sowohl unter sauren als auch basischen Bedingungen löslich, wogegen Huminsäuren zwar unter alkalischen Bedingungen ebenfalls löslich sind, jedoch unter sauren Bedingungen ausfallen. Sie tragen in normalen pH-Bereichen von Böden meist negative Ladungen und können somit Kationen sorbieren (KUMKE et al. 1999, FRIMMEL et al. 2002, SAVRIC 2001).

Bei der Bindung von Schwermetallen können Huminstoffe eine bedeutende Rolle spielen.  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  und  $\text{Cu}^{2+}$  weisen eine hohe Bindungsneigung auf, wogegen  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$  eine eher geringer ausgeprägte Bindungsneigung an Huminstoffen besitzen. Selen gehört ebenfalls zu den Schwermetallen, die in Huminstoffen eingebunden oder daran sorbiert werden können (GISI et al. 1997, PEZZAROSSA & PETRUZZELLI 2001). Dementsprechend können Schwermetallkonzentrationen durch das Auftreten von Huminstoffen signifikant beeinflusst werden.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Charakterisierung der Recycling-Materialien

Im Rahmen der Arbeit wurden 19 Recycling-Baustoffe aus 12 Bundesländern untersucht (Tabelle 14). Die meisten dieser Materialien sind für den Einsatz als Frostschutz- und/oder Tragschicht im Straßenbau zugelassen.

Tabelle 14: Die 19 untersuchten RCL-Baustoff-Proben

Bundesland	Probenbezeichnung	Lieferkörnung [mm]	Verwendung	Wasserwirtschaftliche Belange geprüft nach
Nordrhein-Westfalen	RCL 1	0/45	Frostschutzmaterial	Merkblatt des MSV in Verbindung mit "Gemeinsamer Runderlass des Ministeriums für Stadtentwicklung und Verkehr (MSV) und des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (MURL) – Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau", mit Ergänzungen in der Fassung vom 16. Juli 1991
	RCL 2	0/45	Frostschutzmaterial und Schottertragschichten	
Schleswig-Holstein	SH	0/32	Ungebundene Tragschicht/ Frostschutzschicht im Straßenbau	LAGA
Hamburg	HH 1	0/32	Schottertragschicht	LAGA
	HH 2	0/45	Tragschicht ohne Bindemittel (ToB)	
Nordrhein-Westfalen	NW 1	0/45	Frostschutzmaterial und Schottertragschichten	siehe RCL 1 und 2
Rheinland-Pfalz	RP	0/45	Frostschutzzwecke im Straßenbau	LAGA
Saarland	SI	0/45	Tragschichten ohne Bindemittel / Frostschutzschichten	LAGA
Baden-Württemberg	BW 1	0/45	Kombinierte Frost – Tragschicht	Verwaltungsvorschrift des Verkehrsministeriums und des Ministeriums für Umwelt über vorläufige Lieferbedingungen für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau Baden-Württemberg vom 15. November 1991 (+Ergänzungserlasse); VwV wurde am 1. Januar 1999 neu erlassen.
	BW 2	0/45	Verwendung im Straßenbau allgemein (z.B. Dämme, Leitungsgräben), nicht für ungebundene Tragschichten oder Frostschutzschichten	
Brandenburg	Bb 1	0/45	Frostschutz- und Schottertragschichten	LAGA
	Bb 2	0/45	Frostschutzschicht	
Berlin	BI 1	0/32	Frostschutzschicht	Berliner Straßengesetz über Umweltverträglichkeitsprüfungen im Straßenbau vom 22. August 1991 (Perkolationsverfahren: saures u. neutrales Eluat)
	BI 2	0/45	Tragschicht ohne Bindemittel (ToB)	
Sachsen-Anhalt	SA 1	0/32	Oberbauschichten im Straßenbau	Richtlinien zur Verwertung mineralischer Abfälle im Straßenbau, Fassung 1998
	SA 2	0/32	Tragschicht ohne Bindemittel (ToB)	
Hessen	Hs	0/45	Frostschutzmaterial	Erweiterte Lieferbedingungen für im Straßenbau wieder zu verwendende Baustoffe (Ausgabe 11/96)
Sachsen	Sa	0/45	Frostschutzmaterial	keine Angaben
Bayern	By	0/60	Frostschutzmaterial	Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für aufbereiteten Straßenaufbruch und Bauschutt zur Verwendung im Straßenbau in Bayern vom 17. 11. 1992

Alle 19 RCL-Baustoff-Proben wurden nach DIN ISO 11464 bei 40 °C im Trockenschrank bis zur Massenkonzanz getrocknet, danach wurden repräsentative Teilproben mit einem Riffelteiler gemäß Anhang BBODSCHV und DIN 18123 gewonnen. Um die hierfür notwendigen Probemengen zu verwenden, wurde gemäß Anhang BBODSCHV und DIN 18123 verfahren.

Eine **Korngrößenanalyse** aller Materialien erfolgte durch Siebung nach DIN 18123. Zur Feststellung der stofflichen Zusammensetzung wurde eine **optische Untersuchung** der RCL-Materialien vorgenommen. In einer repräsentativen Teilprobe der Körner > 4 mm wurden die unterschiedlichen Stoffgruppen nach Augenschein festgestellt und zugeordnet. In dieser Arbeit stammen Daten hierzu aus SCHÄFER (2002).

Die **Röntgen-Fluoreszenz-Analyse** (RFA) wird zur Ermittlung von „Totalgehalten“ eingesetzt. Hierbei wird die charakteristische Röntgenstrahlung gemessen, die infolge der Entfernung von Elektronen aus inneren Elektronenschalen und der Wiederbesetzung der Leerplätze durch Elektronen aus weiter außen liegenden Schalen auftritt. Es lassen sich mit dieser Analysenart neben Hauptbestandteilen auch Nebenbestandteile bestimmen. Typischerweise werden Festproben untersucht, die als Pulvertabletten oder Glasscheiben vorliegen (OTTO 1995, VOIGT & WIPPERMANN 1998). Die geochemische Charakterisierung der Proben auf Haupt- und Spurenelementanteile erfolgte an Glas- bzw. Pulvertabletten mit einem Röntgen-Fluoreszenz-Spektrometer vom Typ PW 1404 der Fa. Philips. Hierbei wurde das Standardverfahren der Probenaufbereitung und –messung der geochemischen Abteilung des Institutes für Geowissenschaften (Universität Mainz) angewandt.

Für den **Aufschluss mit Königswasser** nach DIN 38414 Teil 7 werden 3 g Probe, die durch Mahlen auf eine Korngröße  $\leq 0,1$  mm gebracht wurden, in ein Reaktionsgefäß eingefüllt, mit wenig deionisiertem Wasser angefeuchtet und nacheinander mit 21 ml Salzsäure und 7 ml Salpetersäure versetzt. In einer Kochvorrichtung wird die Mischung etwa zwei Stunden am Sieden gehalten und der säurelösliche Anteil an Metallen extrahiert. Nach dem Abkühlen wird der Inhalt des Reaktionsgefäßes in einen 100 ml-Messkolben überführt, das Reaktionsgefäß mit verdünnter Salpetersäure nachgespült und der Messkolben bis zur Marke mit deionisiertem Wasser aufgefüllt, verschlossen und geschüttelt. Zum Trennen des ungelösten Anteils von der Lösung erfolgt anschließend eine Membranfiltration. Daten zur Charakterisierung der 19 Recycling-Materialien stammen aus SCHÄFER (2002). Zudem wurden Filterrückstände hinsichtlich ihrer Zusammensetzung per Königswasser-Aufschluss charakterisiert.

Bei der **Röntgen-Diffraktometrie** (XRD) wird sich die Tatsache zunutze gemacht, dass die Beugung von Strahlen im Röntgenbereich für einen bestimmten Strukturtyp bzw. für eine bestimmte kristalline Substanz typisch ist. Die Pulverdiffraktometrie liefert bei der Untersuchung von Feststoffpulvern Informationen über die in der Probe enthaltenen kristallinen Verbindungen, wobei das Röntgen-Diffraktionsmuster einer kristallinen Substanz einzigartig ist (OTTO 1995, SCHWEDT 1996). Im Rahmen dieser Arbeit wurden ebenfalls Messungen von Filtern zur Charakterisierung der darauf befindlichen Rückstände durchgeführt. Die Messung der Proben erfolgte an einem Röntgen-Diffraktometer vom Typ XRD 3000 TT (Fa. Seifert).

**Messungen der Oberfläche** von pulverförmigen Proben erfolgten mit einem Messgerät vom Typ NOVA 1200 der Fa. Quantachrome unter Verwendung von Stickstoff-

Adsorption, bei der Gasmoleküle an der Feststoffoberfläche adsorbiert werden. Grundlage dieser Messmethodik ist die von Brunauer, Emmett und Teller hergeleitete BET-Isotherme (FALBE & REGITZ 1998, KOENSLER 1989). Daten hierzu stammen aus BERNSEE (2003).

### 3.2 Feldversuche

Unter Lysimetern werden nach KLOTZ et al. (2000) Körper poröser Medien verstanden, die ein- oder mehrseitig von Wänden begrenzt und den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt sind. Für die Feldversuche wurden zwei Lysimeter gebaut, bei denen auf eine 0,5 – 0,6 m mächtige Kiesschicht (0 - 32 mm  $\varnothing$  bzw. 2 - 8 mm  $\varnothing$ , gewaschener Kies) eine jeweils 0,5 m mächtige Schicht aus den Recycling-Materialien RCL 1 und RCL 2 aufgebracht und verdichtet wurde. Die Oberflächen beider Becken wurden mit Wellbahnen seitlich begrenzt, wodurch bei einer Beckenoberfläche von jeweils ca. 36 m<sup>2</sup> etwa 18 m<sup>3</sup> RCL-Material pro Becken vorlagen (Abbildung 4 und Abbildung 5). Der Vorteil der seitlichen Abdeckung liegt neben einer genauen Begrenzung der Testfeldoberfläche darin, dass Randeffekte in den Becken vermieden werden können (FRIEGE et al. 1990). Beide Lysimeter bestanden aus zusammengeschweißten Bahnen aus HDPE-Folie, wobei der Beckenboden in Richtung Abfluss geneigt war.

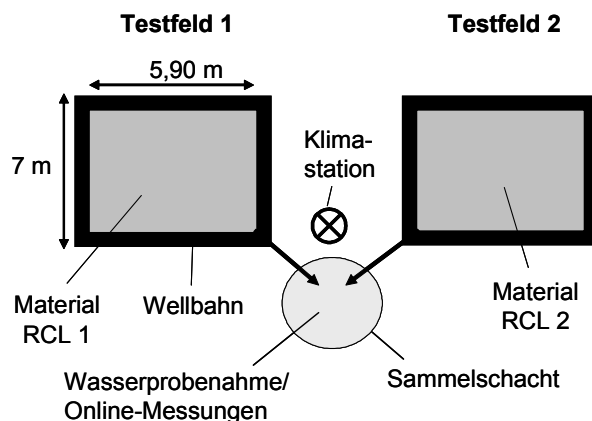


Abbildung 4: Aufsicht der Testfelder

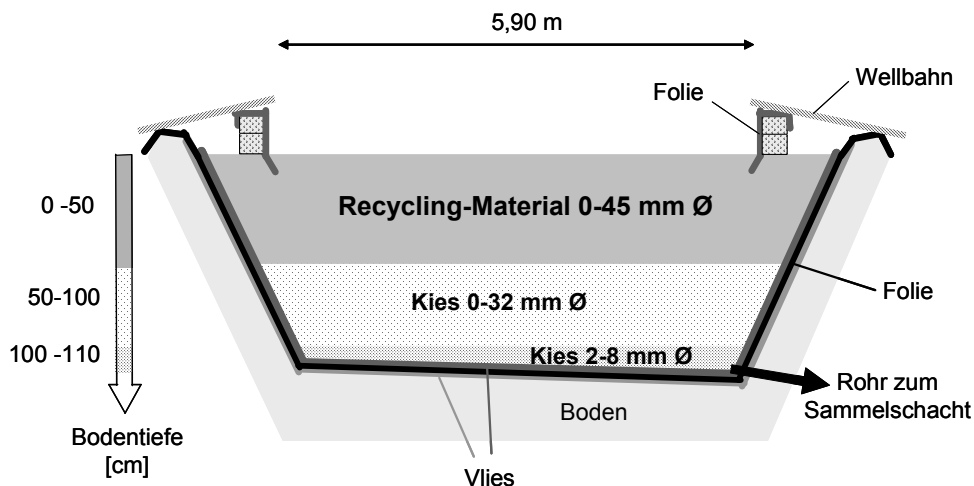


Abbildung 5: Querschnitt durch ein Testfeld

Auf die Testfelder auftreffendes Niederschlagswasser perkolierete durch das RCL-Material und die beiden darunter liegenden Kiesschichten, und wurde am Beckenabfluss über ein HDPE-Rohr in Richtung Sammelschacht weitergeleitet. Dort erfolgten zunächst für jedes Becken Messungen des pH-Wertes, der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Temperatur des Sickerwassers. Danach wurde das Wasser in eine Sammelflasche weitergeführt, aus der in regelmäßigen Abständen Mischwasserproben mit einer programmierten Schlauchpumpe sowie einem automatischen Probennehmer entnommen wurden (Abbildung 6). Anschließend wurde überzähliges Wasser aus den Sammelflaschen beider Becken zur Volumenmessung an Kippzähler weitergeleitet. Die Flaschen mit den Mischwasserproben wurden zur weiteren Analyse im Labor regelmäßig ausgetauscht.

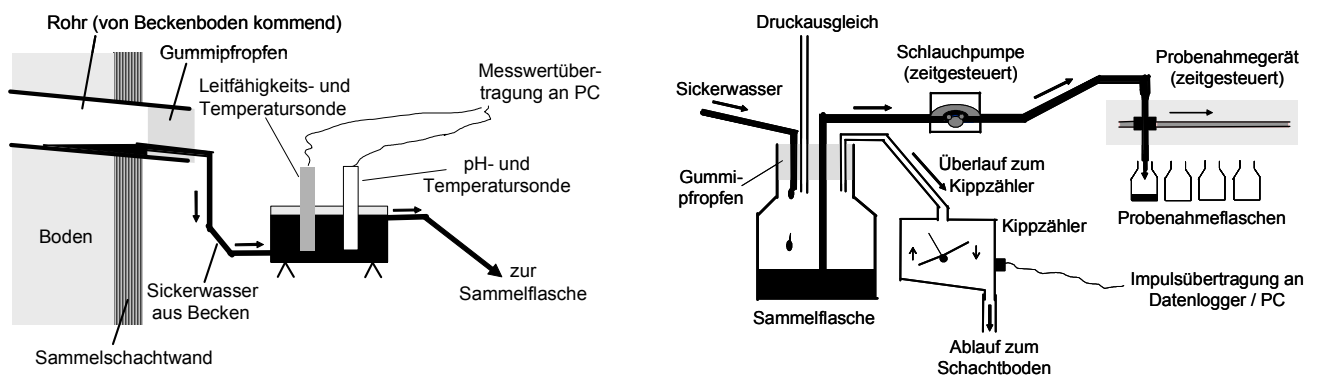


Abbildung 6: links: Messung von pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit und Sickerwassertemperatur  
rechts: Automatische Entnahme von Wasserproben

Zwischen beiden Testfeldern wurde eine Klimastation installiert, um u.a. Parameter wie Niederschlag, Lufttemperatur und –feuchte zu messen. Die Daten wurden in einem Datenlogger gespeichert und regelmäßig ausgelesen. Bei der Klimastation war ebenfalls eine Sammelflasche für Niederschlagswasser installiert (Abbildung 7). Abbildung 8 zeigt Bilder aufgenommen während der Bauarbeiten und den Zustand der Testfelder nach deren Abschluss.

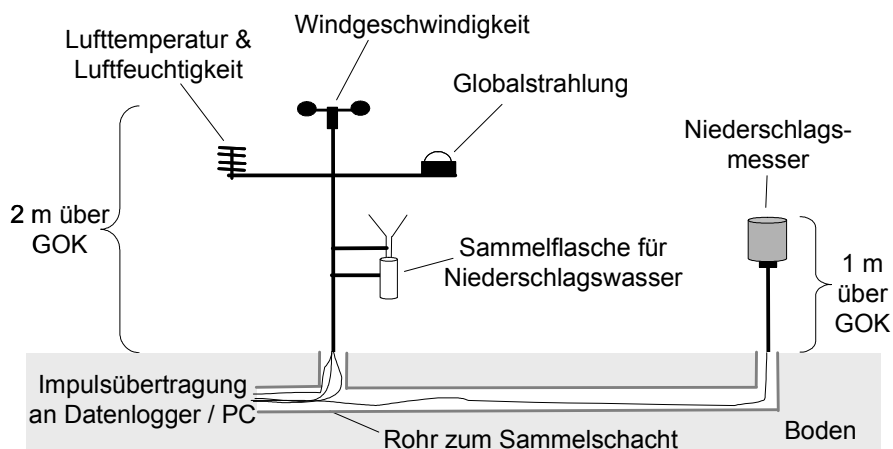


Abbildung 7: Aufbau der Klimastation zwischen beiden Testfeldern

Die RCL-Materialien beider Testfelder wurden bei der güteüberwachenden Stelle des Lieferanten einer Eignungsprüfung unterzogen. Die Einstufung erfolgte nach RAL-RG

501/1 und RG-MIN-STB 93 in Verbindung mit TL RC-TOB 95. Hiernach wurde eines der Materialien eingestuft in Klasse I (ungünstigere Einstufung) und wird in diesem Bericht als „RCL 1“ bezeichnet (Tabelle 14). Grund für die Nichteinstufung in die günstigere Klasse II ist die Überschreitung der Grenzwerte für den Phenolindex und die PAK. Das andere RCL-Material wurde eingestuft in Klasse II (günstigere Einstufung) und wird in diesem Bericht als „RCL 2“ bezeichnet. Nach einem gemeinsamen Runderlass für Nordrhein-Westfalen, aus dem beide Testfeld-Materialien stammen, wurde nach Beginn der Feldversuche neu definiert, dass dem Mineralstoff RCL I die bessere Qualität zugeordnet wird und RCL II die Schlechtere (BRB 2002b). Da die beiden Testfeldmaterialien jedoch bereits vor diesem Runderlass eingestuft wurden, werden im Rahmen dieser Arbeit noch die „alten“ Bezeichnungen verwendet.



Abbildung 8: Aufgenommene Bilder während und nach Abschluss des Baus der Testfelder (oben links: Installation des Sammelschachtes; oben rechts: Verlegung der HDPE-Folie; unten links: Einbau der Kies-Schicht (0-32 mm  $\emptyset$ ); unten rechts: Zustand der Testfelder nach Abschluss der Bauarbeiten)

### 3.3 Laborversuche

Beim **Ammoniumnitrat-Extrakt** nach DIN 19730 wird die trockene Materialprobe, die zunächst auf eine Korngröße  $< 2$  mm zerkleinert wurde, mit Ammoniumnitratlösung im Verhältnis 2:5 in eine Weithalsflasche gegeben. Diese Flasche wird 2 Stunden lang bei Raumtemperatur geschüttelt, und nachdem die Probe anschließend 15 Minuten lang stehen gelassen wurde erfolgt eine Membranfiltration. Für die Herstellung der Extrakte mit den RCL-Materialien wurden jeweils 120 g Probenmaterial  $< 2$  mm mit 300 ml Ammoniumnitratlösung versetzt und auf einem Schwingtisch für 2 Stunden bei 175 Umdrehungen pro Minute bewegt. In dieser Arbeit stammen Daten hierzu aus BERNSEE

(2003).

Beim **S4-Verfahren** (nach DIN 38414 Teil 4) werden 100 g trockenes Probenmaterial mit einer Korngröße  $< 10$  mm in eine Weithalsflasche gegeben. Nach Zugabe von 1000 ml deionisierten Wassers wird die Flasche 24 Stunden lang bei Raumtemperatur geschüttelt, wobei während der Bewegung eine weitere Zerkleinerung des Probenmaterials durch Abrieb vermieden werden soll. Nach Ablauf der Elutionsdauer wird der ungelöste Rückstand durch Filtrieren abgetrennt. Um aus den gelieferten RCL-Baustoff-Proben die benötigte Körnung  $< 10$  mm herzustellen, wurde von repräsentativen Teilproben zunächst der Anteil  $< 10$  mm abgesiebt. Der Anteil  $> 10$  mm wurde mit Hilfe von Backenbrechern herunter gebrochen, wobei zwischen den einzelnen Brechvorgängen mehrere Absiebungen der Anteile  $< 10$  mm stattfanden, um die durch das Brechen erzeugte Feinfraktion so gering wie möglich zu halten. Die Proben wurden mit einem Überkopfschüttler bewegt, der auf 5 Umdrehungen pro Minute eingestellt wurde.

Beim **Modifizierten S4-Verfahren** (nach TP MIN-STB Teil 7.1.1, FGSV 1999) liegen die Änderungen zum S4-Verfahren in der maximal einzusetzenden Korngröße und der Probenmenge, die sich in Abhängigkeit des in der Probe enthaltenen Größtkorns ergibt. Sowohl das Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 als auch die Elutionsdauer von 24 Stunden werden beibehalten. Nach der Verfahrensanweisung ist bei Lieferkörnungen  $> 32$  mm der Anteil an Körnern  $> 32$  mm abzutrennen, schonend zu brechen, daraus die Körnung 16 - 32 mm herzustellen und diese dem Gemisch 0 - 32 mm in dem Massenanteil zuzufügen, in dem der Anteil  $> 32$  mm in der Lieferkörnung vorlag. Durch die Herstellung der Körnung 16 - 32 mm wird sichergestellt, dass der beim Brechen entstehende Feinanteil nicht der zu eluierenden Probe zugefügt wird bzw. die künstlich erzeugten Reaktionsflächen möglichst gering gehalten werden. Bei einem Größtkorn von 22,4 mm sollen 2500 g Probenmaterial eluiert werden, was bei allen 19 RCL-Baustoffen der Fall war (Tabelle 14). Zur Einhaltung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses von 10:1 müssen somit 25 Liter deionisiertes Wasser zugefügt werden. Die Elution fand in einer fest verschließbaren 30 Liter PE-Tonne statt, wobei die Tonne liegend auf einem Schwingtisch bewegt wurde mit 75 - 80 Schwingungen pro Minute.

Hinsichtlich der Versuchsabläufe beim **S4- und Modifizierten S4-Verfahren** wurden geringfügige Modifikationen vorgenommen, die sich aus der geänderten Probenahmefrequenz ergaben. Beim S4-Verfahren wurden pro RCL-Material mehrere Weithalsflaschen mit Probenmaterial  $< 10$  mm und deionisiertem Wasser eingesetzt. Diese Vorgehensweise erlaubte Eluatentnahmen nach 1, 2, 4, 8, 24 und 48 Stunden. Bei den beiden Testfeldmaterialien RCL 1 und 2 wurden zusätzlich weitere Proben nach 72, 120 und 192 Stunden entnommen. Dieselbe Probenahmefrequenz wurde beim Modifizierten S4-Verfahren angewandt. Dafür wurden bei jeder Probenahme ca. 80 - 100 ml Eluat aus der Tonne entnommen. Mit Ausnahme der Werte zu den Spurenelementen stammen Daten hierzu aus SCHÄFER (2002).

Die **pH-stat Versuche** erfolgten in Anlehnung an OBERMANN & CREMER (1992). Hierfür wurde Material in Pulverform verwendet, da nach HIRSCHMANN & FÖRSTNER (2000a) Langzeitabschätzungen zur Schwermetallfreisetzung aus Ergebnissen von Kurzzeittests bei Materialien mit einem Säurepuffer nur anhand von zerkleinertem Material erfolgen sollten. Es wurden zunächst 40 g fein gemahlene RCL-Material in eine Flasche gegeben und mit 400 ml deionisiertem Wasser versetzt, womit das Wasser/Feststoff-Verhältnis bei 10:1 lag. Anschließend wurde in die Probe Salpetersäure

(65%-ige  $\text{HNO}_3$  p.a.) bis zu einem pH-Wert von 4 titriert. Die RCL-Material-Proben wurden über einen Zeitraum von 4 Wochen auf einem Schwingtisch bei 175 Umdrehungen pro Minute bewegt. Es wurde ein so langer Versuchszeitraum gewählt, da es nach PASCHKE et al. (1999) fraglich ist, ob eine 24-stündige Versuchsdurchführung ausreicht für die Langzeitabschätzung zur Schwermetallfreisetzung. Mehrmals am Tag wurde der pH-Wert gemessen und gegebenenfalls Salpetersäure in die Probe titriert, bis sich wieder ein pH-Wert von 4 eingestellt hatte. Die pH-stat Versuche bei pH 4 wurden bei allen 19 RCL-Materialien durchgeführt. Zusätzlich erfolgten mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 pH-stat Versuche bei pH 2, 6 und 8. Hierbei wurden die Proben ebenfalls 4 Wochen auf einem Schwingtisch bewegt und der jeweilige pH-Wert mit Salpetersäure eingestellt. Für die Verwendung von Salpetersäure im Vergleich zu Salzsäure sprach, dass Salzsäure auf die Analyse von Arsen und Chrom störend einwirken kann (FÄLLMAN 1997). Daten zu den pH-stat Versuchen stammen aus BERNSEE (2003).

Für die **Säulenversuche** wurden vier jeweils ca. 30 cm lange PVC-Rohre verwendet, die an einem Ende eine Fußplatte mit vier Füßen besaßen. Der Durchmesser der Säulen betrug 20 cm. Der Säulenauslauf war mit einem Y-Stück verbunden, an dem einerseits Luft entweichen konnte und andererseits der Schlauch befestigt war, der zu den Probensammelbehältern führte (Abbildung 9).

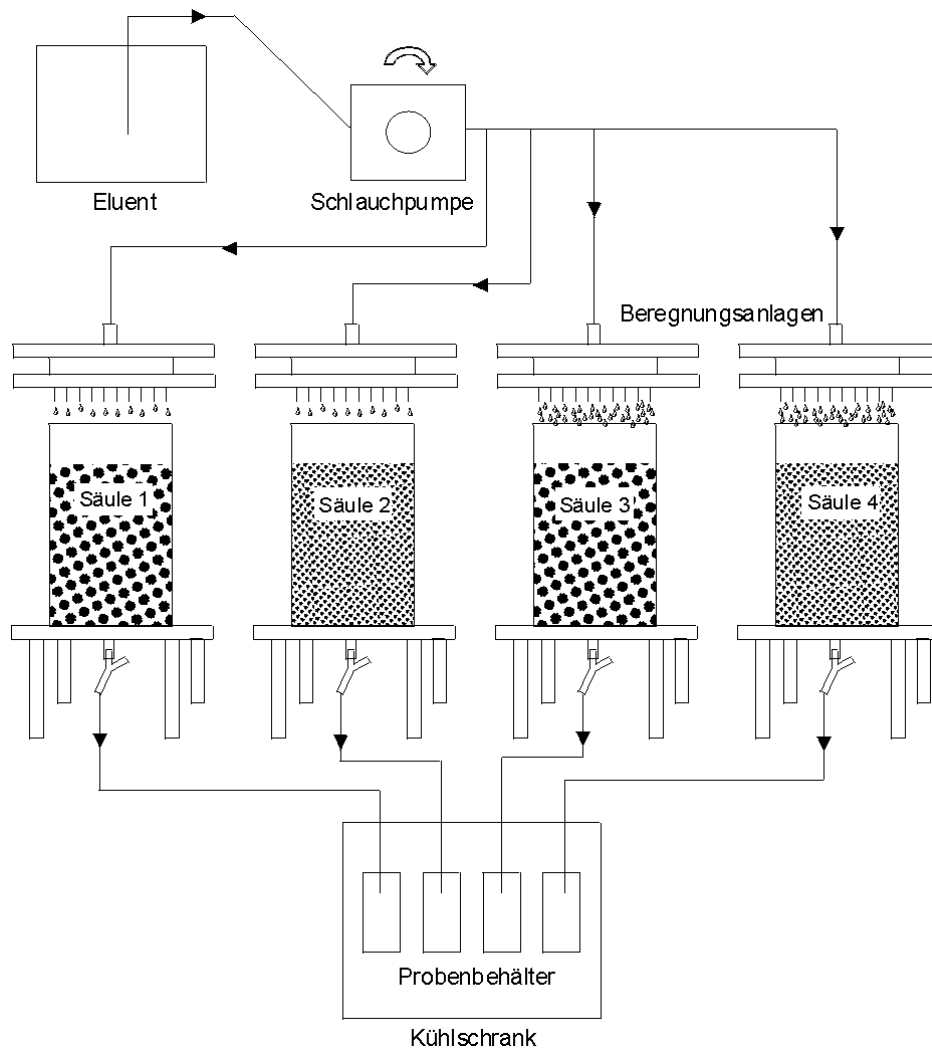


Abbildung 9: Schematischer Aufbau der Säulenversuchsanlage (SCHUWIRTH 2002)

Um die Bildung bevorzugter Fließwege an der Säulenwand zu vermindern, wurden die Rohrrinnenwände mit Tangitkleber bestrichen und mit Quarzsand bestreut. Am Säulenboden wurde ein feinmaschiges Netz sowie eine ca. 2 cm mächtige Schicht aus Filterkies (2 - 8 mm  $\varnothing$ ) eingebaut, um eine Ausschwemmung von Säulenmaterial zu verhindern. Darüber befand sich das RCL-Material mit einer Mächtigkeit von etwa 20 cm, was einer Masse von ca. 9 Kilogramm entsprach (Tabelle 15). Die Säulenversuche wurden mit dem Testfeld-Material RCL 1 durchgeführt, wobei in zwei Säulen das Material in Originalkorngröße (0 - 45 mm  $\varnothing$ ) eingebaut wurde. Die anderen beiden Säulen wurden mit dem gleichen Material befüllt, welches jedoch zuvor auf eine Körnung 0 - 10 mm herunter gebrochen wurde.

Tabelle 15: Daten zu den Säulenversuchen mit Material RCL 1

	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
Berechnungsrate [mm/a]	800	800	8560	8560
Korngröße [mm]	0-45	0-10	0-45	0-10
Probeneinwaage [g]	8903	8631	8903	8631
Mächtigkeit RCL-Material [cm]	19,8	20,0	19,9	20,1
Filterkieshöhe [cm]	2,0	2,0	2,1	2,0

Die Berechnungsanlage bestand aus zwei Platten, die durch einen Kunststoffring getrennt waren. In die untere Platte wurden Kanülen mit einem Durchmesser von 0,4 mm eingebaut, über die das RCL-Material in der Säule mit dem Elutionsmittel in feinen Tröpfchen beregnet wurde. Die Versuche fanden unter wasserungesättigten Bedingungen statt, d.h. es handelte sich um ein offenes System, da die Versuche in Kontakt mit der Außenluft stattfanden. Die Beregnung der Säulen erfolgte in zweistündigen Intervallen für jeweils 4 Minuten. Zwei der Säulen wurden mit einer Rate beregnet, die den bei den Testfeldern gemessenen durchschnittlichen Niederschlagswerten entsprach. Die anderen beiden Säulen wurden mit einer hierzu um das Zehnfache erhöhten Rate beregnet. Als Elutionsmittel wurde deionisiertes Wasser mit konzentrierter Salzsäure (32 % p.a.) auf einen pH-Wert von 4 angesäuert. Nachdem das Wasser durch das RCL-Material perkoliert war, wurde es in einem Probensammelbehälter aufgefangen. Mit Ausnahme der Werte zu den Spurenelementen stammen Daten hierzu aus SCHUWIRTH (2002).

An **weiteren Laborversuchen** wurden im Rahmen dieser Arbeit Schüttelversuche bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 durchgeführt. Hierfür wurde das fein gemahlene Material in eine Weithalsflasche gegeben und deionisiertes Wasser entsprechend der Wasser/Feststoff-Verhältnisse 2:1, 4:1, 10:1, 20:1, 100:1, 200:1 und 300:1 dazu gegeben. Die Proben wurden über einen Zeitraum von 192 Stunden mit einem Überkopfschüttler bei 5 Umdrehungen pro Minute bewegt.

Des Weiteren wurde ein Langzeit-Standtest mit den Materialien RCL 1 und 2 in Originalkorngröße (0 - 45 mm  $\varnothing$ ) vorgenommen. Hierfür wurden jeweils 13 kg von beiden Materialien mit 3 Litern deionisiertem Wasser in 10 Liter Eimer gegeben, die für 70 Tage verschlossen in einem Kühlschrank bei durchschnittlich 9,5 °C lagerten. Die Vor-

gehensweise erfolgte in Anlehnung an den Bodensättigungsextrakt (DIN V 19735), bei dem zu einer Bodenprobe nur soviel deionisiertes Wasser zugegeben wird, bis sie vollständig durchfeuchtet ist. Bei dieser Methode wird die Probe anschließend unter Verdunstungsschutz in den Kühlschrank gestellt, die Elutionsdauer beträgt insgesamt 48 Stunden.

Vergleichbar zur Durchführung des S4-Verfahrens wurden mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 weitere Schüttelversuche durchgeführt, bei denen Proben nach 1, 4, 8, 24, 48 und 192 Stunden entnommen wurden. Neben der modifizierten Versuchslaufzeit unterschied sich die Vorgehensweise zur DIN 38414 Teil 4 insofern, dass Materialien in fein gemahlener Form und nicht < 10 mm Korngröße verwendet wurden. Das Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 wurde beibehalten. Die Bewegung der Proben erfolgte mit einem Überkopfschüttler bei 5 Umdrehungen pro Minute. Nach demselben Muster, allerdings nur mit einer Probennahme nach 192 Stunden, wurden identifizierte Einzelkomponenten aus Material RCL 1 untersucht. Die Schüttelversuche wurden wiederum mit den fein gemahlenden Einzelkomponenten vorgenommen.

Es wurde ebenfalls ein Versuch durchgeführt, um die mögliche Quelle zur Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen aus den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 identifizieren zu können. Hierfür wurden 40 g der Einzelkomponente Asphalt (< 10 mm) mit 50 ml deionisiertem Wasser in ein Becherglas gegeben. Über einen Zeitraum von 2 Monaten wurde regelmäßig der pH-Wert gegebenenfalls mit NaOH eingestellt, was in Anlehnung an die Freilandversuche auf einen Wert von etwa 10 erfolgte.

### **3.4 Analytik**

Als Behälter, die für die Probenanalyse bei den Feld- und Laborversuchen eingesetzt wurden, kamen PE-Flaschen zum Einsatz. Diese wurden zunächst mit Salpetersäure konditioniert und mit deionisiertem Wasser gründlich gespült, bevor die Proben nach erfolgter Membranfiltration darin abgefüllt wurden. Die Proben für die Kationenanalyse aus den Hauptelementen und die Untersuchung auf Schwer-, Leicht- und Halbmetalle wurden mit Salpetersäure (1% des Probevolumens, 65% HNO<sub>3</sub> p.a.) stabilisiert. Alle Proben wurden bis zur Analyse dunkel und kühl aufbewahrt.

Bei der bewährten Vorgehensweise mit Membranfiltration und Konservierung der Probe mit Salpetersäure vor der eigentlichen Analyse muss beachtet werden, dass der abfiltrierte Anteil beträchtliche Substanzmengen beinhalten kann (GOETZ & GERWINSKI 1989, UBA 1999). Nach FRIEGE et al. (1990) muss bei stückigen Materialien wie Bauschutt ein partikelgebundener Stoffaustrag berücksichtigt werden, zumal es bei der Deponierung von Abfällen keinen der Membranfiltration vergleichbaren Effekt gibt. Ausführungen hierzu erfolgen in Abschnitt 4.2.8.

An den unfiltrierten Proben aus den Feld- und Säulenversuchen wurde die Trübung als Maß für den Feststoffgehalt mit einem Trübungsphotometer vom Typ Nephla LPG 239 (Fa. Dr. Lange) bestimmt. Die Messergebnisse werden in FNU (formacin nephelometric units) angegeben, wobei der Messbereich zwischen 0,001 – 1000 FNU liegt.

Die Messung von pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur erfolgte mit Geräten der Firma WTW (Typ MultiLine P4, Typ LF 196, Typ pH 340). Bei der pH-Wert Messung im alkalischen Bereich wurde eine Elektrode des Typs H61 der Fa. Schott benutzt.

### 3.4.1 Hauptelemente (Anionen und Kationen)

Die Hauptanionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat) und –kationen (Natrium, Kalium, Lithium, Calcium, Magnesium) der Proben aus den Feld- und Laborversuchen wurden im hydrochemischen Labor des Instituts für Geowissenschaften, Universität Mainz, gemessen. Die Ermittlung der Säurekapazität zur Bestimmung der anorganischen Kohlenstoffspezies erfolgte sowohl bei den Proben im Labor als auch bei den Feldversuchen vor Ort. Hierzu wurde mit 0,1 molarer Salzsäure bis pH 8,2 (p-Wert) und pH 4,3 (m-Wert) titriert. Außerdem wurde bei den Feldversuchen regelmäßig Nitrat vor Ort bestimmt. Die Analysenverfahren und Bestimmungsgrenzen sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Analysenverfahren zur Bestimmung der Hauptelemente bei Feld- und Laborversuchen

Parameter	Analysenverfahren	Gerät	Bestimmungsgrenze [mg/l]
<b>Laboranalysen</b>			
Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Li <sup>+</sup> Ca <sup>2+</sup>	Flammenphotometrie	ELEX 6361, Fa. Eppendorf	1,7 0,3 0,05 0,2
Cl <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ionenchromatographie	HPLC mit Suppres- sorsäule Waters 712 WISP, Fa. Millipore	3,2 2,2 3,8
Mg <sup>2+</sup>	Flammen- Atomabsorptions- spektrometrie	Unicam 989, Fa. Solar	0,004
OH <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	m- und p-Wert Titration	pH-Elektrode Typ H61, Fa. Schott	
<b>Feldanalysen</b>			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Photometrie	Spectroquant SQ 118, Fa. Merck	1,0
OH <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	m- und p-Wert Titration	pH-Elektrode Typ H61, Fa. Schott	

Für die Plausibilitätskontrolle ermittelte Ionenbilanzen zu den gemessenen Hauptelementkonzentrationen bei den Feld- und Laborversuchen werden in Kapitel 4 aufgeführt. Der Fehler zur Ionenbilanz wurde dabei nach Gleichung 4 berechnet mit Kationen und Anionen in der Einheit [meq/l] (HÖLTING 1992).

$$\text{Gleichung 4} \quad \text{Fehler [\%]} = \frac{(\text{Summe Kationen} - \text{Summe Anionen})}{0,5 \cdot (\text{Summe Kationen} + \text{Summe Anionen})} \cdot 100$$

### 3.4.2 Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)

Die Bestimmung der Gehalte an Schwer-, Leicht- und Halbmetallen erfolgte durch ein Fremdlabor. Als Analysenverfahren kamen sowohl ICP-MS als auch ICP-OES zum Einsatz (Tabelle 17).

Tabelle 17: Analysenverfahren zur Bestimmung der Spurenelemente bei Feld- und Laborversuchen

Parameter	Analysenverfahren	Bestimmungsgrenze
		<b>[µg/l]</b>
Sb	ICP-MS	0,5
As		0,5
Pb		0,5
Cd		0,5
Cr		1,5
Co		0,5
Cu		1,0
Mn		0,5
Mo		0,5
Ni		1,0
Se		5
Sn		0,5
		<b>[mg/l]</b>
Al	ICP-OES	0,04
Fe		0,03
Si		0,1
Zn		0,03

### 3.5 Ermittlung von Massenanteilen

Die aus den Extraktions- und Elutionsverfahren sowie Feldversuchen ermittelten Konzentrationen wurden in Massenanteile umgerechnet.

Dabei wurde der Massenanteil eines extrahierten bzw. eluierten Stoffes aus dem Königswasserextrakt, dem Ammoniumnitrat-Extrakt, dem S4-Verfahren sowie dem Modifizierten S4-Verfahren nach Gleichung 5 berechnet:

Gleichung 5 
$$w = \frac{c \cdot V}{m}$$

w: Massenanteil des extrahierten bzw. eluierten Stoffes, bezogen auf die Trockenmasse [mg/kg]

c: Konzentration des Stoffes im Extrakt bzw. Eluat [mg/l]

V: Volumen des Extraktions- bzw. Elutionsmittels [l]

m: Trockenmasse der eingesetzten Probe [kg]

Der Massenanteil aus dem pH-stat Verfahren wurde nach Gleichung 6 berechnet:

$$\text{Gleichung 6} \quad w = \frac{c \cdot (V_a + V_b)}{m}$$

w: Massenanteil des eluierten Stoffes, bezogen auf die Trockenmasse [mg/kg]

c: Konzentration des Stoffes im Eluat [mg/l]

V<sub>a</sub>: Volumen des Elutionsmittels zu Versuchsbeginn [l]

V<sub>b</sub>: Volumen der zugegebenen Säure [l]

m: Trockenmasse der eingesetzten Probe [kg]

Der Massenanteil aus den Feld- und Säulenversuchen wurde nach Gleichung 7 berechnet:

$$\text{Gleichung 7} \quad w_i = \frac{c_i \cdot V_i}{m}$$

w<sub>i</sub>: Massenanteil des eluierten Stoffes für Tag i, bezogen auf die Trockenmasse [mg/kg]

c<sub>i</sub>: Durchschnittliche Konzentration des Stoffes im Eluat für Tag i [mg/l]

V<sub>i</sub>: Aufsummiertes Volumen des Abflusses aus den Lysimetern bzw. Säulen für Tag i [l]

m: Trockenmasse der Materialien in den Lysimetern bzw. Säulen [kg]

Ermittelte Konzentrationen und Massenanteile w<sub>i</sub> (Gleichung 7) aus den Feld- und Säulenversuchen können gut miteinander verglichen werden, wenn sie auf das gleiche Wasser/Feststoff-Verhältnis bezogen werden. Dies kann nach Gleichung 8 für Feld- und Säulenversuche berechnet werden:

$$\text{Gleichung 8} \quad WF_i = \frac{V_i}{m}$$

WF<sub>i</sub>: Wasser/Feststoff-Verhältnis bis zum Zeitpunkt i [l/kg]

V<sub>i</sub>: Aufsummiertes Volumen des Abflusses aus Lysimetern bzw. Säulen bis zum Zeitpunkt i [l]

m: Trockenmasse der Materialien in den Lysimetern bzw. Säulen [kg]

Bei dieser Betrachtungsweise ist das Wasser/Feststoff-Verhältnis somit kein fester Wert, sondern bezieht sich vielmehr auf die aufsummierte, auf den Feststoff bezogene perkolierte Wassermenge.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Charakterisierung der Recycling-Materialien

#### 4.1.1 Siebanalysen

Die untersuchten RCL-Materialien lagen in den Lieferkörnungen 0 - 32 mm (5 Materialien), 0 - 45 mm (13 Materialien) und 0 - 60 mm (1 Material) vor.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Siebanalysen der RCL-Materialien mit Körnungen 0 - 32 mm dargestellt (zur Bedeutung der Abkürzungen für die Probenbezeichnung siehe Tabelle 14). Anhand der Kurvenverläufe ist zu erkennen, dass die Materialien (mit Ausnahme der Probe SA 2) bei einer Korngröße von  $> 10$  mm eine ähnliche Korngrößenverteilung aufweisen. Die Kornsummenkurven im Körnungsbereich 0,125 – 10 mm zeigen dagegen eine deutliche Streuung. Steine, also Körner  $> 63$  mm, sind in keiner der Proben vertreten, die Anteile an Kies (2 – 63 mm) liegen etwa zwischen 55 bis 77 %. Die Gehalte an Sand (0,063 – 2 mm) erstrecken sich zwischen 22 - 44 %, Körner  $< 0,063$  mm haben einen Anteil von etwa 1 – 3 %.

Die Sieblinien der RCL-Baustoffe, die eine Lieferkörnung von 0 - 45 mm haben sowie die der Probe By (Körnung von 0 - 60 mm) sind in Abbildung 11 dargestellt. Steine sind nur in der Probe By mit ca. 5 % vorhanden. Die Anteile an Kies liegen zwischen 66 – 92 %, die an Sand zwischen 8 – 33 %. Körner  $< 0,063$  mm sind mit weniger als 1 % vertreten.

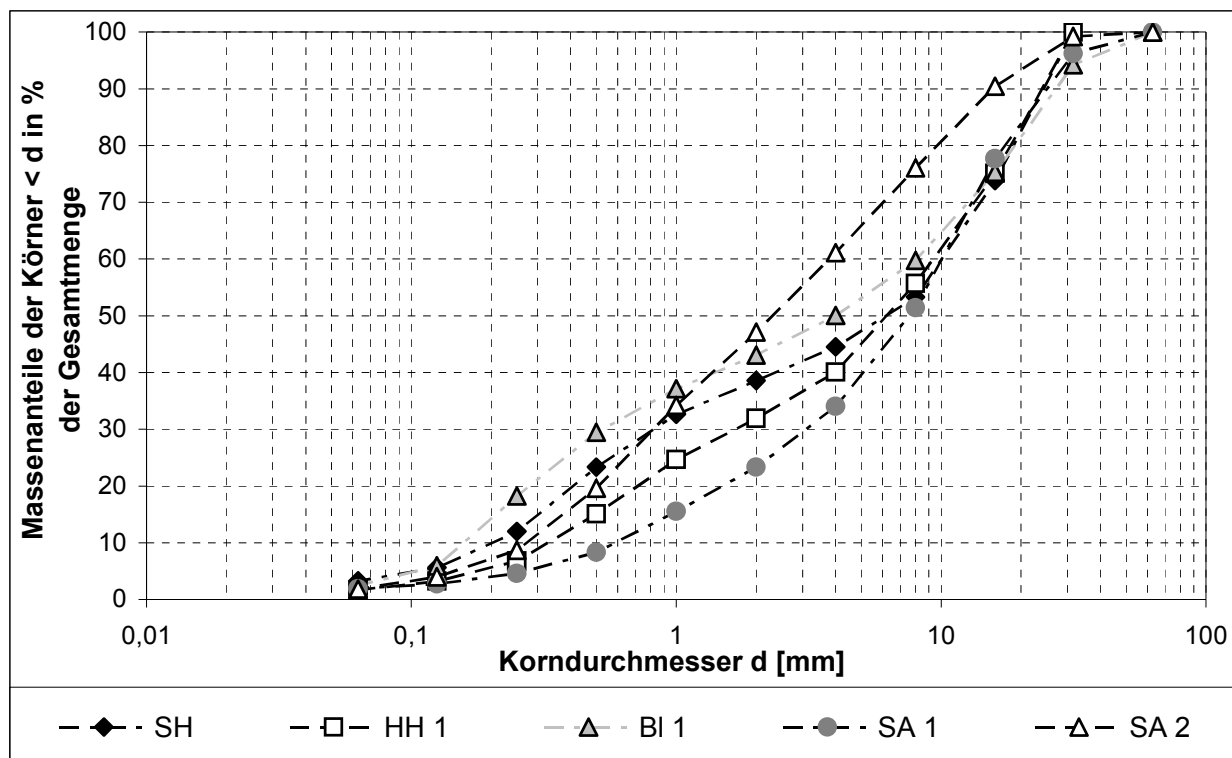


Abbildung 10: Kornsummenkurven der Recycling-Baustoffe mit Körnungen 0 - 32 mm

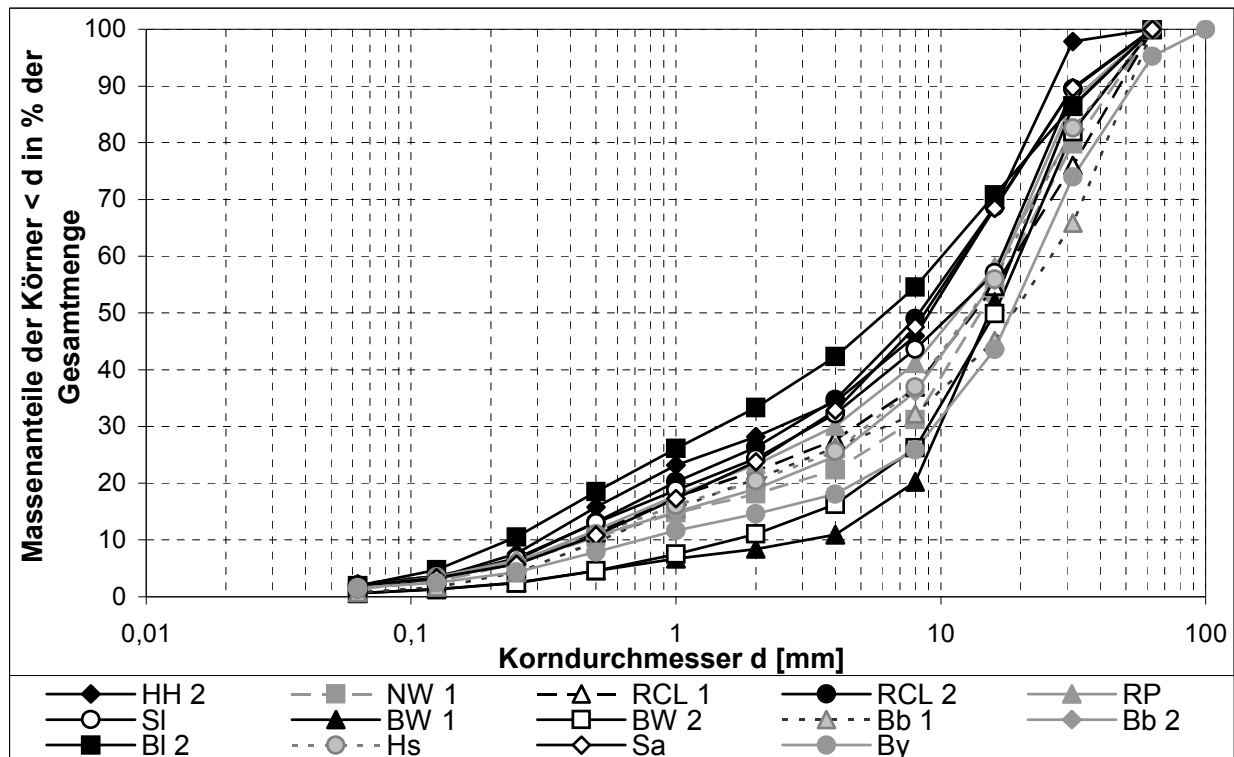


Abbildung 11: Kornsummenkurven der Recycling-Baustoffe mit Körnungen 0 - 45 mm und 0 - 60 mm (By)

#### 4.1.2 Stoffliche Zusammensetzung

Zur Charakterisierung der stofflichen Zusammensetzung der 19 Recycling-Materialien wurde einerseits eine optische Untersuchung an der Universität Mainz durchgeführt (SCHÄFER 2002). Zum anderen standen Prüfberichte der Lieferanten zur Verfügung. Nach der optischen Untersuchung bestehen die meisten der 19 RCL-Baustoffe zum überwiegenden Teil aus Betonbruch (Abbildung 12). Ausnahmen hiervon bilden die Proben BW 2 und Bb 2, die sich hauptsächlich aus Mauerwerks- und Ziegelschotter zusammensetzen und deren Gehalte an Betonbruch relativ gering sind. Bei den restlichen 17 Materialien variiert der Betonanteil zwischen 33 und 93 %. Naturstein ist die andere Stoffgruppe, die in sämtlichen Proben vertreten ist. Alle weiteren Stoffgruppen (Ziegel, Asphalt etc.) sind nicht in jeder Materialprobe enthalten. Nach den Prüfberichten liegt der Anteil an Betonbruch etwas niedriger als nach der optischen Untersuchung. Im Vergleich kommt in Probe Bb 2 weder Betonbruch vor noch ein Anteil aus der Stoffgruppe Klinker, Ziegel, Mauerwerk. Der Gehalt an Asphalt in den Materialien fällt nach den Prüfberichten zum überwiegenden Teil etwas höher aus. In Probe BW 1 ist im Vergleich zur optischen Untersuchung Schlacke enthalten. Ein deutlich höherer Anteil aus der Stoffgruppe Kalksandstein, Putze tritt nach den Prüfberichten in den Proben HH 2 und Bb 2 auf.

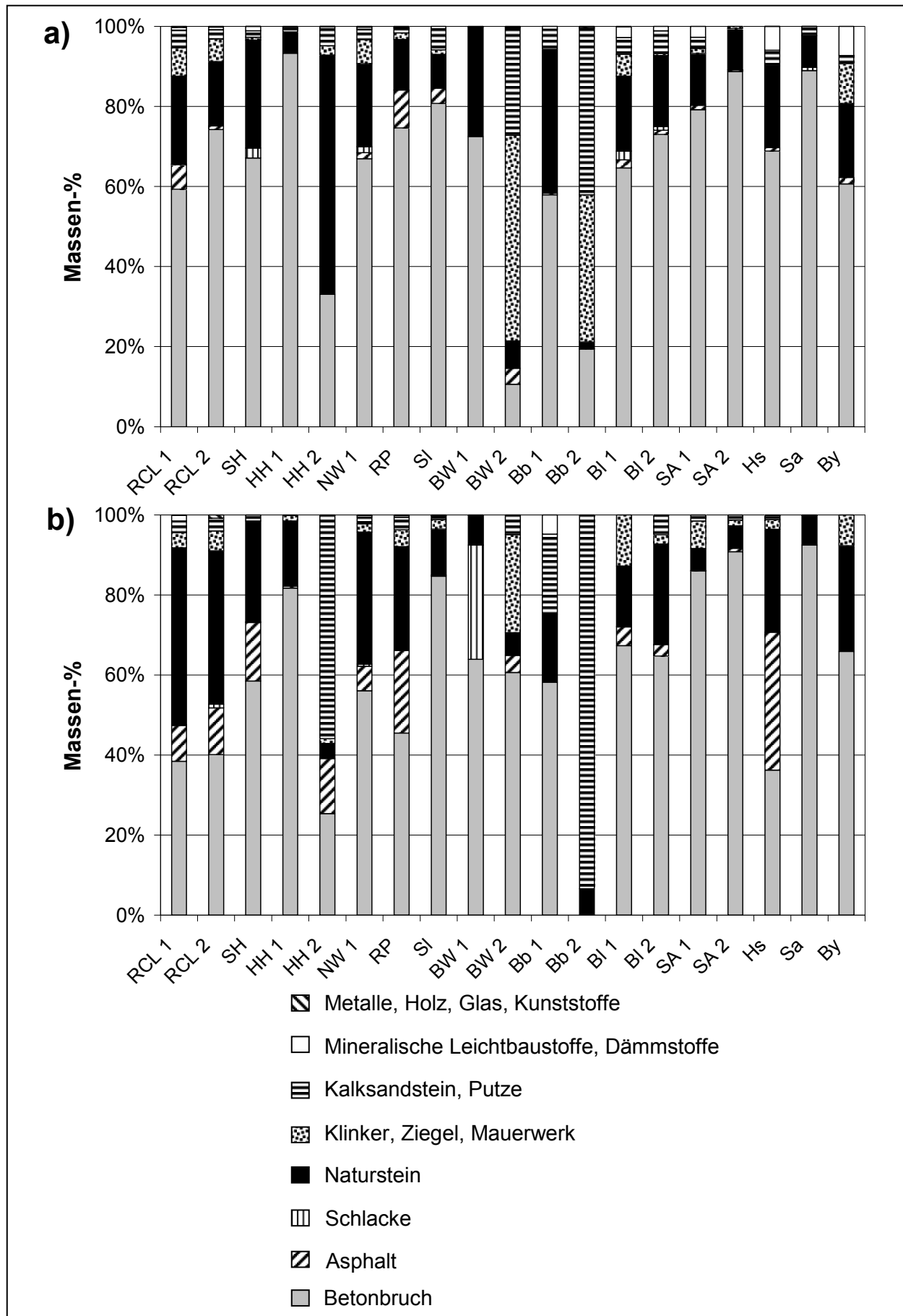


Abbildung 12: Prozentuale Anteile der einzelnen Stoffgruppen in den Recycling-Baustoffen: a) optische Untersuchung nach SCHÄFER (2002), b) Zusammensetzung nach Prüfberichten

### 4.1.3 Röntgen-Fluoreszenz-Analyse

Röntgen-Fluoreszenz-Analysen von den 19 RCL-Materialien ergaben, dass von den Hauptelementen im Wesentlichen Silicium, Calcium und Aluminium vorhanden sind. In Probe By haben Magnesium und Calcium jeweils die höchsten Anteile im Vergleich aller Baustoffe. Mangan kommt in den Materialien in vergleichsweise geringen Gehalten vor, erhöhte Werte haben die Proben SI und BW 2. Von den betrachteten Spurenelementen treten im Wesentlichen Kobalt, Zink und Chrom auf (Abbildung 13). Beim Vergleich aller Materialien stechen ein hoher Zink-Anteil bei Probe Bb1, hohe Anteile an Blei und Zinn in Probe BI 1 und ein hoher Arsen-Anteil bei Probe BW 2 hervor.

Bei den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 fallen verhältnismäßig hohe Anteile an Chrom, Eisen und Nickel auf. Ein Vergleich beider Materialien untereinander zeigt für Kobalt einen deutlich höheren Anteil bei RCL 1 als bei RCL 2, bei Zink verhält sich dies umgekehrt. Ansonsten liegen die Werte beider Materialien relativ nahe beieinander.

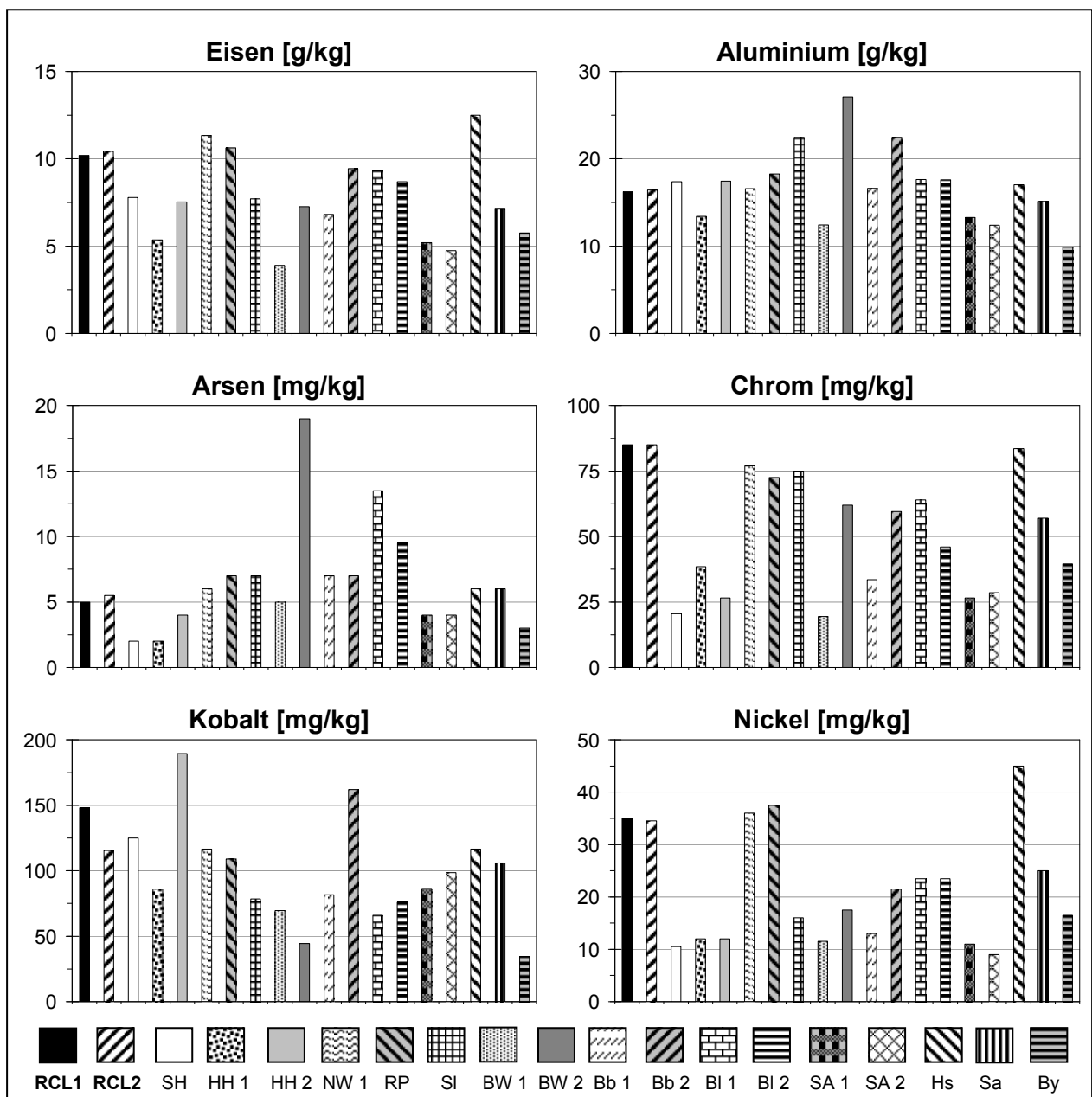


Abbildung 13: Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für die 19 Recycling-Materialien

Es wurden ebenfalls Röntgen-Fluoreszenz-Analysen an identifizierten Einzelkomponenten aus Testfeld-Material RCL 1 vorgenommen (Abbildung 14). Betonbruch wurde anhand der unterschiedlichen Zuschlagstoffe untergliedert in drei Stoffgruppen. Bei Beton mit gebrochenem Zuschlagstoff sind im Vergleich hohe Anteile an Eisen, Magnesium, Chrom und Nickel festzustellen. In der Komponente Ziegel kommen vergleichsweise hohe Werte bei Aluminium, Kalium sowie Arsen vor. Bei Asphalt stechen höhere Anteile an Chrom, Nickel, Kupfer und Antimon hervor, wobei Antimon nur vereinzelt bei den identifizierten Komponenten auftritt. In der Stoffgruppe Kacheln, Glas und Fliesen treten höhere Werte bei Aluminium, Natrium, Zink, Blei und Zinn auf. Unter den Natursteinen fallen bei den Vulkaniten vergleichsweise hohe Anteile an Aluminium, Magnesium, Calcium sowie Antimon auf. Mangan tritt bei den Hauptelementen in geringen Gehalten auf und hat im Vergleich lediglich bei den Vulkaniten einen erhöhten Anteil. Bei Betrachtung aller identifizierten Einzelkomponenten fallen bei den sonstigen Natursteinen, die zusammengefasst wurden, höhere Anteile an Eisen, Magnesium, Chrom, Nickel und Kupfer auf.

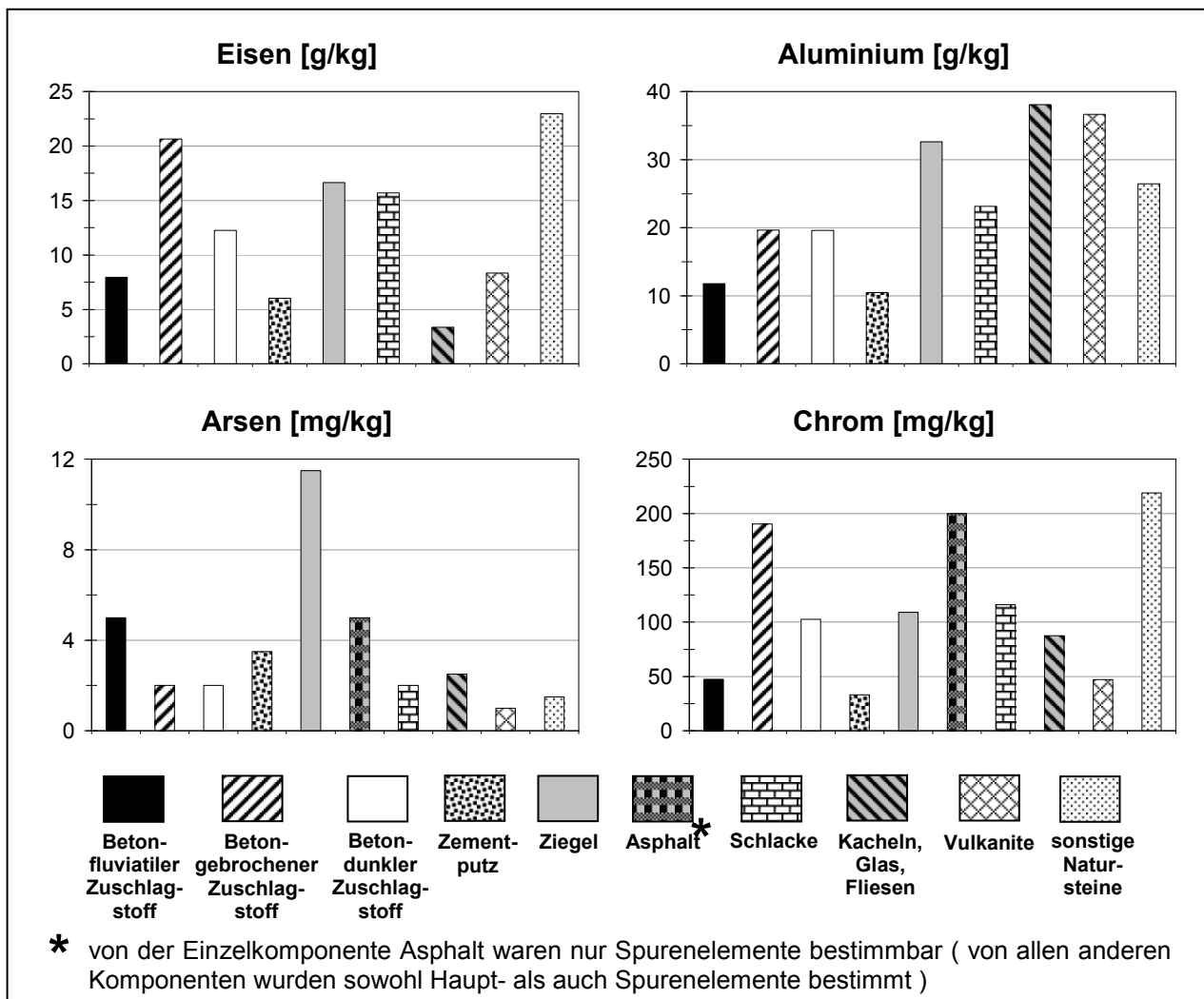


Abbildung 14: Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für identifizierte Einzelkomponenten aus Material RCL 1

#### 4.1.4 Aufschluss mit Königswasser

Die Absolutgehalte der durch Aufschluss mit Königswasser extrahierten Stoffe aus den 19 RCL-Materialien sind für einige Elemente in Abbildung 15 dargestellt, wobei sich größtenteils sehr unterschiedliche Werte in den Proben ergeben. Bei Eisen liegen beispielsweise die Werte zwischen 6789 mg/kg (BW 1) und 20476 mg/kg (Hs), bei Aluminium zwischen 6980 mg/kg (SH) und 22535 mg/kg (SI) und bei Zink zwischen 17 mg/kg (BW 1) und 2227 mg/kg (Bb 1). Die Gehalte von Chrom liegen zwischen 9 mg/kg (HH 2) und 45 mg/kg (SI) und sind im Vergleich zu den anderen Elementen relativ gleichmäßig verteilt. Die Elemente Arsen, Zinn, Selen, Molybdän und Antimon konnten nicht in den Extrakten aller RCL-Materialien nachgewiesen werden.

Bei den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 treten teilweise ebenfalls unterschiedliche Absolutgehalte der extrahierten Stoffe auf. Arsen konnte im Extrakt beider Materialien nicht nachgewiesen werden. Bei Chrom, Selen, Blei und Nickel ergeben sich ähnliche Gehalte. Für Zink ist der Gehalt im Extrakt von Material RCL 2 deutlich höher als der im Extrakt von RCL 1, bei Aluminium und Kobalt verhält sich dies umgekehrt.

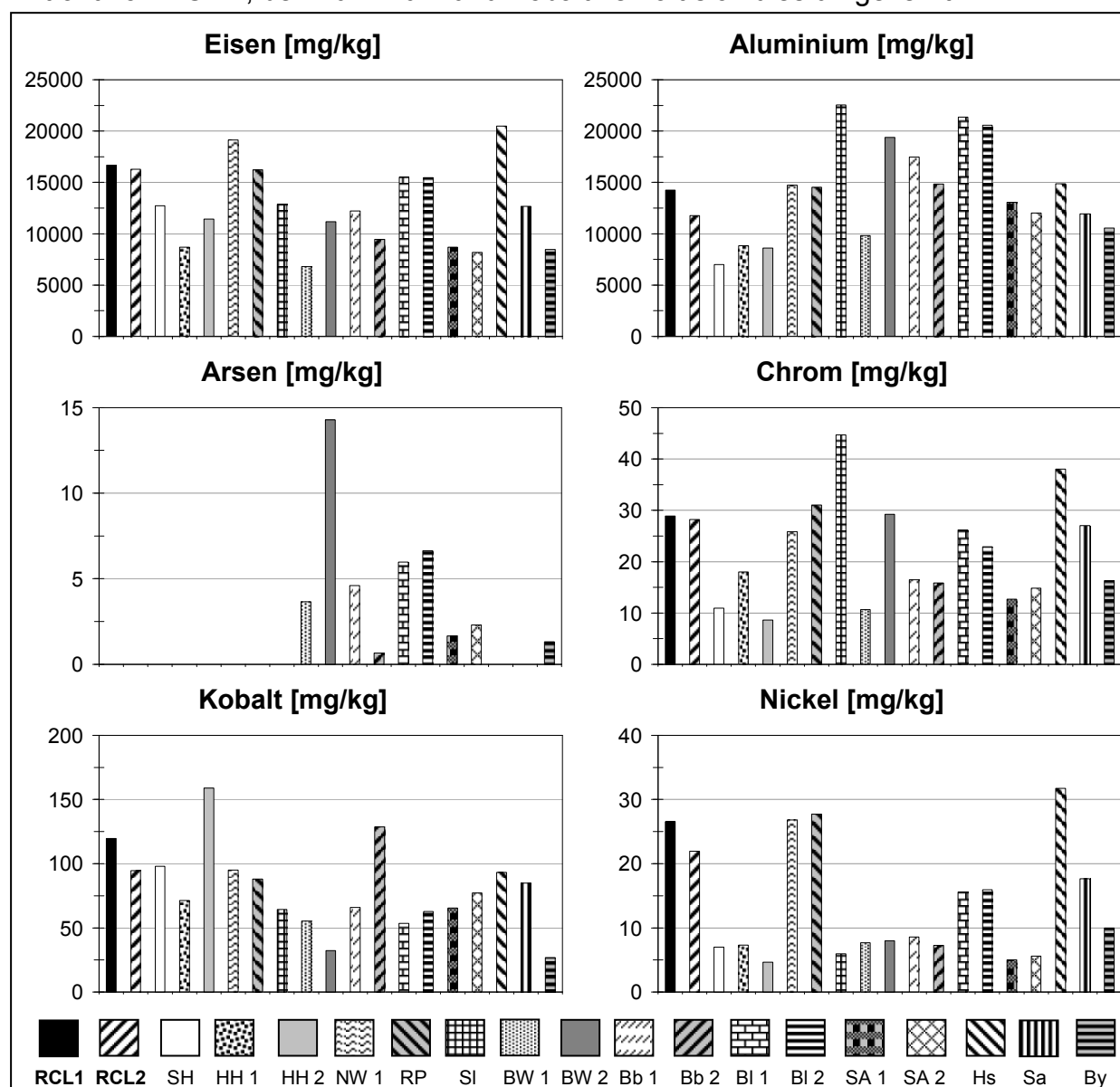


Abbildung 15: Ausgewählte Elementgehalte aus den Königswasser-Aufschlüssen für alle 19 Recycling-Materialien

#### 4.1.5 Röntgen-Diffraktometrie

XRD-Untersuchungen an den beiden fein gemahlene Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 ergaben eine Übereinstimmung beider Materialien hinsichtlich ihrer Zusammensetzung. Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) stellen die Hauptphasen in beiden RCL-Baustoffen dar. Außerdem ist davon auszugehen, dass Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen) vorkommen, deren Ursprung im Zement liegt. Da diese Phasen röntgenamorph sind, war ein Nachweis per Röntgen-Diffraktometrie nicht möglich (GARTNER & JENNINGS 1987, GLASSER 1992, KULIK & KERSTEN 2001).

#### 4.1.6 Oberflächenmessung mit BET

An allen 19 RCL-Materialien wurden die Oberflächen der fein gemahlene Proben gemessen. Wie Tabelle 18 zeigt, betragen die Oberflächen etwa zwischen 2 – 4  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Tabelle 18: Gemessene Oberflächen der 19 RCL-Materialien

Probenbezeichnung	Spezifische Oberfläche [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]
RCL 1	3,0
RCL 2	2,7
SH	1,8
HH 1	3,9
HH 2	2,3
NW 1	3,6
RP	3,8
SI	3,4
BW 1	4,5
BW 2	4,0
Bb 1	3,0
Bb 2	3,3
BI 1	3,8
BI 2	3,1
SA 1	3,4
SA 2	3,4
Hs	3,6
Sa	3,0
By	4,4

## 4.2 Feldversuche

### 4.2.1 Abflussverhalten

Die Feldversuche wurden im Zeitraum 11.10.00 bis 16.07.02 durchgeführt. Während dieser Zeit wurde im Sammelschacht ein Abfluss von ca. 23 m<sup>3</sup> aus Becken RCL 1 gemessen, aus Becken RCL 2 ergab sich ein Abfluss von etwa 41 m<sup>3</sup>. Als Niederschlagssumme über den gesamten Versuchszeitraum wurden 1434 mm gemessen, womit auf die Oberflächen der Testfelder umgerechnet jeweils ca. 51 m<sup>3</sup> Niederschlag während der knapp 21 Monate fielen.

Sowohl die gemessenen Abflüsse aus Becken 1 und 2 als auch ein Tracerversuch auf beiden Testfeldern gaben deutliche Hinweise auf eine Undichtigkeit in Becken RCL 1. Daher wurden nach Abschluss der Feldversuche die Abflussbereiche beider Becken per Hand ausgeschachtet, die Enden der HDPE-Rohre beider Becken im Sammelschacht verschlossen und beide Becken bis zur gleichen Höhe mit Wasser aufgefüllt. Mehrere Vergleiche der Wasserstände in beiden Becken in den Wochen danach beweisen, dass in Becken 1 eine Undichtigkeit im unteren Bereich der beiden Kiesschichten (Abbildung 5) vorlag. Demnach waren die gemessenen Stoffkonzentrationen in Becken RCL 1 von der Undichtigkeit unbeeinflusst. Die Stofffrachten in Becken RCL 1 werden auf Grund der Undichtigkeit mit dem gemessenen Abfluss in Becken RCL 2 berechnet.

Der auf beiden Testfeldern durchgeführte Tracerversuch kann zur Bestimmung der mittleren Verweilzeit (Halbwertszeit) des Markierungsmittels herangezogen werden (KÄSS 1992). Für Becken RCL 1 ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Tracers von 76 Tagen, in Becken RCL 2 liegt diese bei 90 Tagen für den Zeitraum des Tracerversuches.

Anhand mehrerer Niederschlagsereignisse, denen jeweils eine längere niederschlagsfreie bzw. –arme Periode vorausging, wurde die Zeitspanne bis zu einem hierdurch hervorgerufenen Abflussanstieg für Becken RCL 2 bestimmt. Dabei ergibt sich ein Zeitraum von 8 bis 25 Stunden, bis eine deutlich erkennbare „Reaktion“ im Beckenabfluss auf ein Niederschlagsereignis auftritt.

### 4.2.2 Bestimmung der Versickerungsintensität

In Anlehnung an DIN 19682 Teil 7 und KRASS et al. (1999b) wurde nach Abschluss der Feldversuche die Versickerungsintensität auf beiden Testfeldern an mehreren Stellen gemessen (Tabelle 19).

Tabelle 19: Messung der Versickerungsintensität auf den Testfeldern RCL 1 und 2

Becken	Messdatum	Versickerungsintensität [l / min·m <sup>2</sup> ]	Durchschnitt [l / min·m <sup>2</sup> ]
RCL 1	17.07.02	3,5	5,5
	01.08.02	6,3 (Messung 1) 6,7 (Messung 2)	
RCL 2	17.07.02	3,7	3,8
	01.08.02	3,9	

Dabei ergibt sich im Durchschnitt eine größere Wassermenge bei Becken RCL 1, die in der Zeiteinheit je Flächeneinheit senkrecht in das RCL-Material eintrat, im Vergleich zu Material RCL 2. Die Versickerungsintensität wurde an zwei unterschiedlichen Tagen gemessen. Während bei Testfeld RCL 1 ein deutlicher Unterschied bei den ermittelten Werten zwischen beiden Tagen auftritt, sind die auf Testfeld RCL 2 gemessenen Versickerungsintensitäten nahezu identisch.

#### 4.2.3 Bestimmung von Dichte und Gewicht der Lysimeterkomponenten

In Anlehnung an DIN 18125 Teil 2 wurde die Dichte der RCL-Materialien bestimmt, was einen Wert von ca. 2 g/cm<sup>3</sup> ergibt. Eine Gewichtsberechnung der RCL-Material-Schicht in den Lysimetern, die nicht unter der seitlichen Abdeckung lag und somit direkt dem Niederschlag ausgesetzt war, ergibt einen Wert von ca. 35 t pro Becken.

Vom Kies mit einer Körnung von 0 - 32 mm ø lagen etwa 40 t pro Becken vor, vom Kies mit einer Körnung von 2 - 8 mm ø ca. 10 t.

#### 4.2.4 Klimatische Parameter

Die Lufttemperatur bei beiden Testfeldern erreichte in den Sommermonaten während der Versuchslaufzeit (Sommer 2001, Sommer 2002) im Tagesmittel maximale Werte von ca. 29 °C. In den Wintermonaten lagen die minimalen Werte im Tagesmittel unter dem Gefrierpunkt bei etwa – 4 °C. Die bei der Klimastation gemessene Windgeschwindigkeit lag durchschnittlich bei 1,4 m/s, bei Höchstwerten von ca. 7 m/s.

Über den gesamten Versuchszeitraum ergibt sich aus der auf jedes Testfeld eingegangenen Niederschlagsmenge (ca. 51 m<sup>3</sup>) und dem Beckenabfluss (etwa 41 m<sup>3</sup>) ein Wert von ca. 10 m<sup>3</sup> Wasser, das verdunstet ist. Eine Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach der Formel von Makkink (Gleichung 9) und Verwendung der Korrekturfunktion von Renger zur Ermittlung der aktuellen Evapotranspiration ergibt mit ca. 13 m<sup>3</sup> berechneter Verdunstung eine gute Annäherung an die gemessenen Werte. Die Abweichung ist zu erklären mit der im Feld auf Grund fehlender Vegetation nicht auftretenden Transpiration (SCHRÖDTER 1985).

Gleichung 9 
$$ETP = -0,3 + b \frac{s}{s + \gamma} \cdot R_s \quad [\text{mm/Tag}]$$

b: Koeffizient aus dem Tagesmittel der relativen Luftfeuchtigkeit und aus der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe während der Tagesstunden

$\frac{s}{s + \gamma}$ : aus einer Hilfstafel abgeleiteter Wert in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

R<sub>s</sub>: aus der Globalstrahlung errechnetes Verdunstungsäquivalent [mm]

#### 4.2.5 Untersuchung des Kiesel in den Lysimetern

Der werksgemischte Kiessand (0 - 32 mm ø), der in beiden Lysimetern unterhalb der

Schicht mit Recycling-Material eingebaut worden war, wurde zur Ermittlung von Hintergrundwerten untersucht. Hierbei ergab sich ein  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von  $< 5 \%$ . Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes ergab einen Glühverlust von  $0,5 \%$ , die des Schwefelgehaltes einen Wert von  $0,01 \%$ .

Alle in Tabelle 20 dargestellten Werte liegen deutlich unterhalb der in den Sickerwasserproben aus beiden Testfeldern aufgetretenen maximalen Konzentrationen.

Tabelle 20: Ermittelte Werte für den werksgemischten Kiessand (0-32 mm  $\varnothing$ ) nach Durchführung eines Schüttelversuches in Anlehnung an den S4-Versuch mit einer Korngröße  $< 2$  mm

Element	Konzentration [mg/l]
Chlorid	2,2
Nitrat	2,6
Sulfat	nicht nachweisbar
Natrium	0,8
Kalium	1,2
Calcium	5,9

#### 4.2.6 Untersuchungen zu Haupt- und Spurenelementen, pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit

Während der knapp 21 Monate, in denen die Feldversuche stattfanden, wurden in den Sickerwässern beider Becken für pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Haupt- und Spurenelemente die in Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellten Werte gemessen.

Plausibilitätskontrollen zu den ermittelten Hauptelementkonzentrationen ergeben Abweichungen  $\geq 10 \%$  bei den Ionenbilanzen für 19 von insgesamt 105 untersuchten Proben bei Becken RCL 1 und 14 von 109 Proben bei Becken RCL 2. Insbesondere in den letzten 3 Monaten Versuchslaufzeit kommen diese Abweichungen vor, wobei für diesen Zeitraum keine signifikanten Schwankungen bei den aus der Titration ermittelten Gehalten auftreten. Da die Abweichungen demnach nicht auf Ungenauigkeiten bei der Titration zurückzuführen sind, unterliegen die ermittelten Werte für Anionen und Kationen der Hauptelemente insbesondere in der Endphase der Feldversuche einem gewissen Fehlerpotenzial und sind nur als Orientierungswerte für diesen Zeitraum zu verwenden.

Bei den **pH-Werten** ergeben sich für beide Becken deutlich unterschiedliche Kurvenverläufe. Während in Becken RCL 1 die Werte über den gesamten Versuchszeitraum relativ konstant zwischen 6,5 und 8 liegen, treten im Sickerwasser aus Becken RCL 2 zunächst Werte zwischen 8 und 10 auf. Nach etwa 13 Monaten erfolgt ein sprunghafter Anstieg im November 2001, so dass die pH-Werte in Becken RCL 2 bis zum Versuchsende zwischen 10 und 12 liegen. In diesem Zeitraum ist ein Anstieg und Abfall des pH-Wertes mit einem Maximum von pH 11,8 Anfang März 2002 zu erkennen.

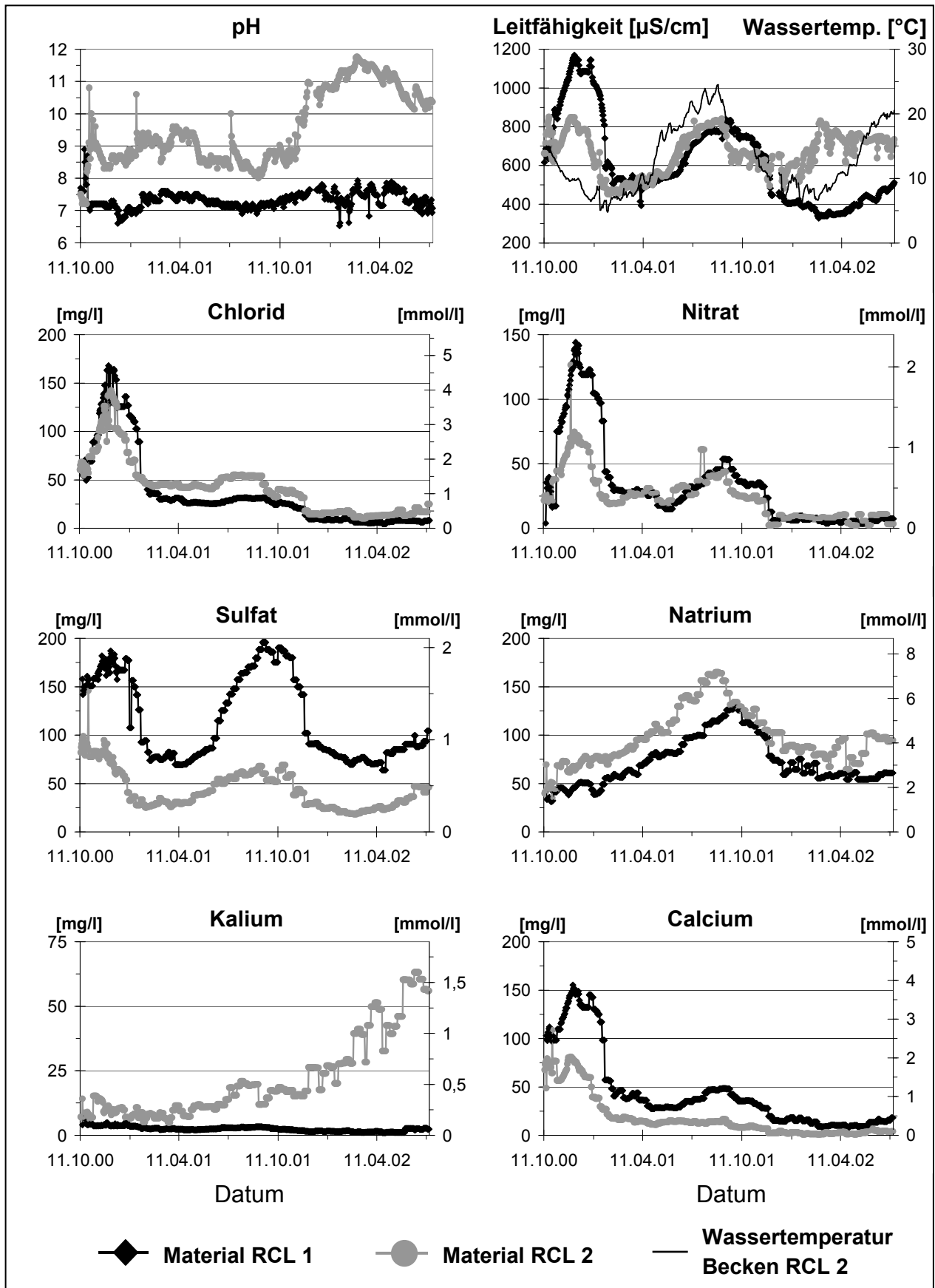


Abbildung 16: Ergebnisse für pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Hauptelemente aus den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und RCL 2

Bei der **elektrischen Leitfähigkeit** sind größere Schwankungen im Sickerwasser aus Becken RCL 1 zu erkennen. Nach einem anfänglich raschen Anstieg auf knapp unter  $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$  erfolgt ein Abfall auf einen Wert von etwa  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , der für ca. 4 Monate vorherrscht. Zwischen Mitte Juni und Ende November 2001 erfolgen wiederum Anstieg und Abfall der elektrischen Leitfähigkeit auf Werte um  $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ , bevor ab Frühjahr 2002 Werte wieder höher werden. Auch in Becken RCL 2 ist anfänglich ein Anstieg und Abfall zu erkennen, jedoch mit geringeren Werten im Vergleich zu RCL 1. Danach verlaufen die Kurven beider Becken von Februar bis Dezember 2001 gleich, bevor im Sickerwasser aus Becken RCL 2 mit  $600 - 800 \mu\text{S}/\text{cm}$  durchgehend höhere Werte als in Becken RCL 1 bis zum Versuchsende vorherrschen.

Bei **Chlorid** ergeben sich für beide Becken ähnlich Kurvenverläufe mit einem anfänglich raschen Anstieg während der ersten zwei Monate Versuchslaufzeit und einem Rückgang der Konzentrationen auf Werte um  $50 \text{ mg/l}$  bis Februar 2001. Danach ist im Sommer für Becken RCL 2 ein geringfügiger Anstieg zu erkennen, ansonsten nehmen die Chlorid-Werte in beiden Becken mehr oder weniger kontinuierlich bis zur Einstellung der Feldversuche ab.

Bei **Nitrat** tritt während der ersten 4 Monate ein schneller Anstieg und Abfall in den Konzentrationen auf, wobei Werte für Becken RCL 1 deutlich höher sind als für RCL 2. Danach ähneln sich die Kurvenverläufe und steigen während der Sommermonate bis Ende August 2001 an, bevor Konzentrationen in beiden Becken zurückgehen.

Konzentrationen für **Sulfat** sind im Sickerwasser aus Becken RCL 1 durchgängig höher als aus RCL 2. Für RCL 1 ergeben sich Anstieg und Abfall während der ersten vier Monate sowie während der Sommermonate 2001 mit einem Maximum Anfang September. Seit Mai 2002 steigen die Werte erneut an. Für Becken RCL 2 ergibt sich ein vergleichbarer Kurvenverlauf, allerdings mit deutlich geringeren Konzentrationen.

Werte für **Natrium** sind in Becken RCL 2 über den gesamten Versuchszeitraum höher als in Becken RCL 1. Konzentrationen steigen in beiden Becken kontinuierlich für 11 Monate bis September 2001 an. Danach erfolgt ein Rückgang bis Januar 2002, von wo an Werte in beiden Becken relativ konstant bleiben bis Versuchsende.

Bei **Kalium** liegen die Konzentrationen im Sickerwasser aus Becken RCL 1 über die gesamte Versuchsdauer zwischen  $1$  bis  $4 \text{ mg/l}$ . Werte für Becken RCL 2 sind für die ersten 14 Monate relativ konstant unter  $25 \text{ mg/l}$ , danach erfolgt ein kontinuierlicher Konzentrationsanstieg bis zum Ende der Feldversuche.

Werte für **Calcium** sind im Sickerwasser aus Becken RCL 1 über die gesamte Versuchsdauer höher als in Becken RCL 2. Für RCL 1 tritt ein deutlicher Konzentrationsanstieg und –abfall während der ersten vier Monate (bis Februar 2001) und im Sommer 2001 auf, danach liegen die Werte relativ konstant unter  $20 \text{ mg/l}$ . In Becken RCL 2 ist ebenfalls ein klarer Anstieg und Abfall während der ersten vier Monate erkennbar, danach werden Konzentrationen kontinuierlich geringer. Für den Sommer 2001 liegt kein zu Becken RCL 1 vergleichbarer Konzentrationsanstieg und –abfall vor.

Abbildung 17 zeigt den relativen Anteil an den Gesamtgehalten für die betrachteten Hauptelemente. Bei den Anionen im Sickerwasser aus Becken RCL 2 ist erkennbar, dass sich nach ca. 13 Monaten Laufzeit der pH-Wert Anstieg in der ermittelten Alkalinität widerspiegelt. Der relative Anteil an den Gesamtgehalten der hier betrachteten Anionen nimmt über die Versuchslaufzeit für Chlorid und Nitrat bei beiden Becken ab. Dagegen bleiben Sulfatanteile, insbesondere in Becken RCL 1, mehr oder weniger

konstant über die 21 Monate.

Natrium tritt bei den betrachteten Kationen nach etwa 3 Monaten Versuchslaufzeit bis zur Einstellung der Feldversuche im Sickerwasser beider Becken verstärkt auf. Der relative Anteil von Magnesium an den Gesamtgehalten nimmt in beiden Becken ab, ebenso wie Calcium in Becken RCL 2. In Becken RCL 1 nimmt der Calciumanteil zwar anfangs deutlich ab, bleibt in der Folgezeit aber relativ konstant. Während der Kaliumanteil in Becken RCL 1 konstant klein bleibt, nimmt er in Becken RCL 2 kontinuierlich zu. Gegen Ende der Versuchslaufzeit ist Kalium zusammen mit Natrium das dominante Kation im Sickerwasser von Becken RCL 2, für Material RCL 1 trifft dies für Natrium und Calcium zu.

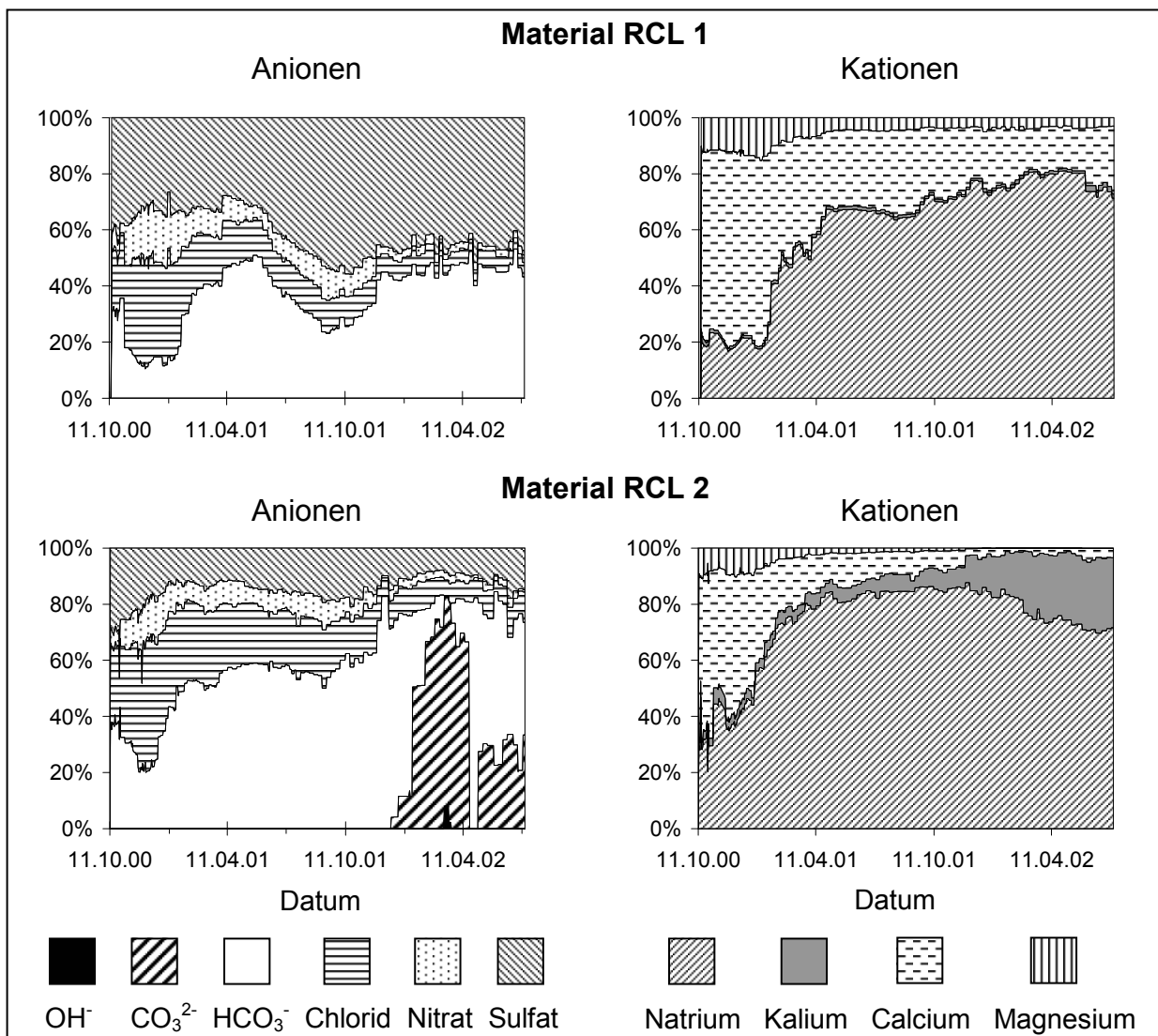


Abbildung 17: Relativer Anteil an den Gesamtgehalten der jeweiligen Anionen und Kationen in [%] nach Umrechnung der Konzentrationen in [meq/l] für die Materialien RCL 1 und 2

Wie Abbildung 18 zeigt, sind die Werte für **Aluminium** bei Becken RCL 1 über den gesamten Versuchszeitraum kleiner als 1 mg/l. Dagegen ist in Becken RCL 2 nach etwa 13 Monaten Laufzeit ein Anstieg bis auf 8 mg/l im Mai 2002 zu erkennen, bevor Konzentrationen bis zur Einstellung der Feldversuche wieder etwas abnehmen.

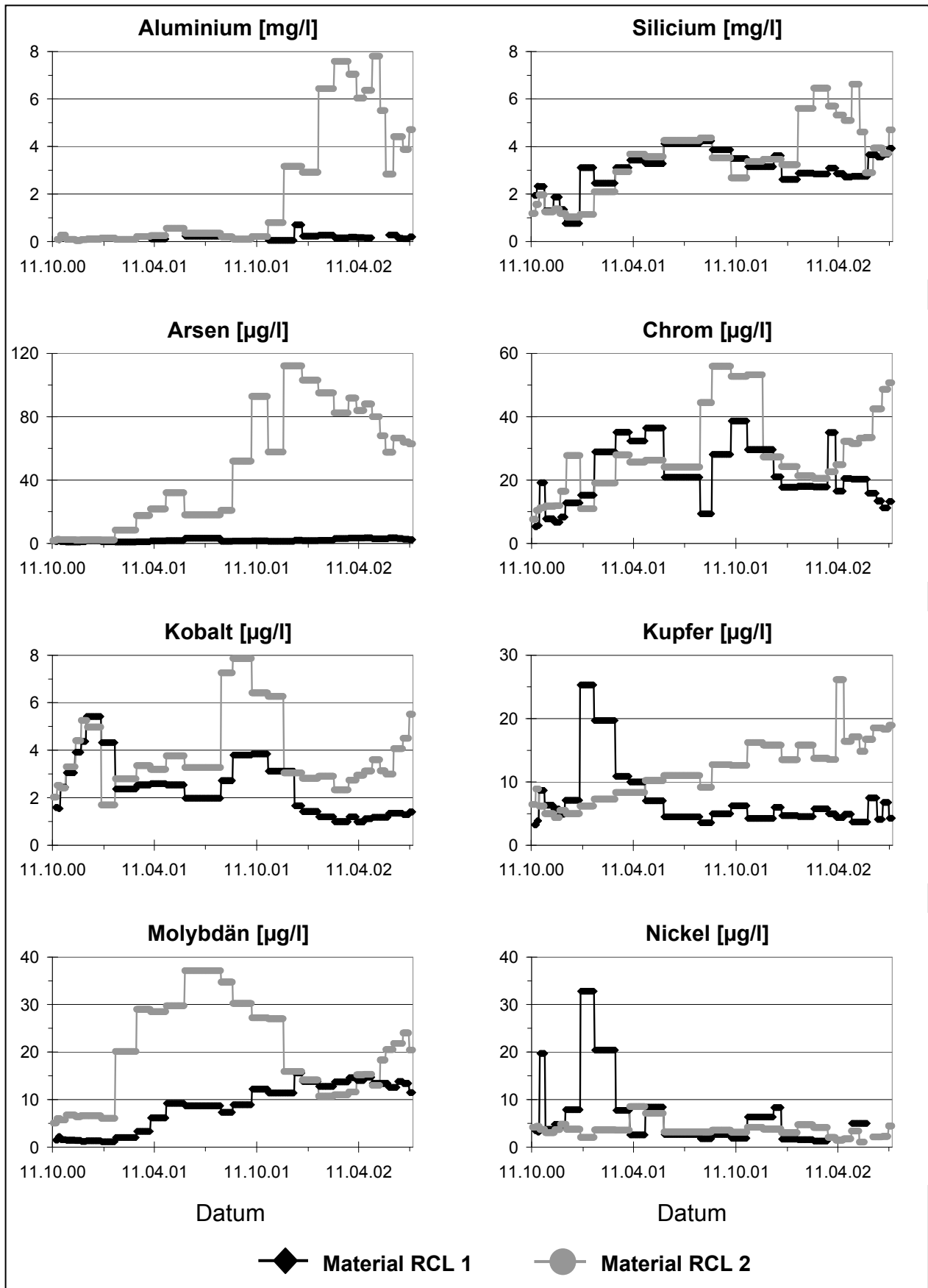


Abbildung 18: Ergebnisse für Haupt- und Spurenelemente aus den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und RCL 2

Bei **Silicium** ergeben sich für beide Becken in den ersten 15 Monaten ähnliche Kurvenverläufe mit einem allmählichen Anstieg bis Juni 2002 und relativ konstanten Werten danach. Während in Becken RCL 1 die Gehalte bis Versuchsende bei ca. 3 mg/l bleiben, steigen bei Material RCL 2 ab Januar 2002 Konzentrationen bis 6 mg/l an, bevor sich zum Ende der Feldversuche hin die Gehalte in beiden Becken wieder annähern.

Für **Arsen** sind bei Material RCL 1 die Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum kleiner als 4 µg/l. Dagegen steigen im Sickerwasser aus Becken RCL 2 Gehalte nach etwa 4 Monaten Laufzeit mehr oder weniger kontinuierlich an bis zu einem Maximum von 112 µg/l im Dezember 2001. Danach nehmen die Werte zum Versuchsende hin ab und liegen bei ca. 60 µg/l bei Einstellung der Feldversuche.

Bei **Chrom** liegen für beide Testfelder bis etwa 3 Monate vor Beendigung der Feldversuche ähnliche Kurvenverläufe vor. In den ersten 12 Monaten findet ein allmählicher Anstieg der Konzentrationen statt, wobei im Oktober 2001 Werte in Becken RCL 2 mit etwa 55 µg/l deutlich höher sind als bei RCL 1 mit ca. 40 µg/l. Nachdem bis April 2002 die Gehalte in beiden Becken wieder zurückgehen, erfolgt bis Versuchsende ein erneuter Anstieg in Becken RCL 2 auf Werte um 50 µg/l. Im Gegensatz dazu fallen die Konzentrationen im Sickerwasser von Becken RCL 1 bis zur Einstellung der Feldversuche weiterhin ab.

Bei **Kobalt** ist in den ersten vier Monaten Versuchslaufzeit in beiden Testfeldern ein Konzentrationsanstieg und –abfall zu erkennen. Ab Februar 2001 sind die Gehalte relativ konstant, bevor im September ein Konzentrationsanstieg stattfindet, der in Becken RCL 2 mit ca. 8 µg/l etwas höher ist als in RCL 1 mit ungefähr 4 µg/l. Im Anschluss daran nehmen die Gehalte im Sickerwasser aus Becken RCL 1 allmählich ab, dagegen erfolgt im Juni 2002 nochmals ein Anstieg in Becken RCL 2.

Für **Kupfer** ergeben sich in beiden Testfeldern unterschiedliche Kurvenverläufe. In Becken RCL 1 stellen sich außer einem kurzzeitigen Konzentrationsanstieg auf 25 µg/l nach etwa 3 Monaten über die gesamte Versuchsdauer Werte ein, die kleiner als 10 µg/l sind. Dagegen ist für Becken RCL 2 ein mehr oder weniger kontinuierlicher Konzentrationsanstieg über den gesamten Versuchszeitraum zu erkennen mit einem ähnlichen Höchstwert wie bei RCL 1.

Bei **Molybdän** steigen die Konzentrationen in Becken RCL 1 während der Versuchslaufzeit kontinuierlich an auf Werte um 15 µg/l, wogegen sich bei Material RCL 2 ein davon abweichender Kurvenverlauf ergibt. In diesem Becken ist nach den ersten vier Monaten mit konstanten Werten von Februar 2001 bis Februar 2002 ein Konzentrationsanstieg und –abfall zu erkennen mit dem Maximum im Juni. Während der letzten drei Monate der Feldversuche sind ab April 2002 wiederum steigende Gehalte in Becken RCL 2 zu verzeichnen.

Bei **Nickel** ist für Material RCL 1 während der ersten vier Monate ein Anstieg und Abfall in den Gehalten zu erkennen mit einem Maximalwert von 33 µg/l im Januar 2001. Für die restliche Laufzeit der Freilandversuche bleiben die Konzentrationen für RCL 1 kleiner als 10 µg/l, bei Material RCL 2 bleiben die Gehalte während der gesamten Versuchslaufzeit unter diesem Wert.

Messungen des Redoxpotentials im Sammelschacht ergaben im Sickerwasser aus Becken RCL 1 Werte zwischen 460 bis 620 mV. Bei Becken RCL 2 wurden Werte zwischen 330 bis 447 mV ermittelt.

Aus den Proben der Sammelflasche für Niederschlagswasser ergab sich während der Versuchslaufzeit ein durchschnittlicher pH-Wert von etwa 5. Bei der Elektroneutralität weisen die Ionenbilanzen der Regenwasserproben erhebliche Abweichungen auf, so dass bei den Hauptelementen ermittelte Gehalte nur als grobe Orientierungswerte angesehen werden können.

Konzentrationen für Schwer- und Halbmetalle im Niederschlagswasser sind in Tabelle 21 dargestellt, wobei sämtliche Spurenelementgehalte im Niederschlagswasser kleiner sind als die bei den Feldversuchen ermittelten maximalen Konzentrationen im Sickerwasser.

Tabelle 21: Ermittelte Konzentrationen für Schwer- und Halbmetalle aus der Niederschlagswasserprobe März 2002; die Konzentrationen der restlichen untersuchten Schwer-, Leicht- und Halbmetalle waren kleiner Bestimmungsgrenze

Element	Konzentration [ $\mu\text{g/l}$ ]	Element	Konzentration [ $\mu\text{g/l}$ ]
Antimon	0,6	Mangan	9,0
Arsen	0,8	Molybdän	0,9
Blei	2,2	Silicium	96
Kupfer	3,6		

#### 4.2.7 Untersuchungen zur Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen

Im Verlauf der Feldversuche war in den filtrierten Sickerwasserproben aus beiden Testfeldern deutlich eine Gelbfärbung zu erkennen, insbesondere bei Becken RCL 2. Nach erfolgter Konservierung der Proben mit Salpetersäure trat ein Niederschlag auf. Da Huminstoffe von gelblicher bis schwarzer Farbe sind und Huminsäuren unter sauren Bedingungen ausfallen (Abschnitt 2.4.5) lag der Verdacht nahe, dass Huminstoffe für diese Beobachtungen verantwortlich sind.

Aus diesem Grund wurden Sickerwasserproben aus beiden Becken qualitativ auf Huminstoffe untersucht. Die SEC (size exclusion chromatography) - Messungen wurden freundlicherweise durchgeführt von Dr. Ch. Specht, Dipl. Ing. G. Metreveli und Dr. G. Abbt-Braun vom Engler-Bunte Institut an der Universität Karlsruhe. Die Ergebnisse zeigen, dass huminstoffähnliche Substanzen in den Wasserproben vorkommen (Anhang E 24-26). Eine Zuordnung der identifizierten Substanzen zu Huminstoffen im herkömmlichen Sinn kann nicht erfolgen, da die Substanzen vermutlich nicht auf natürliche Art und Weise entstanden sind. Jedoch weisen die huminstoffähnlichen Substanzen aus Becken RCL 1 und 2 ein ähnliches chromatographisches Verhalten wie natürliche Huminstoffe auf und es lässt sich zudem feststellen, dass es sich hierbei um hochmolekulare Substanzen handelt. Im Sickerwasser von Becken RCL 2 kommen dabei anteilmäßig höhermolekulare Substanzen vor im Vergleich zu RCL 1.

Des Weiteren treten bei einem Versuch mit der Einzelkomponente Asphalt ebenfalls huminstoffähnliche Substanzen in der Wasserprobe auf, wodurch Asphalt als Quelle für die im Sickerwasser beider Becken auftretenden Stoffe in Frage kommt. Dabei treten bei Asphalt verstärkt niedermolekulare Substanzen auf. In Becken RCL 2 können möglicherweise höhere Gehalte huminstoffähnlicher Substanzen im Sickerwasser vorgelegen haben als in RCL 1, da ein Anstieg des pH-Wertes zu verbesserter Löslichkeit der

Huminstoffe führt (SAVRIC 2001). Hierfür spricht auch eine intensivere Gelbfärbung der Sickerwasserproben aus Becken RCL 2 im Vergleich zu RCL 1.

#### **4.2.8 Untersuchungen zum Einfluss huminstoffähnlicher Substanzen und von partikelgebundenem Stofftransport**

Wie in Abschnitt 4.2.7 ausgeführt, wurden huminstoffähnliche Substanzen im Sickerwasser beider Becken nachgewiesen. Die beobachtete Ausfällung nach Ansäuern der Proben deutet darauf hin, dass es sich hierbei um säureunlösliche Anteile der Huminsäuren handelt. Da Huminsäuren Kationen sorbieren können, jedoch unter sauren Bedingungen Anteile ausfallen, kann durch Ansäuern einer Probe die Analyse kationischer Spezies bei Vorhandensein von Huminsäuren beeinflusst werden. Mit ausbleibender Säurezugabe lässt sich untersuchen, inwiefern Kationen nach erfolgter Filtration an huminstoffähnlichen Substanzen sorbiert vorliegen ohne gefällt zu werden, wodurch eine analytische Erfassung dieser Kationen immer noch möglich ist. Allerdings ist zu beachten, dass fehlende Konservierung wiederum die Adsorption von Stoffen an Gefäßwänden begünstigt, was dementsprechend die Analysenergebnisse beeinflusst.

Zur genaueren Untersuchung des Einflusses von huminstoffähnlichen Substanzen und des partikelgebundenen Stofftransportes auf Analysenergebnisse wurden für drei Zeiträume (April/Mai, Juni und Juli 2002) verschiedene Arten der Probenbehandlung angewandt.

Die erste Vorgehensweise bestand darin, die Probe zu filtrieren, danach jedoch nicht mit Salpetersäure zu konservieren. Im Unterschied hierzu wurde bei der zweiten Vorgehensweise die Probe ebenfalls zunächst filtriert, im Anschluss jedoch angesäuert. Damit sollte die Auswirkung des durch Ansäuern beobachteten Niederschlages in den Proben, der auf Huminsäuren hinweist, auf die Analysenergebnisse untersucht werden. Die zweite Vorgehensweise entspricht dem üblichen Vorgehensmuster.

Bei der dritten Vorgehensweise wurde die Probe zunächst angesäuert und erst anschließend filtriert. Dies ermöglicht eine Auflösung von Partikeln mit den daran gebundenen Stoffen, welche ansonsten nach der Filtration als Filterrückstand zurückbleiben können. Hierdurch können Art und Menge von Stoffen erfasst werden, welche bei der üblichen Vorgehensweise abfiltriert und somit analytisch nicht erfasst werden.

In Abbildung 19 sind Ergebnisse zu den verschiedenen Arten der Probenbehandlung aus den Sickerwasserproben von Becken RCL 1 und 2 dargestellt.

Bei Eisen lässt sich für beide Testfeld-Materialien erkennen, dass die Konzentration bei den Proben, die erst angesäuert und dann filtriert wurden, deutlich höher ist als nach den beiden anderen Vorgehensweisen. Dasselbe gilt für Aluminium, Mangan, Blei und Kobalt für Material RCL 1 und 2. Für Chrom ergeben sich dagegen mehr oder weniger gleich hohe Konzentrationen nach allen drei Vorgehensweisen. Für Sickerwasserproben aus beiden Testfeldern gilt dasselbe für Antimon, Selen und Zink.

Bei Arsen sind für Material RCL 1 die Konzentrationen nach den drei Vorgehensweisen ungefähr gleich hoch, dagegen ist für Material RCL 2 die Konzentration bei der Probe, die filtriert und nicht angesäuert wurde, deutlich am höchsten und bei der Probe, die erst angesäuert und dann filtriert wurde, am niedrigsten.

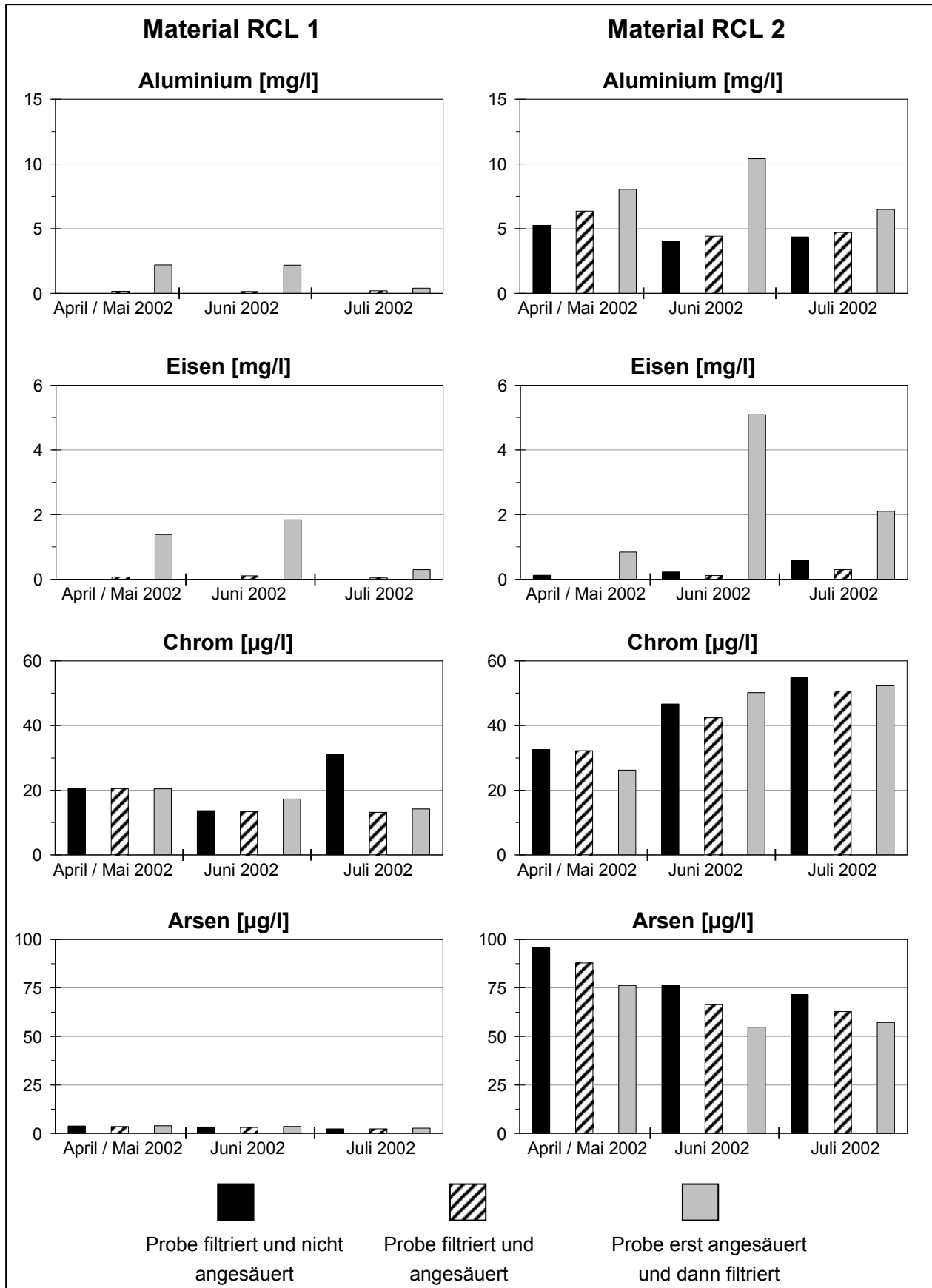


Abbildung 19: Ergebnisse für Sickerwasserproben aus drei Zeiträumen (April/Mai, Juni und Juli 2002) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2; bei der Probenaufbereitung wurde hinsichtlich Filtration (0,45 µm) sowie Ansäuern mit HNO<sub>3</sub> unterschiedlich vorgegangen (siehe Legende)

Kupfer hat bei Material RCL 2 die höchste Konzentration jeweils bei der Probe, die erst angesäuert und dann filtriert wurde. Für Material RCL 1 trifft dies nur für die Probe aus dem Zeitraum April/Mai 2002 zu, ansonsten sind Konzentrationen nach den drei Vorgehensweisen ungefähr gleich hoch.

Molybdän nimmt für RCL 1 und 2 die niedrigsten Konzentrationen bei der Probe ein, die erst angesäuert und dann filtriert wurde. Die Konzentrationen nach den beiden anderen Vorgehensweisen sind ungefähr gleich hoch.

Zur weiteren Untersuchung des Stofftransportes von Partikeln > 0,45 µm wurden Sickerwasserproben aus dem Zeitraum April/Mai 2002 filtriert und die Filter mitsamt Rückstand mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sowie HNO<sub>3</sub> (65 %ig) aufgeschlossen. Da insbesondere in Becken RCL 2 die Probenfärbung auf ein erhöhtes Vorkommen huminstoffähnlicher Substanzen hinweist, wurde zur genaueren Untersuchung die Probe aus Becken RCL 2 angesäuert und die hierdurch ausgefällten huminstoffähnlichen Substanzen abfiltriert sowie ebenfalls aufgeschlossen.

Ermittelte Massenanteile sind in Abbildung 20 dargestellt, wobei zu beachten ist, dass durch die geringe Einwaage der abfiltrierten Partikel die Ergebnisse lediglich Orientierungswerte darstellen und damit nur eingeschränkte Aussagekraft besitzen. Es kann jedoch festgestellt werden, dass in den Filterrückständen aus Becken RCL 1 und 2 Eisen und Aluminium mit erhöhten Gehalten auftreten, dasselbe gilt für die huminstoffähnlichen Substanzen in Becken RCL 2. Zink, Chrom und Molybdän zeigen für Becken RCL 2 insbesondere bei den huminstoffähnlichen Substanzen vergleichsweise hohe Werte bei den Massenanteilen auf. Bei den Spurenelementen sind Nickel, Blei, Kupfer und Arsen sowohl in den Filterrückständen von Becken RCL 1 und 2 als auch bei den huminstoffähnlichen Substanzen aus Becken RCL 2 deutlich nachweisbar.

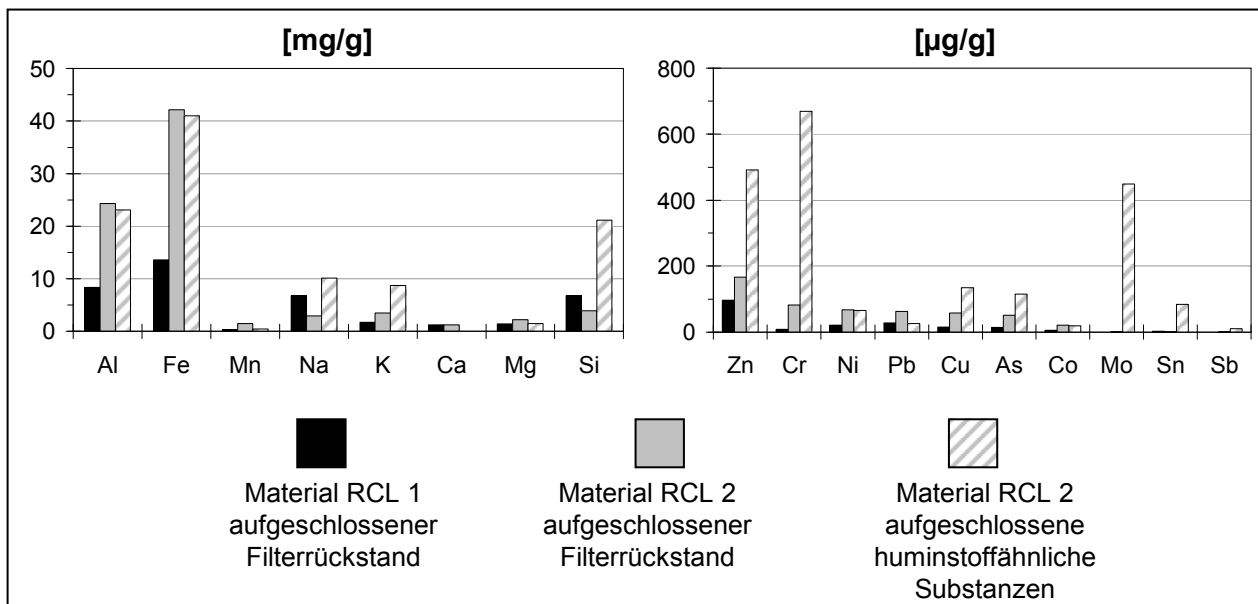


Abbildung 20: Ergebnisse für aufgeschlossene Filterrückstände von Sickerwasserproben aus dem Zeitraum April/Mai 2002 aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2; nach Ansäuern ausgefallene huminstoffähnliche Substanzen aus Becken RCL 2 wurden ebenfalls aufgeschlossen

Die Filterrückstände mehrerer Proben aus beiden Testfeldern wurden per Röntgen-Diffraktometrie untersucht. Dabei konnten Calcit, Kaolinit und Illit in den Filterrückstän-

den der Partikel  $> 0,45 \mu\text{m}$  nachgewiesen werden. Bei einem Versuch mit Glykol, um bei Vorhandensein quellfähigen Montmorillonit nachzuweisen, konnte dieses Tonmineral nicht nachgewiesen werden. Für die Braunfärbung der Filterrückstände, insbesondere aus Becken RCL 2, ist eventuell Limonit mitverantwortlich. Da dieses Eisenhydroxid kryptokristallin ist, konnte es bei der XRD-Untersuchung nicht nachgewiesen werden (SCHRÖCKE & WEINER 1981, STRUNZ 1982).

In Abbildung 21 sind Partikelkonzentrationen aus den Sickerwasserproben beider Testfelder dargestellt. Zur Umwandlung von [FNU] in [mg/l] wurde zunächst der Trübungswert einer Probe in [FNU] gemessen, anschließend die Probe filtriert ( $0,45 \mu\text{m}$ ) und das Gewicht des Filterrückstandes mit dem Volumen der filtrierten Probemenge in [mg/l] umgerechnet. Nachdem dies für mehrere Verdünnungsstufen der Probe durchgeführt worden war, konnten hieraus die ermittelten Trübungswerte aus den Sickerwasserproben umgerechnet werden. Diese Beziehung wurde erst gegen Ende der Feldversuche ermittelt, wodurch der obere Eichbereich bei einer Partikelkonzentration von etwa  $220 \text{ mg/l}$  (ca.  $340 \text{ FNU}$ ) liegt. Da Trübungswerte aus den Feldversuchen einen Maximalwert von  $718 \text{ FNU}$  einnehmen, sind umgerechnete Trübungswerte außerhalb des Eichbereichs mit einem gewissen Fehlerpotenzial behaftet und erlauben nur eine grobe Abschätzung.

Das Sickerwasser von Material RCL 2 zeigt fast während der gesamten Dauer der Feldversuche höhere Trübungswerte im Vergleich zu Becken RCL 1. Erst nach 14 Monaten steigen Trübungswerte in Becken RCL 1 merklich an, erreichen bis Versuchsende jedoch bei weitem nicht die im Sickerwasser von Material RCL 2 aufgetretenen Höchstwerte. Bei Verwendung der ermittelten Korrelation ergibt sich nach Multiplikation der Partikelkonzentration mit dem Beckenabfluss für Becken RCL 1 ca.  $1 \text{ kg}$  an Partikeln ( $> 0,45 \mu\text{m}$ ), die über die gesamte Versuchslaufzeit im Sickerwasser transportiert wurden. Bei Becken RCL 2 beläuft sich die ausgetragene Partikelmenge auf etwa  $5 \text{ kg}$ . Bei Verwendung einer von HOFMANN (1998) ermittelten Korrelation zwischen Partikelkonzentration und Trübung ergeben sich im Vergleich dazu etwas niedrigere Mengen an ausgetragenen Partikeln (Becken RCL 1:  $0,9 \text{ kg}$ ; Becken RCL 2:  $4,3 \text{ kg}$ ).

Die Ergebnisse weisen in jedem Fall darauf hin, dass im Verlauf der Feldversuche insbesondere aus Becken RCL 2 eine erhebliche Partikelmenge ausgetragen wurde.

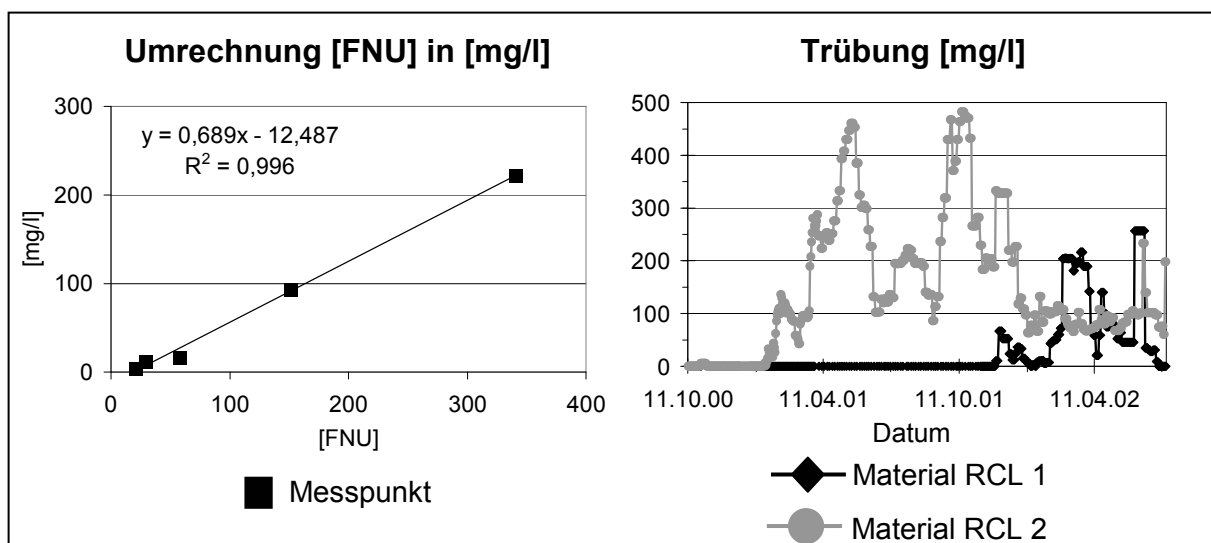


Abbildung 21: Ermittelte Korrelation und daraus abgeleitete Trübungswerte für die Sickerwässer aus den Testfeldern RCL 1 und 2

## 4.3 Laborversuche

### 4.3.1 Ammoniumnitrat-Extrakt

Die Absolutgehalte aus den Ammoniumnitrat-Extrakten aller 19 Recycling-Materialien sind in Abbildung 22 für einige Elemente dargestellt. Bei Chrom liegen der Minimalwert in Probe SI (29  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) und der Höchstwert in Probe BW 1 (1335  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) erheblich auseinander. Auch bei Kupfer besteht ein klarer Unterschied zwischen Kleinstwert in Probe SI (0,15 mg/kg) und Maximalwert in Probe SA 2 (6,15 mg/kg). Deutlich unterschiedliche Absolutgehalte der extrahierten Stoffe ergeben sich auch bei Mangan und Zink. Arsen tritt außer in Material SI in allen Proben auf und weist mit Ausnahme der Gehalte in Probe HH 2 (64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) vergleichsweise ähnliche Gehalte in den Materialien auf. Kobalt und Nickel zeigen mit Ausnahme der Proben HH1, Bb2 und By ebenfalls relativ ähnliche Gehalte. Die Elemente Antimon, Cadmium, Eisen und Selen konnten nicht in den Extrakten aller Materialien nachgewiesen werden. Zu den Stoffen, die überhaupt nicht in den 19 Recycling-Materialien nachgewiesen werden konnten gehören Aluminium, Blei sowie Zinn.

Bei den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 sind teilweise deutlich unterschiedliche Absolutgehalte der extrahierten Stoffe vorhanden. Für Chrom ist der Gehalt im Extrakt von Material RCL 1 mit 575  $\mu\text{g}/\text{kg}$  deutlich höher im Vergleich zu RCL 2 mit 458  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Auch bei Zink ist der Wert bei RCL 1 klar höher als bei RCL 2, dagegen konnte Antimon nur im Extrakt von RCL 2 nachgewiesen werden. Bei Arsen ergeben sich mit 11  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bei RCL 1 und 12  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bei RCL 2 ähnliche Gehalte in beiden Materialien, dasselbe gilt für Kobalt, Kupfer und Molybdän. Selen sowie Cadmium konnten zwar in anderen Recycling-Materialien nachgewiesen werden, aber nicht in RCL 1 und 2.

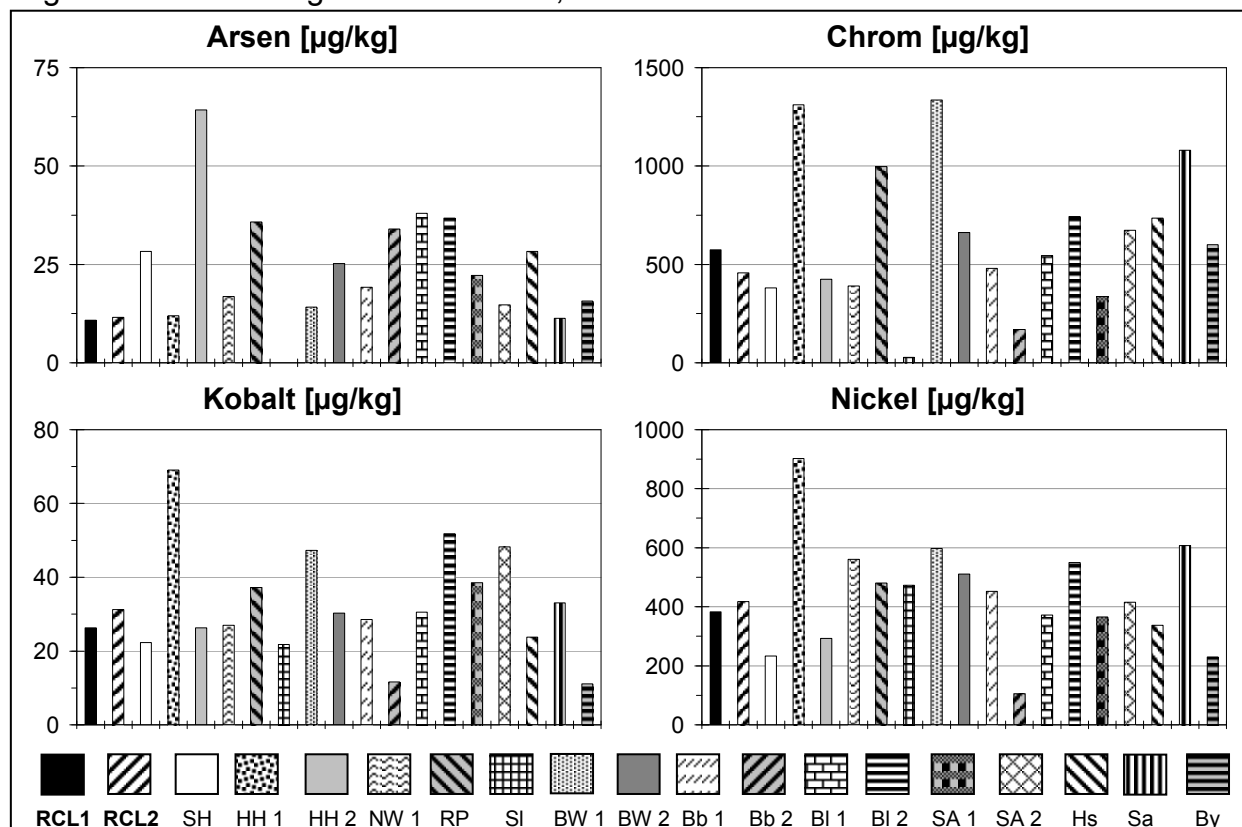


Abbildung 22: Elementgehalte aus den Ammoniumnitrat-Extrakten für alle 19 Recycling-Materialien

### 4.3.2 Kationenaustauschkapazität

Für beide fein gemahlene Testfeld-Materialien wurde die Kationenaustauschkapazität nach KRAUSE et al. (1993) bestimmt. RCL 1 und 2 weisen höhere Werte beim Hintausch als beim Rücktausch auf, wobei Calcium mit Abstand die höchsten Gehalte beim Hintausch einnimmt (Tabelle 22).

Tabelle 22: Kationenaustauschkapazität für die fein gemahlene Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

	Hintausch					Rücktausch
	Ca	Mg	Na	K	Summe Hintausch	
Material RCL 1 [meq/100 g]	16,6	1,3	1,0	1,6	20,5	14,2
Material RCL 2 [meq/100 g]	19,2	1,7	0,9	1,5	23,3	14,6

### 4.3.3 S4-Verfahren und Modifiziertes S4-Verfahren

Ein Vergleich der ermittelten Eluatgehalte nach 24 Stunden aus dem S4- und dem Modifizierten S4-Test mit allen 19 Recycling-Materialien ist in Abbildung 23 für einige Elemente dargestellt.

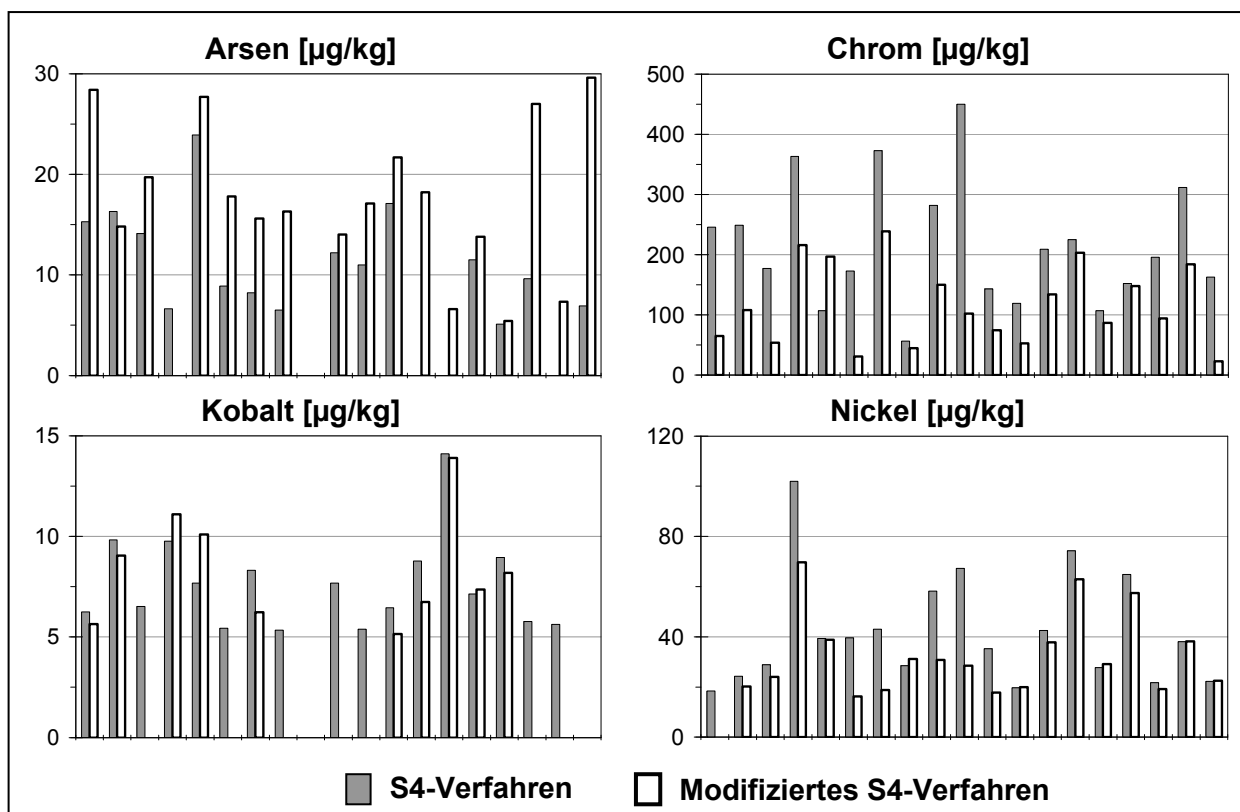


Abbildung 23: Gegenüberstellung von Elementgehalten aus dem S4-Test (jeweils linke Säule) und dem Modifizierten S4-Test (jeweils rechte Säule) für alle 19 Recycling-Materialien (Materialien hier nicht genauer bezeichnet)

In den überwiegenden Fällen treten beim Modifizierten S4-Test die geringeren Gehalte auf. Für Chlorid, Chrom und Molybdän sind bei 18 Recycling-Materialien die Gehalte nach 24 Stunden beim S4-Test höher als beim Modifizierten S4-Test, bei Kobalt und Nickel trifft dies für 14 Proben und bei Kupfer für 13 Proben zu. Ausnahmen bilden Arsen, bei dem 24 Stunden-Werte aus dem Modifizierten S4-Verfahren bei 16 Materialien höher sind als beim S4-Verfahren, Aluminium, bei dem dies für 12 Proben gilt sowie Sulfat, bei dem dies für 10 Proben zutrifft. Zu den Stoffen, die nur bei wenigen der 19 Recycling-Materialien nachgewiesen werden konnten, zählen Antimon, Blei, Eisen, Mangan, Selen und Zinn. Zink konnte in keiner Probe nachgewiesen werden. Beim S4-Verfahren stellen sich mit Ausnahme eines Materials höhere pH-Werte ein als beim Modifizierten S4-Verfahren, bei der Leitfähigkeit gilt dies für alle 19 Materialien.

Bei den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 ist für Arsen, Aluminium und Kupfer keine Tendenz vorhanden, nach der die Gehalte aus einem der beiden Verfahren für beide Materialien jeweils höher sind als aus dem anderen Verfahren. Dagegen sind für Calcium, Chlorid, Chrom, Antimon, Kobalt, Molybdän, Natrium, Nickel sowie Sulfat die Eluatgehalte beider Materialien aus dem S4-Test höher als aus dem Modifizierten S4-Test. Beim Vergleich der Materialien untereinander sind die Gehalte für Aluminium, Chrom, Kupfer, Kobalt, Nickel und Sulfat beim S4- und Modifizierten S4-Test für RCL 2 höher als für RCL 1.

Mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 wurden beim S4- und beim Modifizierten S4-Verfahren Langzeitversuche über 192 Stunden vorgenommen (Abbildung 24).

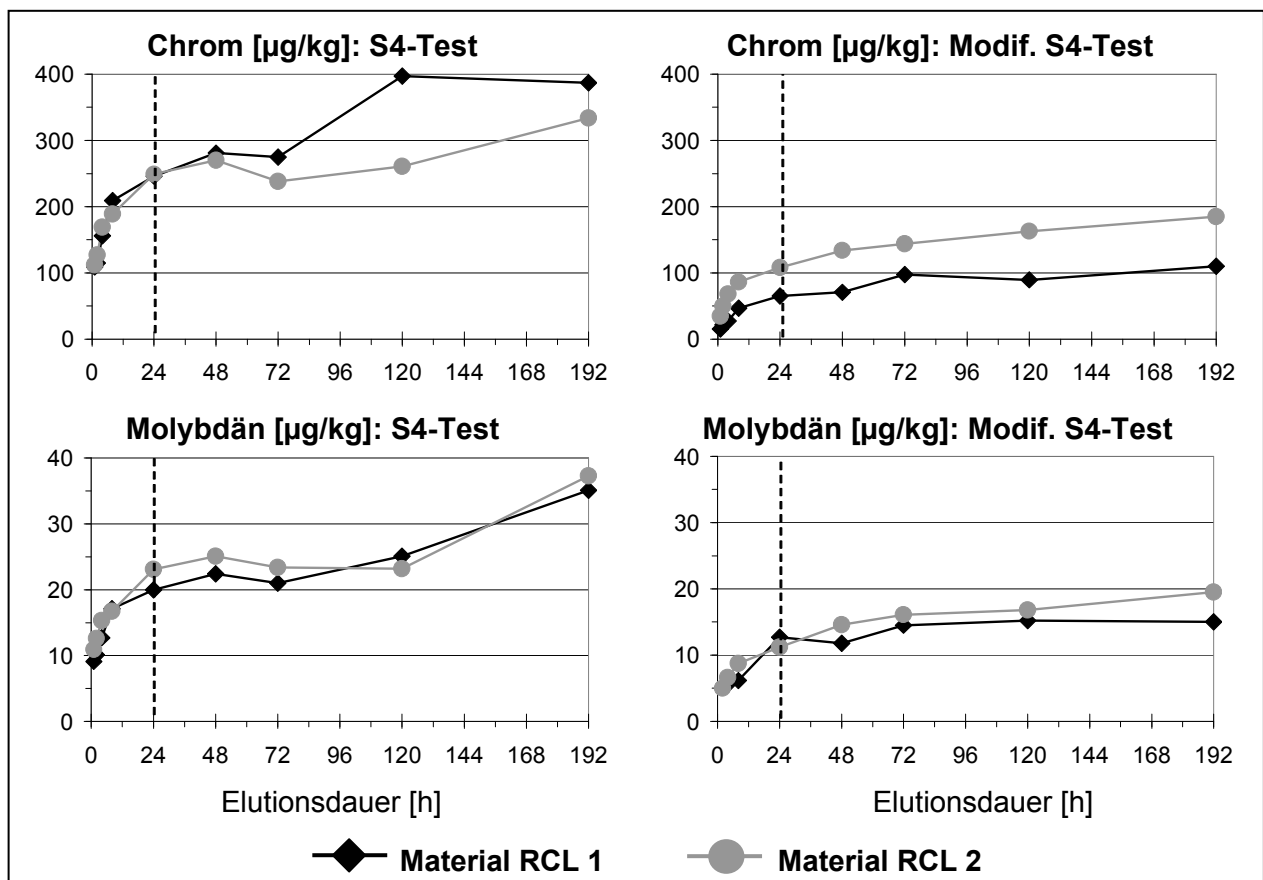


Abbildung 24: Chrom- und Molybdängehalte aus den Langzeitversuchen nach dem S4- (linke Hälfte) und Modifizierten S4-Verfahren (rechte Hälfte) mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

Für Chrom, Molybdän, Calcium, Natrium und Kalium ist bei beiden Verfahren eine Gleichgewichtseinstellung nach der vorgeschriebenen Elutionsdauer von 24 Stunden nicht erreicht, für Sulfat trifft dies beim Modifizierten S4-Verfahren zu.

Eine Plausibilitätskontrolle der ermittelten Hauptelementgehalte aus dem S4- und Modifizierten S4-Verfahren ist nicht möglich, da bei diesen Versuchen anorganische Kohlenstoffgehalte nicht bestimmt wurden.

#### 4.3.4 pH-stat Versuche

Aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 ermittelte Werte für alle 19 Recycling-Materialien sind in Abbildung 25 dargestellt. Bei Arsen liegen mit Ausnahme der Probe Bb 1 (255 µg/kg) im Vergleich zu den anderen untersuchten Elementen relativ geringe Gehaltsschwankungen vor. Nickel und Kupfer sind mit Ausnahme jeweils eines Materials ebenfalls relativ gleichmäßig verteilt. Bei Aluminium, Eisen, Kobalt, Zink, Blei, Calcium und Natrium sind dagegen deutliche Unterschiede in den gemessenen Gehalten der einzelnen Proben erkennbar. Chrom, Zinn, Antimon und Molybdän gehören zu den Elementen, die nicht in den Eluatens aller Recycling-Materialien nachgewiesen werden konnten.

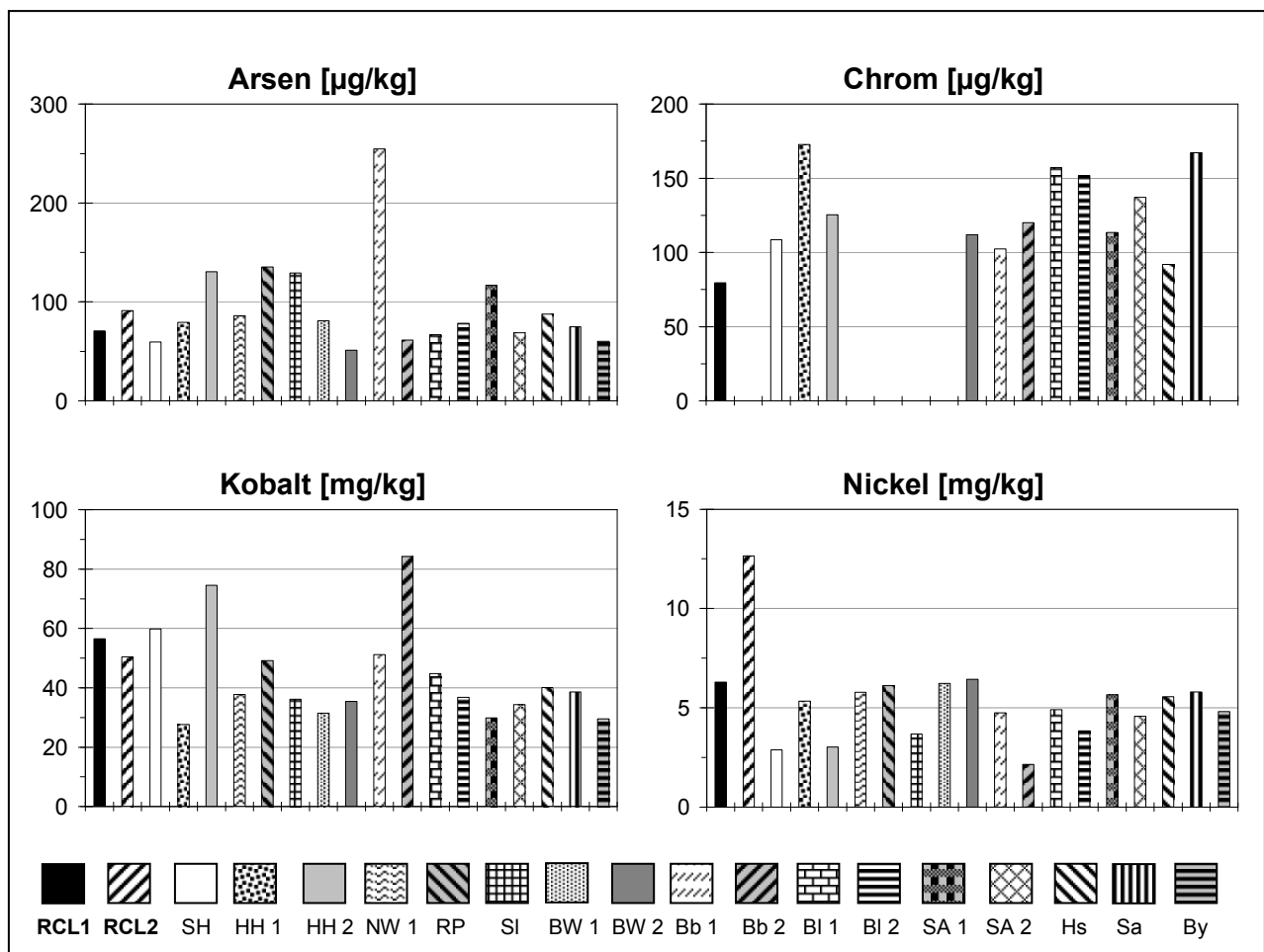


Abbildung 25: Ausgewählte Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 mit den 19 Recycling-Materialien

Bei einem Vergleich der Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 untereinander zeigt sich, dass für Kobalt, Zink, Kupfer, Selen und Calcium ungefähr gleich hohe Gehalte in den

Eluaten beider Materialien vorliegen. Eisen, Blei, Antimon und Arsen haben bei Material RCL 2 deutlich höhere Konzentrationen als bei RCL 1. Bei Material RCL 2 liegen im Vergleich mit allen Recycling-Materialien die höchsten Werte für Nickel vor mit 12,6 mg/kg. Im Gegensatz dazu haben Aluminium, Mangan und Chrom wesentlich höhere Gehalte in den Eluaten von Material RCL 1. Bei beiden Testfeld-Materialien sind die Natrium-Werte vergleichsweise hoch, für Selen liegen dagegen bei RCL 1 und 2 mit 342 bzw. 334 µg/kg mit die niedrigsten Gehalte in den Eluaten aller 19 Recycling-Materialien vor.

Tabelle 23 zeigt die beim pH-stat Versuch bei pH 4 ermittelten Säureneutralisationskapazitäten (SNK) für alle 19 Recycling-Materialien nach 4 Wochen Versuchslaufzeit. Die Pufferkapazität der Materialien kann dabei aus dem Säureverbrauch bis zur Einstellung des pH-Wertes bestimmt werden.

Die geringste SNK hat Recycling-Material Bb 2 mit 1,4 mol/kg, den höchsten Wert hat Material By mit 8,5 mol/kg. Die beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 liegen ungefähr bei dem durchschnittlichen Wert der SNK aller Materialien.

Tabelle 23: Aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 ermittelte Säureneutralisationskapazität (SNK) nach 4 Wochen Versuchslaufzeit für alle 19 Recycling-Materialien

Probenbezeichnung Recycling-Material	SNK nach 4 Wochen [mol/kg]	Probenbezeichnung Recycling-Material	SNK nach 4 Wochen [mol/kg]
RCL 1	2,6	Bb 1	2,2
RCL 2	2,9	Bb 2	1,4
SH	2,1	BI 1	2,9
HH 1	4,1	BI 2	3,7
HH 2	1,7	SA 1	2,4
NW 1	4,5	SA 2	3,3
RP	4,7	Hs	3,3
SI	5,1	Sa	3,0
BW 1	5,8	By	8,5
BW 2	5,3		

Mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 wurden zusätzlich pH-stat Versuche bei pH 2, 6 und 8 durchgeführt (Abbildung 26).

Es lässt sich feststellen, dass bei der überwiegenden Zahl der Elemente höhere Absolutgehalte bei niedrigen pH-Werten für beide Materialien auftreten. Ausnahmen bilden Antimon und Molybdän, bei denen größere Absolutgehalte bei höheren pH-Werten vorkommen. Für Zink, Kupfer, Molybdän und Calcium sind die Gehalte in beiden Materialien bei allen vier eingestellten pH-Werten relativ ähnlich.

Im stark sauren Bereich bei pH 2 sind Gehalte von Aluminium, Eisen, Zinn und Natrium bei RCL 1 deutlich höher als bei RCL 2, für Chrom, Arsen und Blei verhält sich dies umgekehrt. Für pH 2, 4 und 6 haben Mangan, Kobalt und Cadmium höhere Gehalte bei Material RCL 1, dagegen kommt Nickel in diesen pH-Bereichen in größeren Konzentrationen bei Material RCL 2 vor. Antimon hat bei allen vier eingestellten pH-Werten höhere Gehalte bei RCL 2 als bei RCL 1.

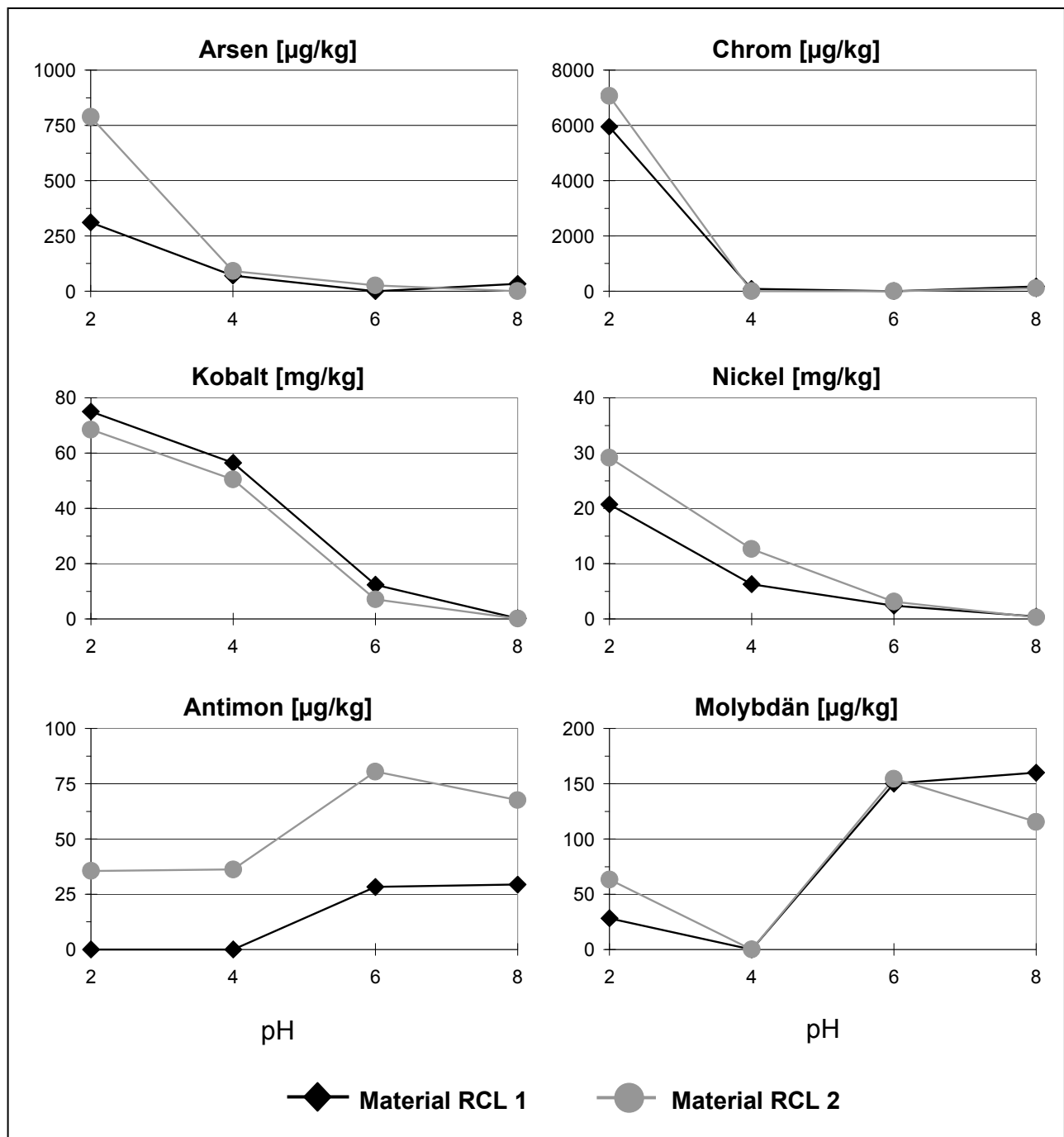


Abbildung 26: Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und RCL 2

In Abbildung 27 ist die aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6 und 8 ermittelte SNK dargestellt, wobei die Kurven bei beiden Materialien einen jeweils ähnlichen Verlauf einnehmen. Mit Ausnahme der für pH 8 ermittelten Kurven liegt bei Material RCL 2 eine geringfügig höhere SNK vor im Vergleich zu Material RCL 1. Das Abflachen der Kurven bei pH 2, 4 und 8 deutet an, dass mit zunehmender Versuchslaufzeit keine wesentliche Säurezugabe erforderlich war, um den jeweiligen pH-Wert einzustellen. Am Kurvenverlauf zu pH 6 zeigt sich dagegen, dass auch gegen Ende der vierwöchigen Laufzeit eine deutlich erkennbare Säurezugabe erfolgen musste, um den pH-Wert für beide Materialien einzustellen.

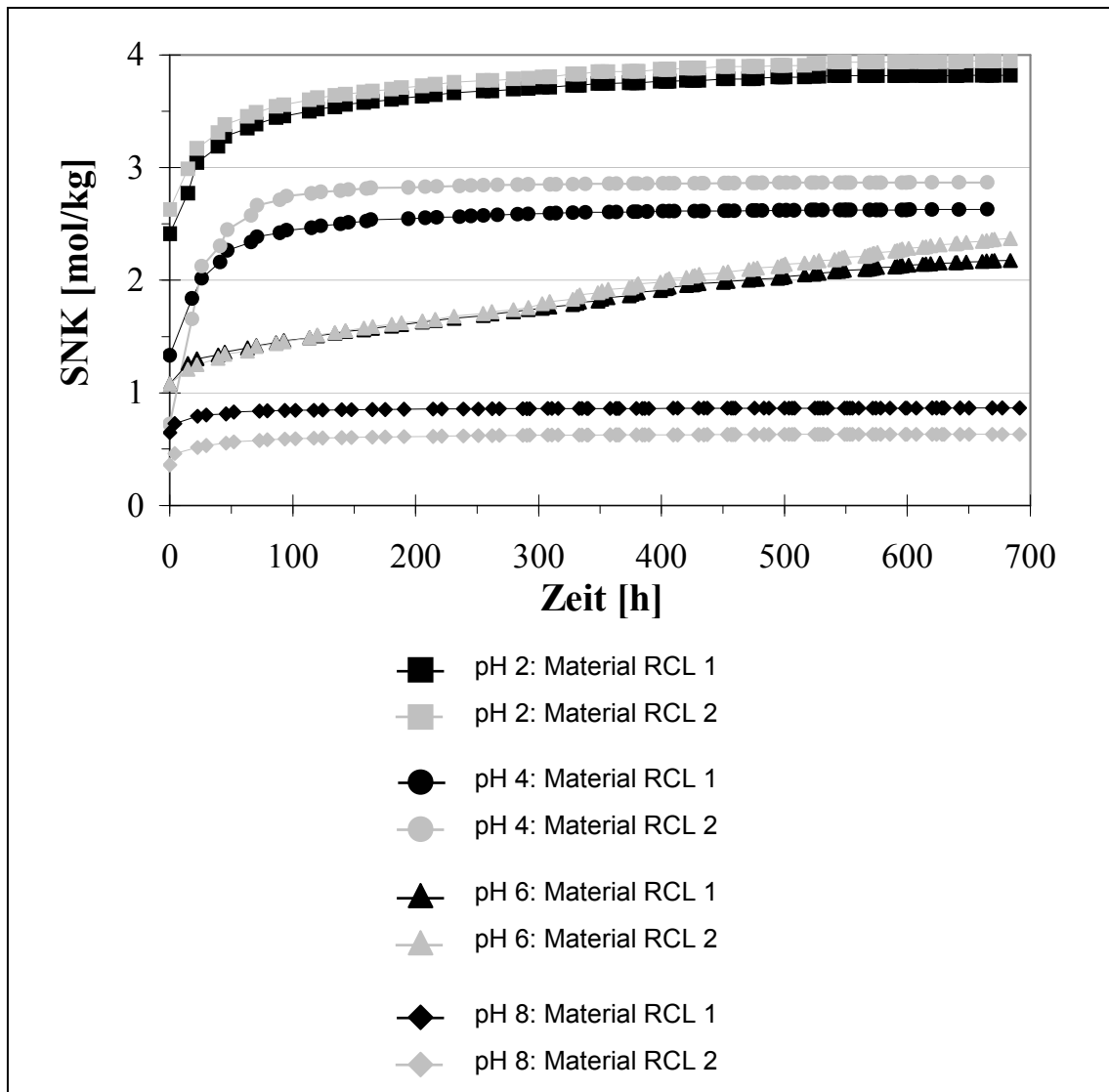


Abbildung 27: Säureneutralisationskapazität (SNK) aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

#### 4.3.5 Säulenversuche

Ergebnisse aus den Säulenversuchen mit Testfeld-Material RCL 1 sind in Abbildung 28 dargestellt. Plausibilitätskontrollen wurden exemplarisch gegen Ende der Säulenversuche per Titration durchgeführt. Vereinzelt Abweichungen  $\geq 10\%$  bei der Ionenbilanz sind vorwiegend auf deutliche Schwankungen bei den aus der Titration ermittelten Gehalten an  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  und  $\text{HCO}_3^-$  zurückzuführen, da pH-Werte und Hauptelementkonzentrationen zu diesem Versuchszeitpunkt relativ konstant verlaufen.

Bei den **pH-Werten** gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Säulen mit der geringeren (natürlichen) Beregnungsrate (Säule 1 und 2) und den Säulen mit der erhöhten Beregnungsrate (Säule 3 und 4). Während die Eluate aus den Säulen 1 und 2 für die gesamte Versuchsdauer pH-Werte um 8 zeigen, steigen die Werte für Säule 3 auf über 10 und für Säule 4 auf über 11 an.

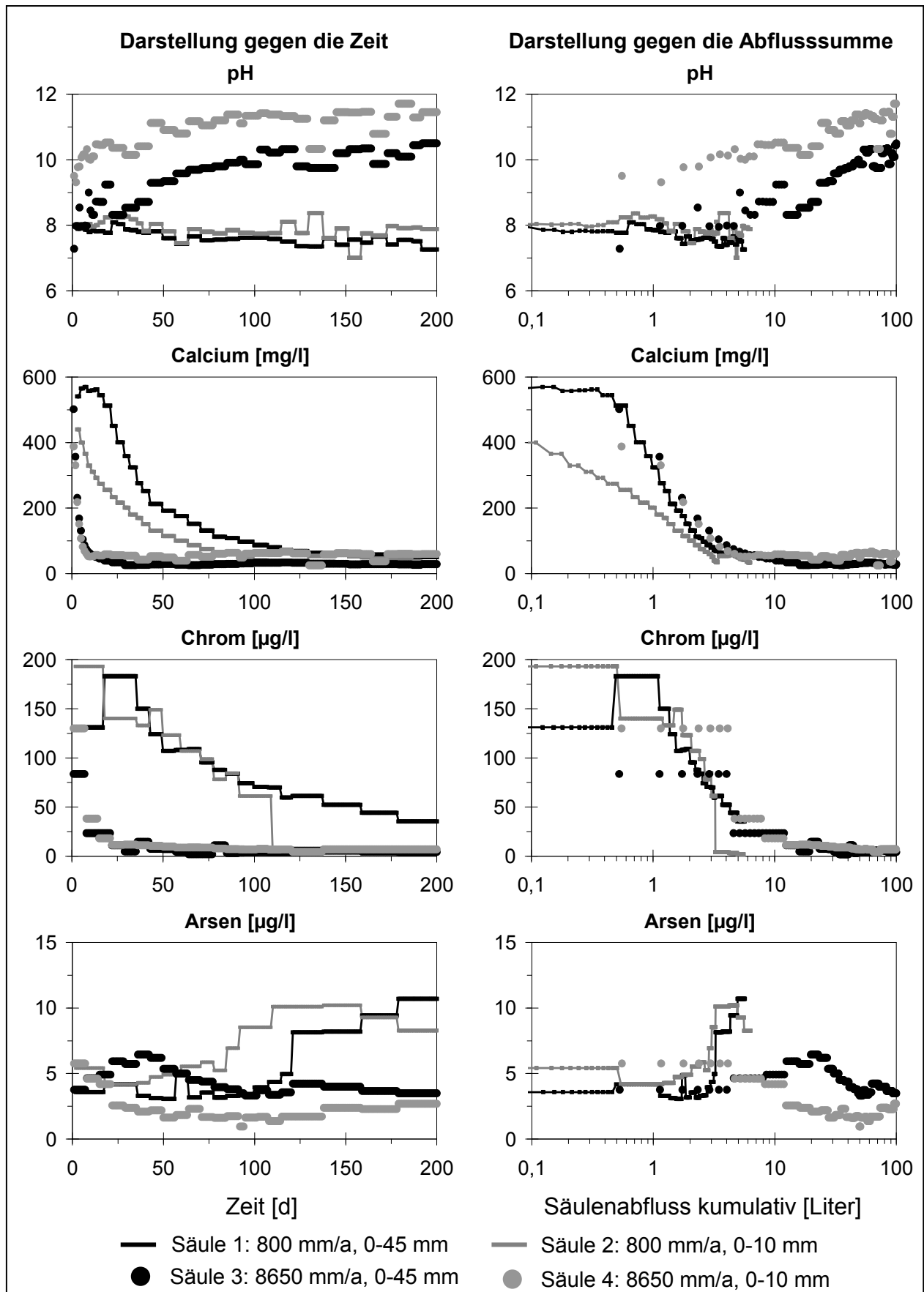


Abbildung 28: Ausgewählte Ergebnisse aus den Säulenversuchen mit Testfeld-Material RCL 1 mit Darstellung gegen die Zeit (linke Hälfte) und Darstellung gegen die Abflusssumme (rechte Hälfte)

Die höchsten **Calcium**konzentrationen kommen in den Eluaten von Säule 1 (natürliche Beregnungsrate, ungebrochen) vor, wogegen Säule 2 (natürliche Beregnungsrate, klein gebrochen) durchweg niedrigere Gehalte aufweist. Bei den Säulen 3 und 4 nehmen die Calciumkonzentrationen in kurzer Zeit stark ab, bis ein relativ konstanter Wert erreicht wird. Ähnlich zu Calcium verlaufen die Kurven für die Leitfähigkeit.

Für **Chrom** ist bei Säule 1 und 2 ein allmählicher Abfall von der Anfangskonzentration von etwa 200 µg/l zu erkennen, dagegen sinken die Gehalte in Säule 3 und 4 in den ersten 25 Tagen Laufzeit schnell ab.

Ein anderes Muster zeigt sich für **Arsen**, da in Säule 1 Konzentrationen während der Versuchslaufzeit kontinuierlich ansteigen bis auf Werte über 10 µg/l. Auch in Säule 2 nehmen Konzentrationen zunächst zu und sinken nach etwa 150 Tagen Laufzeit wieder geringfügig ab. In den Säulen mit erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) ändern sich Arsenkonzentrationen zwischen Versuchsbeginn und – ende unwesentlich.

In Säule 1 mit natürlicher Beregnung und ungebrochenem Material treten für Sulfat, Calcium, Kobalt und Selen die höchsten Konzentrationen aller vier Säulen auf. Arsen, Chrom, Molybdän und Zinn haben ähnlich hohe Werte in Säule 1 und 2. In Säule 3 mit erhöhter Beregnungsrate und ungebrochenem Material treten im Vergleich die höchsten Werte für Antimon und Mangan auf, in Säule 4 (erhöhte Beregnungsrate, klein gebrochen) erreichen Aluminium und Kupfer die höchsten Konzentrationen aller vier Säulen. In Säule 1 ist für Natrium, Arsen, Chrom, Kupfer und Molybdän auch nach 200 Tagen Versuchslaufzeit noch kein konstanter Zustand erreicht, bei Säule 2 gilt dies für Natrium, Arsen und Molybdän.

Bei Auftragung der Konzentration gegen die **Zeit** (Abbildung 28, linke Hälfte) nehmen bei erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) die Stoffkonzentrationen erheblich schneller ab als bei der natürlichen Beregnungsrate (Säule 1 und 2).

Bei Auftragung der ermittelten Eluatkonzentrationen gegen die **Abflusssumme** (Abbildung 28, rechte Hälfte) zeigt sich, dass die Konzentrationskurven für die Säulen mit dem ungebrochenem Material (Säule 1 und 3) und mit dem klein gebrochenen Material (Säule 2 und 4) relativ gut übereinstimmen für Sulfat, Chlorid, Calcium, Natrium, Magnesium, Kupfer und Nickel. Bei Säule 2 und 4 trifft dies außerdem noch für Antimon zu.

Aus einem Tracerversuch, der bei allen vier Säulen durchgeführt wurde, ergibt sich als mittlere Verweilzeit des Markierungsmittels eine Dauer von 29 Tagen in Säule 1. In Säule 2 liegt dieser Wert bei 43 Tagen, wobei hier der Tracerdurchgang nicht ganz abgeschlossen war und dementsprechend die Verweilzeit des Markierungsmittels in Wirklichkeit etwas länger ausgefallen sein wird. Bei den Säulen mit erhöhter Beregnungsrate treten wesentlich geringere Werte mit einer mittleren Verweildauer des Markierungsmittels von 51 Stunden in Säule 3 und 64 Stunden in Säule 4 auf.

Bei Multiplikation der Trübungswerte mit dem Säulenabfluss ergeben sich über die Versuchslaufzeit 3,1 mg an Partikeln, die bei Säule 1 ausgetragen wurden und 3,9 mg bei Säule 2. Bei den Säulen mit erhöhter Beregnung sind Werte mit 39,4 mg (Säule 3) bzw. 34,8 mg (Säule 4) im Vergleich um einen Faktor von etwa 10 größer.

#### 4.3.6 Weitere Elutionsversuche

An weiteren Laborversuchen wurden **Langzeit-Standtests** mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 in Originalkorngröße durchgeführt. Außerdem erfolgten **Schüttelversuche** mit den fein gemahlene Materialien RCL 1 und 2 **bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen**. Ergebnisse aus diesen beiden Versuchen sind in Abbildung 29 dargestellt.

pH-Werte beim Langzeit-Standtest liegen deutlich im alkalischen Bereich mit einem Wert von pH 9,8 bei Material RCL 1 und 10,9 bei RCL 2. Dasselbe gilt für die Schüttelversuche, wobei mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis pH-Werte zwar leicht abnehmen, jedoch größer als pH 10 bei RCL 1 und 2 sind. Eine vergleichbare Tendenz zeigen Leitfähigkeitswerte, die mit zunehmendem Wasser/Feststoff-Verhältnis ebenfalls geringere Werte aufweisen.

Ermittelte Ionenbilanzen zeigen bei der Elektroneutralität eine Abweichung  $\leq 5\%$  bei den Schüttelversuchen mit Ausnahme des Wasser/Feststoff-Verhältnisses von 2:1 bei Material RCL 2, wo eine größere Abweichung auftritt. Da bei diesem Versuch ermittelte  $\text{OH}^-$ - und  $\text{CO}_3^{2-}$ -Konzentrationen deutlich abweichen von den bei den anderen Schüttelversuchen ermittelten Gehalten trotz ähnlicher pH-Werte, ist der Ionenbilanzfehler auf Ungenauigkeiten bei der Titration zurückzuführen. Beim Langzeit-Standtest tritt ein Ionenbilanzfehler  $\leq 10\%$  auf, womit die bei diesem Versuch ermittelten Gehalte bei den Hauptelementen ebenfalls noch als plausibel angesehen werden können.

Für beide Materialien sind bei der überwiegenden Zahl der Elemente die Konzentrationen bei den Langzeit-Standtests größer als bei den Schüttelversuchen. Lediglich für Nitrat, Kalium, Aluminium, Blei, Kobalt und Mangan liegen bei den Schüttelversuchen höhere Konzentrationen vor.

Eine deutliche Konzentrationsabnahme ist mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis bei Chlorid, Nitrat, Natrium, Kalium, Chrom, Kupfer und Molybdän für RCL 1 und 2 zu erkennen. Kobaltkonzentrationen nehmen bei beiden Materialien bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 20:1 ebenfalls deutlich ab, jedoch fallen bei den Verhältnissen 100:1 und 200:1 höhere Konzentrationen auf. Dies ist auf eine unterschiedliche Probecharge zurückzuführen, die für die Schüttelversuche bei diesen Wasser/Feststoff-Verhältnissen verwendet wurde.

Sulfat und Calcium zeigen bei RCL 1 und 2 vergleichsweise geringe Konzentrationschwankungen bei kleineren Wasser/Feststoff-Verhältnissen, dasselbe gilt für Aluminium, Arsen und Silicium bei allen untersuchten Wasser/Feststoff-Verhältnissen.

Bei den Schüttelversuchen treten höhere Gehalte an Massenanteilen für alle betrachteten Elemente auf im Vergleich zu den Langzeit-Standtests. Bei ansteigenden Wasser/Feststoff-Verhältnissen ist eine deutliche Zunahme der Massenanteile bei Sulfat, Calcium, Aluminium, Arsen und Silicium für RCL 1 und 2 zu erkennen. Dagegen liegen für Chlorid und Nitrat vergleichsweise konstante Massenanteile vor. Kobalt und Molybdän zeigen ebenfalls relativ konstante Werte, wenn die aus einer anderen Probecharge stammenden Ergebnisse bei 100:1 und 200:1 nicht berücksichtigt werden. Die weiteren Elemente zeigen überwiegend eine leichte Zunahme der Massenanteile bei ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis.

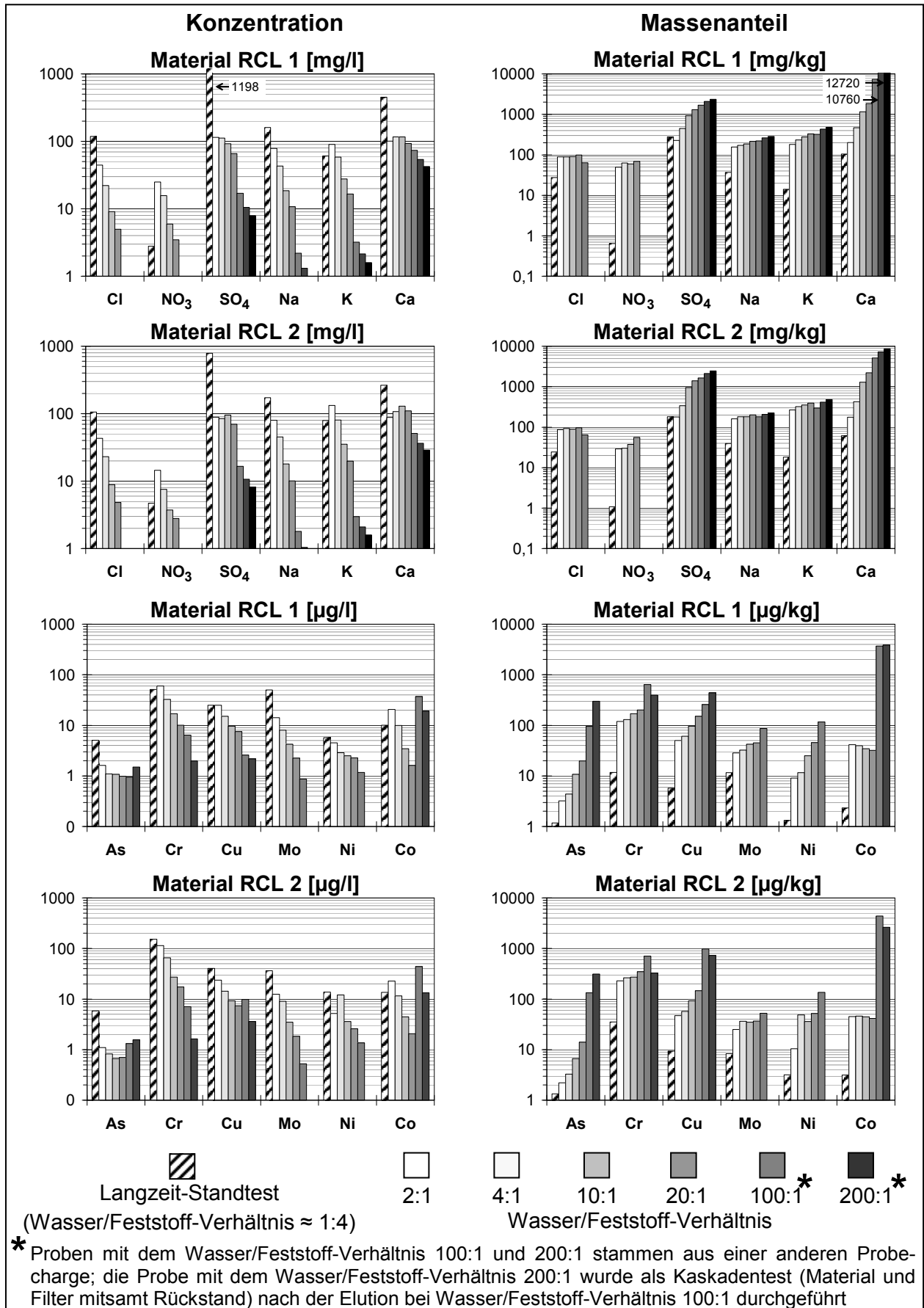


Abbildung 29: Ergebnisse für Konzentrationen (linke Hälfte) und Massenanteile (rechte Hälfte) aus dem Langzeit-Standtest (Originalkorngöße) und Schüttelversuchen (fein gemahlen) bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

Es wurden mit den Materialien RCL 1 und 2 **Schüttelversuche** mit festem Wasser/Feststoff-Verhältnis und **unterschiedlichen Korngrößen** (fein gemahlen, < 10 mm (S4-Test), < 32 mm (Modifizierter S4-Test)) durchgeführt. Beim fein gemahlene Material ergab die Plausibilitätskontrolle eine Abweichung  $\leq 5\%$  hinsichtlich der Elektroneutralität. Höhere Massenanteile bei kleineren Korngrößen treten für beide Materialien bei Natrium, Kalium, Calcium, Chrom, Molybdän und Blei auf. Sowohl pH-Wert als auch elektrische Leitfähigkeit nehmen höhere Werte bei den kleineren Kornfraktionen ein. Für RCL 1 und 2 treten bei Nitrat, Arsen und Nickel höhere Gehalte bei den größeren Fraktionen auf.

Mit den identifizierten, fein gemahlene **Einzelkomponenten von Material RCL 1** wurden **Schüttelversuche** durchgeführt, von denen ermittelte Massenanteile in Abbildung 30 dargestellt sind.

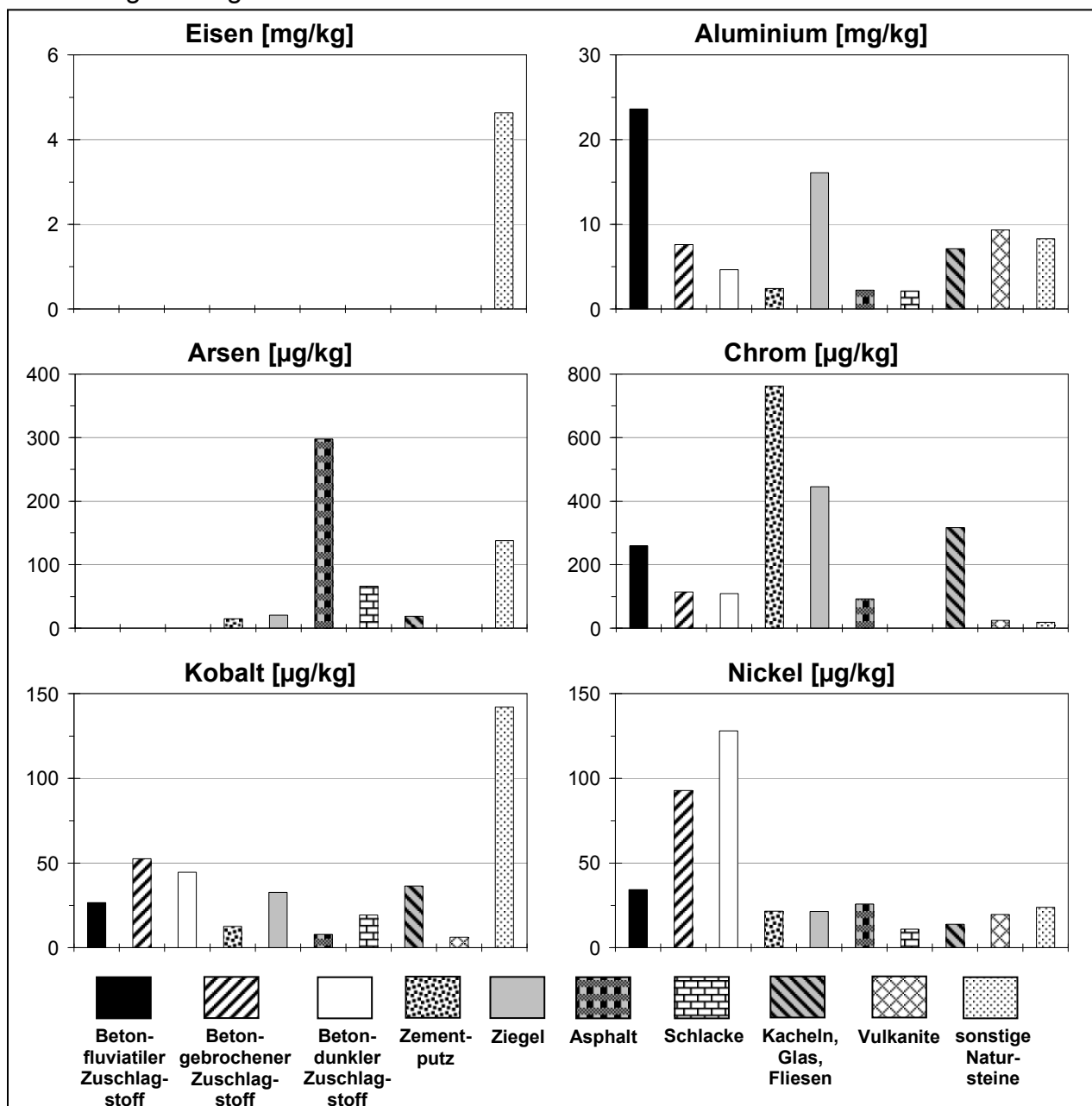


Abbildung 30: Ermittelte Massenanteile aus Schüttelversuchen mit den fein gemahlene Einzelkomponenten aus Material RCL 1

Ermittelte Ionenbilanzen zeigen bei der Elektroneutralität eine Abweichung  $\leq 8\%$  bei den Schüttelversuchen mit Ausnahme von Zementputz, Kacheln, Glas und Fliesen sowie Vulkaniten. Da bei diesen Einzelkomponenten eine größere Abweichung auftritt, sind hierbei ermittelte Gehalte an Hauptelementen lediglich als grobe Anhaltswerte anzusehen.

Bei den drei Betonarten mit jeweils unterschiedlichem Zuschlagstoff treten die höchsten Gehalte an Calcium, Kalium, Nitrat, Aluminium und Nickel auf. Kobalt und Kupfer haben bei Beton jeweils den zweithöchsten Wert im Vergleich mit den anderen Einzelkomponenten. Sulfat kommt bei Ziegeln und einer der drei Betonarten in höheren Konzentrationen im Eluat vor. Vulkanite, Zementputz sowie Kacheln, Glas und Fliesen weisen ebenfalls hohe Sulfatgehalte im Eluat auf, die ermittelten Werte können jedoch lediglich nur als Anhaltspunkt verwendet werden.

Arsen und Molybdän haben vergleichsweise hohe Werte in den Eluaten von Asphalt sowie Schlacke. Aus Zementputz wurden die höchsten Gehalte an Chrom und Kupfer eluiert. Die Einzelkomponente Ziegel fällt auf durch die jeweils zweithöchsten Konzentrationen an Aluminium und Chrom, Arsengehalte liegen deutlich unter denen aus Asphalt und Schlacke. Bei den zusammengefassten sonstigen Natursteinen wurden der Höchstwert an Kobalt sowie ein hoher Wert an Arsen gemessen. Des Weiteren konnte bei den sonstigen Natursteinen als einziger Komponente Eisen im Eluat nachgewiesen werden.

Mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 wurden ebenfalls **Schüttelversuche** analog dem S4-Verfahren mit jeweils zwei **unterschiedlichen Probechargen** pro Material durchgeführt. Aus jeder Charge wurden sechs Proben hergestellt, so dass insgesamt 12 Proben pro Material für 24 Stunden geschüttelt wurden. Die Ionenbilanz zeigt bei der Elektroneutralität eine Abweichung  $> 10\%$  bei 3 Proben von Material RCL 1 sowie 1 Probe von RCL 2, wodurch die bei diesen Proben ermittelten Gehalte nicht genauer bewertet werden und daher in Abbildung 31 nicht dargestellt sind.

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Elemente Chlorid, Natrium und Kalium bei RCL 1 und 2 in den jeweiligen Chargen ungefähr gleich hohe Gehalte in den Eluaten aufweisen. Dagegen treten für Sulfat und Calcium teilweise nicht nur deutliche Unterschiede zwischen den beiden Chargen bei RCL 1 und 2 auf, sondern auch die Massenanteile in den jeweiligen Proben pro Charge weichen zum Teil erheblich voneinander ab (Abbildung 31).

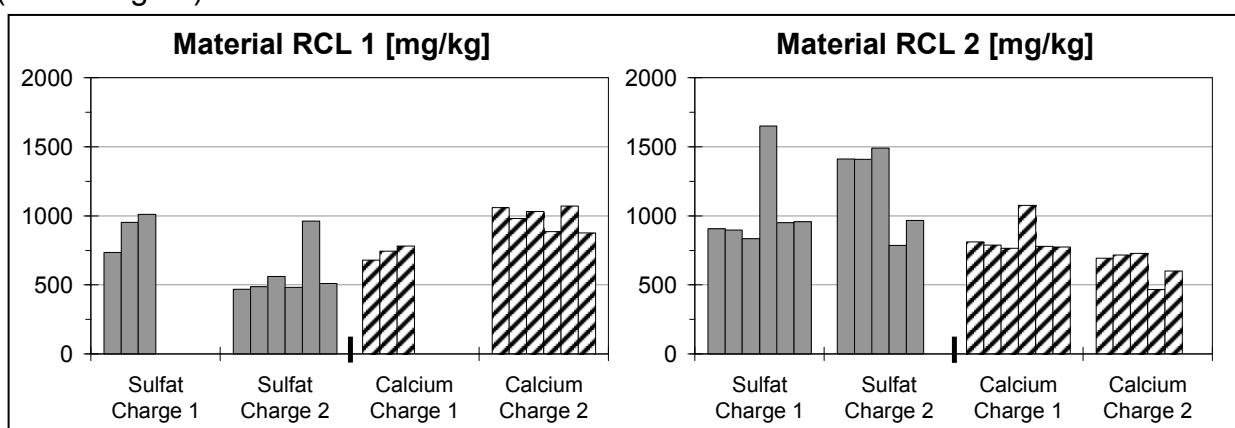


Abbildung 31: Ermittelte Massenanteile aus Schüttelversuchen nach dem S4-Verfahren mit jeweils zwei unterschiedlichen Probechargen bei Material RCL 1 und 2 zur Untersuchung der Materialheterogenität

## 5 Interpretation und Diskussion

### 5.1 Charakterisierung der Recycling-Materialien

#### 5.1.1 Korngröße, Elementgehalte und Stoffgruppen

Beide Testfeld-Materialien lagen ebenso wie weitere 11 der 19 Recycling-Materialien in der **Korngröße** 0 - 45 mm vor. Diese Lieferkörnung trat bei einer Erhebung von KRASS et al. (1999a) als die bei der Bauschutttaufbereitung mit Abstand am häufigsten Hergestellte auf. Die Lieferkörnung 0 - 32 mm kam danach ebenfalls bei den hergestellten Korngemischen vor, jedoch mit einem deutlich geringeren Anteil. Bei den 19 untersuchten Recycling-Materialien wurden demzufolge die wesentlichen Lieferkörnungen, die bundesweit bei der Aufbereitung hergestellt werden, erfasst.

Bei den **Elementgehalten**, die aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen ermittelt wurden, zeigt sich eine positive Korrelation zwischen Eisen und Chrom bei den 19 Recycling-Materialien (Abbildung 32). Nach KIM et al. (2002) weisen Chrom- und Eisengehalte von Gesteinen oft Parallelen auf, da die chemischen Eigenschaften beider Elemente ähnlich sind und Cr(III) daher in vielen Mineralen Fe isomorph ersetzen kann. Daher könnte bei den Recycling-Materialien bei höheren Eisenanteilen entsprechend mehr Chrom eingebunden worden sein. Bei Eisen und Nickel zeichnet sich ebenfalls eine positive Korrelation zwischen den Gehalten in den Recycling-Materialien ab.

Für eine Charakterisierung von Recycling-Materialien können somit aus ermittelten Eisengehalten Chrom- und Nickelgehalte grob abgeschätzt werden, für die restlichen untersuchten Elemente funktioniert dies allerdings nicht.

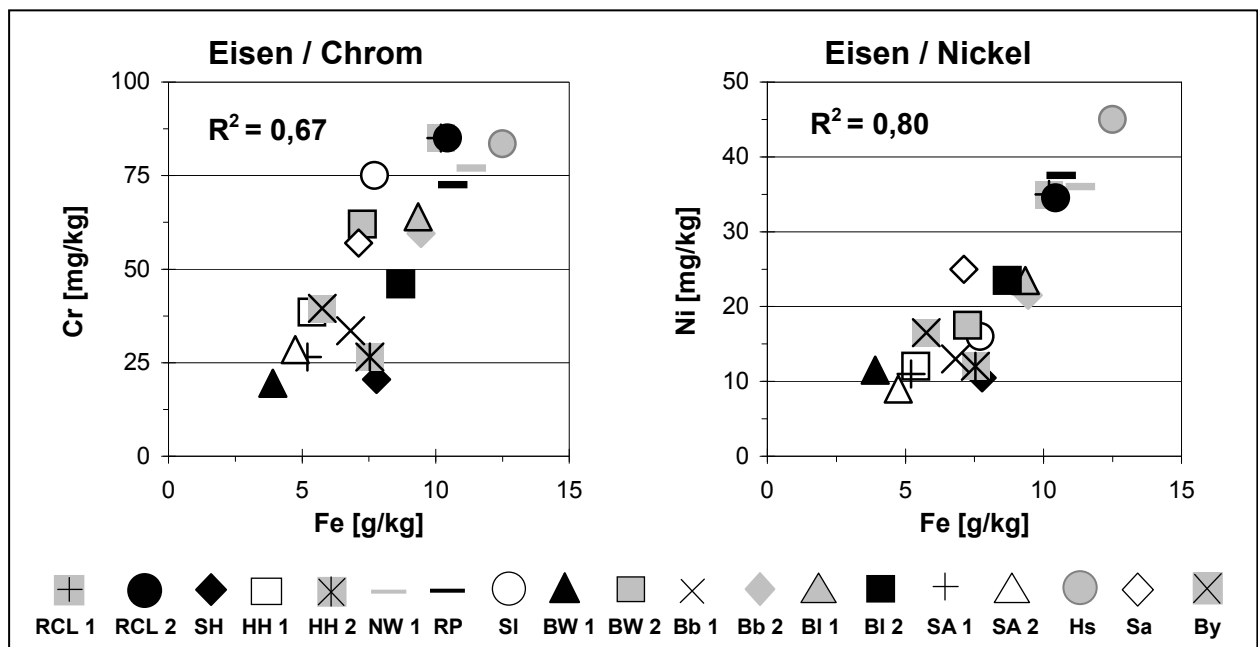


Abbildung 32: Korrelation ermittelter Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen der 19 Recycling-Materialien

Die Einzelkomponenten von Material RCL 1 weisen ebenfalls eine Korrelation bei den Gehalten von Eisen und Chrom bzw. Eisen und Nickel auf (Abbildung 33). Während bei

den zusammengefassten sonstigen Natursteinen und einer der Betonarten (gebrochener Zuschlagstoff) hohe Gehalte auftreten, kommen niedrige Gehalte bei Zementputz, Kacheln, Glas und Fliesen sowie bei einer weiteren Betonart (fluviatiler Zuschlagstoff) und Vulkaniten vor. Demzufolge ist es nicht möglich, hohe Eisen-, Nickel- und Chromgehalte insgesamt einer größeren **Stoffgruppe**, wie Beton oder Natursteinen, zuzuordnen.

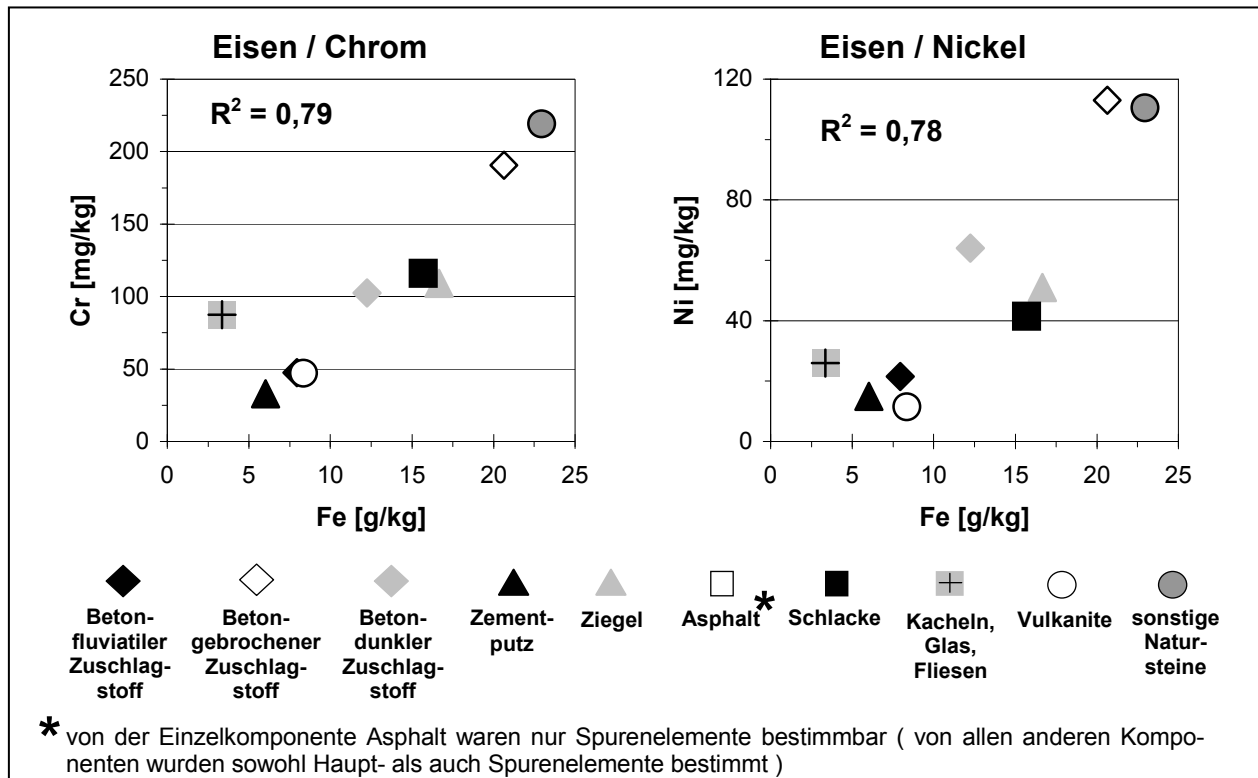


Abbildung 33: Korrelation ermittelter Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für identifizierte Einzelkomponenten aus Material RCL 1

Sowohl die optische Untersuchung (SCHÄFER 2002) als auch die Prüfberichte der Lieferanten zeigen teilweise erhebliche Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der Recycling-Materialien auf. Eine Betrachtung von Totalgehalten an Elementen aus der **RFA** und Recycling-Materialien, bei denen bestimmte **Stoffgruppen** in ähnlichen Massenanteilen vorkommen, zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang. Daher ist es nicht möglich, genauere Rückschlüsse von der stofflichen Zusammensetzung auf Elementgehalte der Recycling-Materialien zu ziehen.

Ein Ergebnisvergleich zwischen der **RFA** und dem **Aufschluss mit Königswasser** zeigt, dass bei der überwiegenden Anzahl der Materialien ermittelte Massenanteile aus der Charakterisierung mit RFA höher sind als aus dem Königswasser-Aufschluss. Für die Ermittlung von Elementgehalten in Recycling-Materialien bietet sich daher die RFA als geeignete Methode an. Nach HIRNER et al. (1998) ist für anorganische Stoffe die RFA eine schnelle Screening-Methode, die zudem den Vorteil hat, dass keine chemische Probenvorbehandlung notwendig ist.

Aus den Ergebnissen des Königswasser-Aufschlusses sind ebenfalls keine Rückschlüsse möglich auf zu erwartende Elementgehalte auf Grund der stofflichen Zusammensetzung der Recycling-Materialien.

### 5.1.2 Pufferkapazität

pH-stat Versuche bei pH 2, 4, 6 und 8 mit den fein gemahlene Testfeld-Materialien RCL1 und 2 zeigen, dass insbesondere bei pH 2 und 4 Kurven zur **Säureneutralisationskapazität** zunächst rasch ansteigen (Abbildung 27). Nach etwa 50 Stunden Versuchslaufzeit ist eine Abflachung erkennbar, was auf zwei Mechanismen hinweist, die einer pH-Wert Änderung entgegen wirken. Nach VAN DE SAND & FISCHER (1994) kann bei Pufferreaktionen zunächst eine schnellere Oberflächenreaktion auftreten, bei der Ionenaustausch der dominante Mechanismus ist. Darauf folgt eine langsamere Reaktion, die diffusionskontrolliert ist.

Der Carbonatpufferbereich erstreckt sich in der Bodenlösung von pH 8,6 – 6,2 (GDCH 1996, MATTHEß 1990), kann nach MERKEL & PLANER-FRIEDRICH (2002) aber auch bis pH 5,5 wirksam sein. Er ist charakterisiert durch die schnelle Lösungskinetik von Carbonaten, wie beispielsweise Calcit (APPELO & POSTMA 1999). Da Calciumgehalte in beiden Materialien im pH-Bereich von 8 – 4 ansteigen ist davon auszugehen, dass die Säurezugabe beim pH-stat Versuch bis pH 4 vornehmlich durch calciumhaltige Phasen gepuffert wurde (Abbildung 34). Ein Rückgang der Gehalte bis pH 2 zeigt das Auftreten anderer, pufferwirksamer Phasen an. Bei pH-stat Versuchen mit Bauschutt-Materialien von JOHNSON et al. (1999) trat Calcit als wesentliches Mineral für die Pufferung auf.

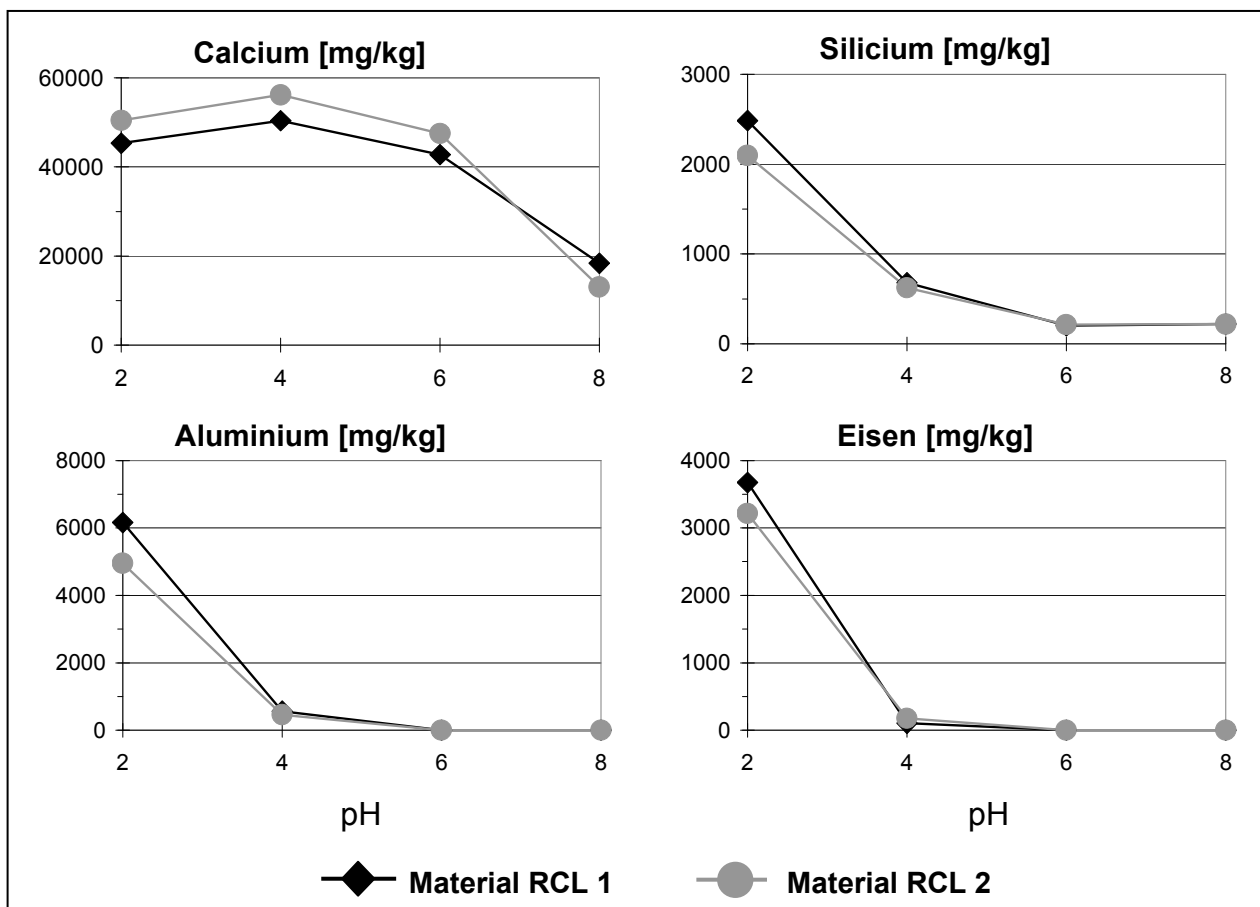


Abbildung 34: Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

Unterhalb des Carbonatpufferbereichs bis etwa pH 5 kann bei längerer Kontaktzeit

zwischen Material und Eluent die Silicatverwitterung als Pufferprozess wirksam werden, wobei sich Silicate vergleichsweise langsam lösen (APPELO & POSTMA 1999, VOIGT 1990). Stoffgehalte aus dem pH-stat Versuch deuten an, dass vor allem im pH-Bereich  $< 6$  Pufferung durch siliciumhaltige Phasen auftritt. Demnach ermöglichten die lange Versuchslaufzeit von 4 Wochen sowie die Untersuchung der Materialien in Feinfraktion, dass Silicate zur Pufferung der Säurezugabe beitragen konnten. Als silicathaltige Verbindungen kommen in den zementbürtigen Materialien beispielsweise CSH-Phasen vor (Abschnitt 2.3), die durch Auflösung ab einem pH-Wert von  $9 - 8$  pufferwirksam werden können (HIRSCHMANN & FÖRSTNER 2000a). Untersuchungen von BMV (1998) mit Recycling-Baustoffen und pH-stat Versuchen bei pH 4 ergaben, dass an der Pufferkapazität neben dem Carbonatpuffer auch silicatische Pufferungssysteme beteiligt waren, deren Bereiche zum Teil den pH-Wert von 4 einschließen.

Bei pH-Werten kleiner 5 puffern vornehmlich Al-Hydroxide, wobei Gibbsit eine relativ schnelle Lösungskinetik besitzt und durch die Pufferreaktion Aluminiumgehalte steigen. Im pH-Bereich kleiner 3 spielen Fe-Hydroxide eine wichtige Rolle bei der Pufferung (APPELO & POSTMA 1999, GDCH 1996). Aluminiumgehalte aus dem pH-stat Versuch deuten eine Pufferung im pH-Bereich von  $6 - 2$  durch aluminiumhaltige Phasen wie Gibbsit an. Eine deutliche Zunahme der Eisengehalte für beide Materialien im pH-Bereich  $4 - 2$  weist auf eine Pufferung durch eisenhaltige Phasen in den Recycling-Materialien hin.

Die pH-stat Versuche zeigen, dass sich im Versuchsverlauf bei pH 2, 4 und 8 ein Gleichgewicht einstellt zwischen Eluat und Material (Abbildung 27). Dagegen liegt bei pH 6 für RCL 1 und 2 auch nach 4 Wochen Versuchslaufzeit noch kein Gleichgewicht vor. Eine Erklärung hierfür ist die zunehmende Auflösung von puffernden Primärphasen mit langsamer Lösungskinetik im Hydrogencarbonat-Pufferbereich. Nach Untersuchungen von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (2000a) mit Schlacke war bei pH-stat Versuchen bei pH 4 vor allem Calciumcarbonat für die Pufferung im pH-Bereich  $7 - 5,5$  verantwortlich. Daneben waren aber auch Phasen für die Säurepufferkapazität bedeutsam, die erst längerfristig pufferwirksam werden. Dies wird auf eine wesentlich langsamere Auflösungskinetik vieler Silicate zurückgeführt.

Mit der Durchführung von pH-stat Versuchen bei verschiedenen pH-Werten können Stoffmengen, die im jeweiligen pH-Milieu aus den Recycling-Baustoffen langfristig freisetzt sind, abgeschätzt werden. Da für RCL 1 und 2 bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Elemente höhere Gehalte bei niedrigen pH-Werten auftreten, ist dementsprechend nach Erschöpfung der Pufferkapazität mit einer erhöhten Stofffreisetzung zu rechnen. Dabei kann durch das Feinmahlen der Recycling-Materialien eine rasche Mobilisierung der Inhaltsstoffe erfolgen und somit ein Zeitraffereffekt erzielt werden. Die Versuche zeigen jedoch, dass selbst mit Material in Feinfraktion eine Gleichgewichtseinstellung nach 24 Stunden Laufzeit nicht auftritt. Allerdings ist zu beachten, dass eventuell durch Komplexbildung und Ausfällung bei einer längeren Versuchslaufzeit niedrigere Gehalte auftreten können im Vergleich zum 24-stündigen Test. Diese Möglichkeit wird von PASCHKE et al. (1999) nach pH-stat Versuchen bei pH 4 mit unterschiedlichen Versuchsdauern angedeutet.

Über einen Vergleich des Säureverbrauchs beim pH-stat Verfahren mit den bei den Feldversuchen eingetragenen Säuremengen kann eine **zeitliche Abschätzung** des

Puffervermögens der Feststoffmatrix **unter Freilandbedingungen** durchgeführt werden. Dabei werden Ergebnisse aus pH-stat Versuchen mit den fein gemahlten Testfeld-Materialien bezogen auf die Feldversuche mit einer Korngröße von 0 – 45 mm, den Niederschlagseintrag auf die Testfelder (ohne Berücksichtigung der Evaporation) sowie die vorhandene Recycling-Materialmasse in den Lysimetern. Die Umrechnung der Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen auf Freilandverhältnisse schließt somit Zeiträffer-effekte ein, da sowohl mechanische Festigkeit als auch Säurepufferkapazität der Materialien zeitlich begrenzt sind (HIRSCHMANN & FÖRSTNER 2000b).

Zur Abschätzung der Pufferkapazität bei einem Niederschlags-pH-Wert von 5 wurden ermittelte Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 und 6 interpoliert. Danach können pH-Werte des Niederschlagswassers von 5 über sehr lange Zeiträume von den Materialien RCL 1 und 2 gepuffert werden (Tabelle 24). Für saureres Niederschlagswasser mit einem pH-Wert von 4 verkleinert sich dieser Zeitraum um einen Faktor von etwa 10.

Tabelle 24: Aus pH-stat Versuchen mit den fein gemahlten Testfeld-Materialien berechnete Zeitdauern, bis sich bei einem pH-Wert des Niederschlages von 5 bzw. 4 bei den Feldversuchen derselbe pH-Wert für RCL 1 und 2 einstellt

	Zeitdauer, bis sich bei einem <b>pH-Wert</b> des Niederschlages von <b>5</b> bei den Feldversuchen derselbe pH-Wert in den Materialien einstellt [Jahre]	Zeitdauer, bis sich bei einem <b>pH-Wert</b> des Niederschlages von <b>4</b> bei den Feldversuchen derselbe pH-Wert in den Materialien einstellt [Jahre]
<b>Material RCL 1</b>	335063	36709
<b>Material RCL 2</b>	365694	40042

Für die 19 Recycling-Materialien ergeben sich nach der optischen Untersuchung (SCHÄFER 2002) die geringsten Gehalte an Betonbruch bei den Proben HH2, BW2 und Bb2 (Abbildung 12). Aus den **pH-stat Versuchen bei pH 4** weisen Bb2 und HH2 die niedrigsten Werte bei der Säureneutralisationskapazität auf (Tabelle 23). Allerdings wurde für Material BW2 die dritthöchste Säureneutralisationskapazität ermittelt (5,3 mol/kg), wobei hier der größte Anteil der Stoffgruppe Klinker, Ziegel, Mauerwerk im Vergleich aller Materialien vorkommt. Sowohl nach der optischen Untersuchung (SCHÄFER 2002) als auch nach den Prüfberichten der Lieferanten treten die höchsten Gehalte an Betonbruch mit etwa  $\geq 80$  Massenprozent bei den Proben HH1, SI, SA1, SA2 und Sa auf. Die ermittelten Säureneutralisationskapazitäten liegen bei den fünf Materialien zwischen 2,4 – 5,1 mol/kg. Diese Werte sind deutlich niedriger als der ermittelte Höchstwert von 8,5 mol/kg bei Probe By mit einem im Vergleich wesentlich geringeren Massenanteil an Betonbruch von ca. 60 %. Demnach kann bei den pH-stat Versuchen aus dem Betongehalt in den Recycling-Baustoffen nicht unmittelbar auf die Höhe der Säureneutralisationskapazität geschlossen werden.

### 5.1.3 Bindungsstärke von Stoffen

Mit den **Einzelkomponenten** von Material RCL 1 wurden **Schüttelversuche** in fein gemahlener Form durchgeführt. Abbildung 35 zeigt das Verhältnis der aus den Schüttelversuchen mit den fein gemahlene Einzelkomponenten ermittelten Stoffgehalte zu den Gesamtgehalten aus der RFA. Bei einer Stofffreisetzung in Abhängigkeit vom Gesamtgehalt wären vergleichbare Anteile bei den Komponenten zu erwarten.

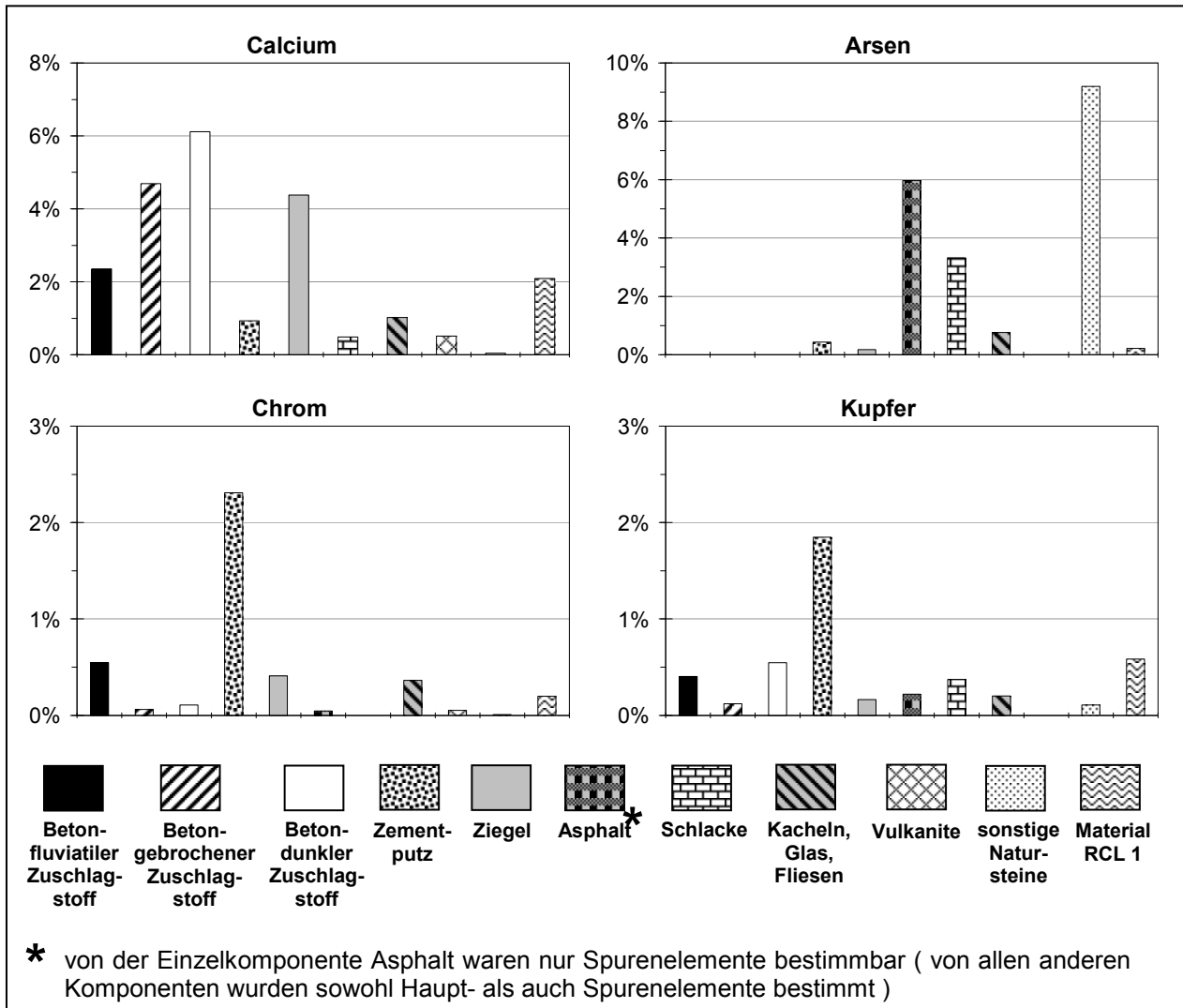


Abbildung 35: Verhältnis der aus Schüttelversuchen mit identifizierten Einzelkomponenten von Material RCL 1 und mit Material RCL 1 ermittelten Stoffgehalte zu den mit Röntgen-Fluoreszenz-Analysen ermittelten jeweiligen Gesamtgehalten

Vulkanite haben zwar den höchsten Calciumgehalt der Einzelkomponenten, beim Schüttelversuch werden jedoch bei den Betonarten sowie bei Ziegel die größten Anteile an Calcium im Vergleich zum Gesamtgehalt in den jeweiligen Stoffgruppen freigesetzt. Obwohl Arsen in allen drei Betonarten auftritt, konnte es in den Eluatn aus den Schüttelversuchen nicht nachgewiesen werden. Die höchsten Arsengehalte wurden bei der RFA in der Stoffgruppe Ziegel ermittelt, allerdings tritt bei den Schüttelversuchen die im Verhältnis zum Gesamtgehalt größte Freisetzung bei Asphalt, Schlacke und Naturstein auf. Sowohl Chrom als auch Kupfer sind bei Zementputz im Vergleich zu den anderen Einzelkomponenten in einer geringen Menge enthalten, liegen aber offensichtlich in

dieser Stoffgruppe in einer leichter freisetzbaren Form vor.

Es zeigt sich, dass für einige Stoffe deutliche Unterschiede zwischen der jeweiligen Stoffmenge in den Einzelkomponenten aus der RFA und hieraus freigesetzten Anteilen bei den Schüttelversuchen vorliegen. Demnach sind aus der Ermittlung des gesamten Stoffgehaltes in den Einzelkomponenten per RFA keine Rückschlüsse möglich auf den jeweiligen Anteil, der daraus bei Schüttelversuchen freigesetzt wird.

Zum einen ist die Stofffreisetzung aus den fein gemahlene Einzelkomponenten abhängig von den Randbedingungen bei den Schüttelversuchen. Da jedoch in allen Eluat alkalische Verhältnisse mit pH-Werten  $\geq 9$  vorlagen, sind unterschiedliche Anteile der Stofffreisetzung im Vergleich zum Gesamtgehalt nicht auf wesentliche Unterschiede bei den pH-Werten zurückzuführen. Vielmehr sind unterschiedliche Bindungsformen und -stärken der Stoffe in den verschiedenen Einzelkomponenten für die aufgetretenen Abweichungen verantwortlich zu machen.

Für alle 19 Recycling-Materialien zeigt sich, dass bei Vergleich der durch **Ammoniumnitrat-Extrakt** ermittelten Gehalte mit Gesamtgehalten aus der RFA für keines der untersuchten Elemente eine Korrelation erkennbar ist. Ein Vergleich der durch **pH-stat Versuche bei pH 4** ermittelten Gehalte mit Gesamtgehalten aus der RFA für alle Recycling-Materialien zeigt, dass lediglich bei Mangan (mit Ausnahme Probe BW2) eine Korrelation erkennbar ist (Abbildung 36). Dieser Stoff scheint in den Recycling-Materialien in einer ähnlichen Bindungsform vorzuliegen, was in einer Freisetzung entsprechend zum Gesamtgehalt resultiert.

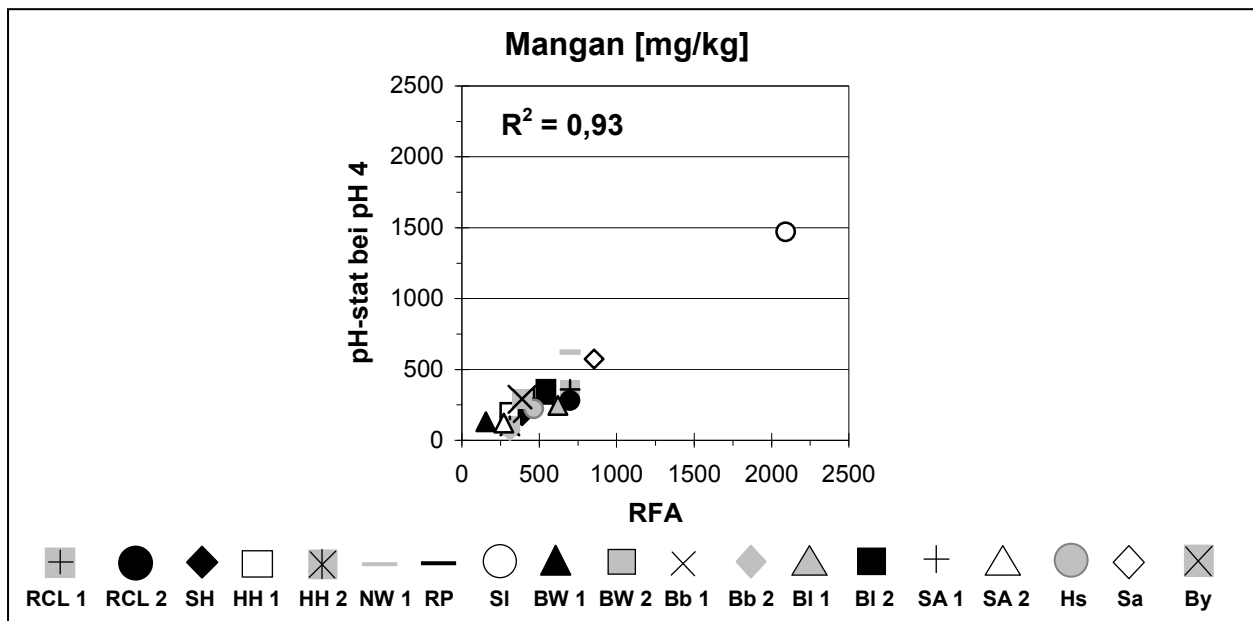


Abbildung 36: Korrelation zwischen ermittelten Mangangehalten aus dem pH-stat Versuch bei pH 4 und Gesamtgehalten aus der RFA für die 19 Recycling-Materialien (ohne Berücksichtigung von Probe BW2)

Demnach ergibt sich für den Großteil der Elemente bei den verschiedenen Versuchen keine Abhängigkeit der Stofffreisetzung vom Gesamtgehalt. Dies deutet auf unterschiedliche Bindungsstärken der Stoffe in den Recycling-Materialien hin. Nach Untersuchungen von TOSSAVAINEN & FORSSBERG (1999) ist es für die Stofffreisetzung aus Gesteins-Materialien von größerer Wichtigkeit, in welcher Bindungsform Elemente im

Material auftreten, als der jeweilige Gesamtgehalt. Bei Zement besteht ebenfalls für die meisten Elemente keine Abhängigkeit der Stofffreisetzung von jeweiligen Gesamtgehalten (VAN DER SLOOT 2000).

Eine **vergleichende Betrachtung zu den Bindungsstärken** der Stoffe in den Recycling-Materialien zeigt Abbildung 37. Hierbei sind ermittelte Massenanteile aus dem **S4-Versuch, der Ammoniumnitrat-Extraktion und dem pH-stat Versuch bei pH 4** mit den 19 Recycling-Materialien im Verhältnis zum Gesamtgehalt aus der RFA dargestellt. Beim Großteil der untersuchten Elemente wurden beim pH-stat Versuch bei pH 4 deutlich größere Massenanteile freigesetzt als bei den anderen Versuchen (Aluminium, Eisen, Nickel, Arsen, Silicium, Mangan, Zink, Kobalt, Blei, Cadmium, Selen). Nach BMV (1998) können mit Auslaugungsverfahren, bei denen keine pH-Wert Einstellung vorgesehen ist, in der Regel nur Aussagen über eine kurzfristige Mobilisierbarkeit von Salzen und Schwermetallen aus den Mineralstoffen getroffen werden. Von den drei betrachteten Verfahren wird eine pH-Wert Einstellung durch Titration nur beim pH-stat Versuch bei pH 4 vorgenommen. Bei der Ammoniumnitrat-Extraktion stellen sich pH-Werte zwischen 8,6 – 9,9 für die 19 Recycling-Baustoffe ein. Mit pH-Werten zwischen 11,0 – 12,4 treten in den Eluaten aus dem S4-Versuch alkalischere Bedingungen auf.

Nach einem von ZEIEN & BRÜMMER (1989) entwickelten sequentiellen Extraktionsverfahren für Böden sollte die Acidität der Extraktionslösungen von Salzlösungen ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) bis hin zu starken Säuren (u.a.  $\text{HNO}_3$ ) zunehmen, um in entsprechender Weise mit steigendem Säureangriff zunehmend stärker gebundene Schwermetallfraktionen zu extrahieren. Demnach wird bei den Recycling-Materialien ein Großteil der Elemente unter den aggressiveren Lösungsbedingungen des pH-stat Versuches aus stärkeren Bindungsformen freigesetzt bzw. erfolgt eine Stofflösung aus dem fein gemahlene Material.

Dagegen stellen Ergebnisse aus S4-Test und Ammoniumnitrat-Extraktion vermutlich vorwiegend den Anteil an außersphärischen Komplexen bzw. unspezifisch sorbierten Stoffen dar. Durch Verwendung von deionisiertem Wasser beim S4-Test ist anzunehmen, dass mit dieser Methode der leicht lösliche Anteil der unspezifisch sorbierten Stoffe erfasst wird. Im Vergleich hierzu dürfte mit der Ammoniumnitratlösung ein größerer Anteil der unspezifisch sorbierten Stoffe bestimmt werden. Allerdings bleiben nach SPOSITO (1998) experimentelle Methoden, die nur leicht austauschbare Ionen quantifizieren oder die adsorbierte Ionen in leicht austauschbare und spezifisch adsorbierte Spezies unterteilen, Objekte künftiger Forschung.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss außer den unterschiedlichen pH-Werten bei den Versuchen ebenfalls die eingesetzte Korngröße berücksichtigt werden. Schließlich ergibt sich aus Vorversuchen zum pH-stat Test, dass Material mit einer Korngröße < 10 mm eine langsamere Kinetik der Stofffreisetzung aufweist als Material in Pulverform (BERNSEE 2003). Bei Ammoniumnitrat-Extrakt (< 2 mm) und S4-Test (< 10 mm) kommen grobkörnigere Materialien zum Einsatz.

Für Arsen liegen neben den größten Massenanteilen aus dem pH-stat Versuch bei allen Materialien für 16 Recycling-Baustoffe höhere Gehalte aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt vor im Vergleich zum S4-Test, für 3 Materialien verhält sich dies umgekehrt. Dies weist darauf hin, dass bei der Mehrheit der Recycling-Baustoffe Arsen in stärkeren Bindungsformen vorliegt.

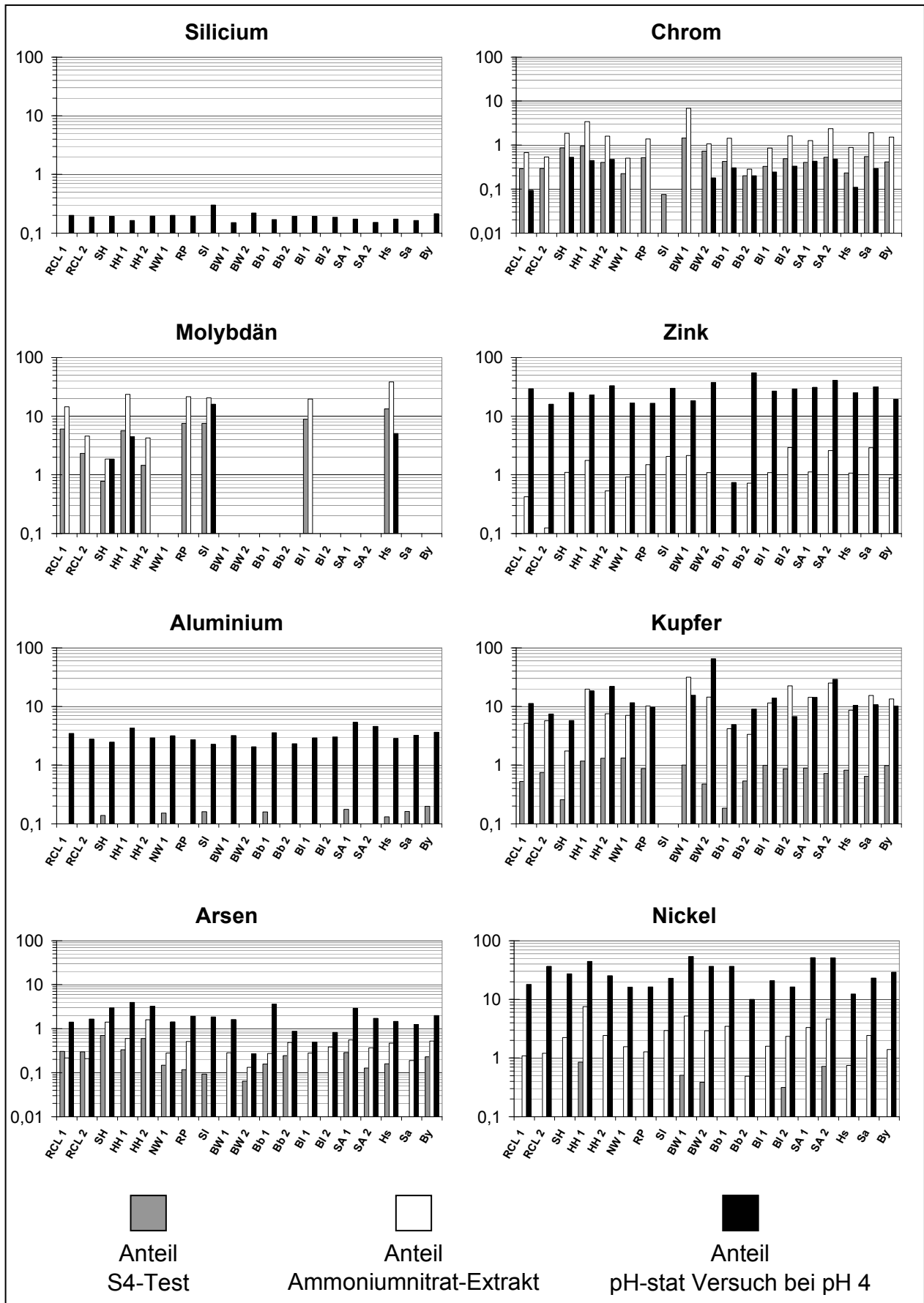


Abbildung 37: Jeweiliger Anteil [%] der aus S4-Test, Ammoniumnitrat-Extrakt und pH-stat Versuch bei pH 4 ermittelten Stoffgehalte für die 19 Recycling-Materialien im Verhältnis zum Gesamtgehalt bestimmt mit der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse

Dasselbe gilt für Silicium, bei dem neben den höchsten Gehalten aus dem pH-stat Versuch für alle Recycling-Baustoffe bei 17 Materialien höhere Massenanteile aus dem S4-Test auftreten im Vergleich zur Ammoniumnitrat-Extraktion. Unterschiede bei S4-Test und Ammoniumnitrat-Extraktion deuten einen erheblichen pH-Wert Einfluss an. Aus den Feldversuchen zeichnet sich ebenfalls ab, dass ein pH-Wert Anstieg eine deutliche Zunahme der Siliciumkonzentrationen zur Folge hat (Abschnitt 5.3.4). Demnach ist davon auszugehen, dass in gleicher Weise die alkalischeren Bedingungen beim S4-Test eine im Vergleich zum Ammoniumnitrat-Extrakt erhöhte Freisetzung ermöglichen.

Chrom und Molybdän sind Stoffe, für die bei der Mehrheit der untersuchten Materialien die höchsten Gehalte aus der Ammoniumnitrat-Extraktion stammen. 15 Recycling-Baustoffe haben die höchsten Chromgehalte beim Ammoniumnitrat-Extrakt und die geringsten Massenanteile beim pH-stat Versuch. Dies könnte darauf hinweisen, dass bei der Mehrheit der untersuchten Recycling-Materialien Chrom überwiegend unspezifisch adsorbiert vorliegt und dadurch mit dem Ammoniumnitrat-Extrakt erfasst werden kann. Bei Molybdän haben 16 Materialien die höchsten Gehalte beim Ammoniumnitrat-Extrakt und die geringsten Massenanteile beim pH-stat Versuch, wobei dieser Stoff in 15 Proben aus dem pH-stat Versuch bei pH 4 nicht nachgewiesen werden konnte. Sowohl Feldversuche als auch pH-stat Versuche bei pH 6 und 8 deuten an, dass höhere pH-Werte die Molybdänfreisetzung fördern (Abbildung 26). Allerdings treten bei den S4-Versuchen für 18 Materialien geringere Gehalte im Vergleich zum Ammoniumnitrat-Extrakt auf, obwohl sich beim S4-Test im Vergleich höhere pH-Werte einstellten. Demnach ist davon auszugehen, dass Molybdän in den Recycling-Materialien vorwiegend unspezifisch sorbiert vorliegt und eine pH-Wert abhängige Freisetzung mit einem Maximum im neutralen bis leicht alkalischen Bereich auftritt.

Für Antimon, Zinn und Kupfer lässt sich kein bestimmtes Muster bei Vergleich der Massenanteile erkennen. Antimon konnte für 5 Materialien bei keinem Verfahren nachgewiesen werden, bei Zinn gilt dies für 16 Recycling-Baustoffe. Kupfer nimmt bei 11 Materialien höhere Gehalte beim pH-stat Versuch bei pH 4 ein im Vergleich zur Ammoniumnitrat-Extraktion, für 6 Materialien ist dies umgekehrt. Höhere Gehalte aus der Ammoniumnitrat-Extraktion im Vergleich zum pH-stat Versuch können nach FÖRSTNER & THÖMING (1997) darin begründet sein, dass Ammoniumnitrat eine spezifische Mobilisierung von Kupfer bewirkt.

Das Verhältnis der jeweils freigesetzten Massenanteile aus dem pH-stat Versuch bei pH 4 zum Gesamtgehalt aus der RFA nimmt bei den 19 Materialien geringe Werte ein für Silicium ( $\leq 0,2$  %), Aluminium ( $\leq 5$  %), Eisen ( $\leq 4$  %) sowie Arsen ( $\leq 4$  %). Ein deutlicher größerer Anteil am Gesamtgehalt tritt beim pH-stat Versuch bei Mangan ( $\leq 89$  %), Nickel ( $\leq 54$  %), Zink ( $\leq 55$  %) und Kobalt ( $\leq 86$  %) auf.

Für Kupfer ergibt sich aus dem pH-stat Versuch ein maximaler Anteil von 65 %, der im Verhältnis zum Gesamtgehalt auftritt, aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt ist der Maximalwert mit 32 % deutlich niedriger. Auch bei Arsen wird mit einem maximalen Anteil von 4 % beim pH-stat Versuch etwas mehr freigesetzt vom Gesamtgehalt als beim Ammoniumnitrat-Extrakt mit maximal 1,6 %.

Für Chrom wird beim Ammoniumnitrat-Extrakt mit maximal 7 % ein relativ geringer Anteil am Gesamtgehalt aus der RFA freigesetzt bei den Recycling-Baustoffen.

Für beide Testfeld-Materialien wurden außerdem sowohl Gehalte an Na, K, Ca und Ba aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt als auch die Kationenaustauschkapazität (Abschnitt 4.3.2) ermittelt (Tabelle 25). Die Bestimmung der KAK erfolgte im Gegensatz zum Ammoniumnitrat-Extrakt mit fein gemahlenem Material.

Tabelle 25: Bestimmte Kationenaustauschkapazität (nach KRAUSE et al. 1993) und addierte Gehalte an Na, K, Ca, Ba aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt für die Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

<b>Kationenaustauschkapazität (KAK, Material fein gemahlen)</b>		
	Material RCL 1	Material RCL 2
Hintausch [meq/100 g]	20,5	23,3
Rücktausch [meq/100 g]	14,2	14,6
<b>Addierte Gehalte an Na, K, Ca, Ba aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt (Material &lt; 2 mm)</b>		
	Material RCL 1	Material RCL 2
[meq/100 g]	44,8	42,2

Bei der Bestimmung der KAK treten beim Hintausch hohe Gehalte an Calcium auf, die nach KRAUSE et al. (1993) begründet sein können in carbonatisch gebundenem Calcium, das in Form von Calcit durch Auflösung zu einer Erhöhung der Calcium-Konzentration beim Hintausch führen kann. Bei der Ammoniumnitrat-Extraktion ist von ähnlichen Prozessen auszugehen, da Calcium mit den höchsten Gehalten der untersuchten Kationen im Ammoniumnitrat-Extrakt von RCL 1 und 2 auftritt. Untersuchungen von JAUBERTHIE & RENDELL (2003) zeigen, dass Ammoniumnitrat bei zementbürtigen Materialien durch das Löslichmachen von Calcium eine schnelle Entkalkung zur Folge hat. Demnach ist vermutlich bei der Ammoniumnitrat-Extraktion eine verstärkte Auflösung von Calcit bzw. Portlandit aufgetreten, was die Unterschiede zu den Werten aus der KAK-Bestimmung hervorruft.

Es zeigt sich für die Abschätzung, in welchem Ausmaß Stoffe spezifisch bzw. unspezifisch sorbiert in den Recycling-Materialien vorliegen, dass Randbedingungen wie der pH-Wert berücksichtigt werden müssen. Bei Stoffen, die überwiegend unspezifisch sorbiert auftreten, kann in Abhängigkeit vom angewandten Verfahren und dementsprechenden pH-Wert ein unterschiedlicher Anteil freigesetzt werden. Auch haben Ionenstärke und spezifische Stoffmobilisierung bei bestimmten Elutions- bzw. Extraktionsmitteln vermutlich Einfluss auf die Stofffreisetzung (DANKWARTH & GERTH 2002).

Nach Untersuchungen mit Schlämmen von SCHOER & FÖRSTNER (1987) ist mit chemischen Methoden eine exakte Bestimmung der Bindungsformen für ein bestimmtes Schwermetall im Allgemeinen nicht möglich. Es kann eine orientierende Zuordnung der Gesamtmetallgehalte auf Bindungsformen mit Hilfe einer chemischen Extraktion erfolgen. Ermittelte Fraktionen aus einer Anwendung verschieden wirksamer Lösungsmittel in Sequenz entsprechen jedoch nur in Ausnahmefällen einer bestimmten Schwermetallphase, sondern sind durch die Wahl des Lösungsmittels und die Versuchsbedingungen definiert.

## 5.2 Statische Verfahren

### 5.2.1 Vergleichbarkeit und Versuchsdauer von S4- und Modifiziertem S4-Test

Ein Vergleich der Ergebnisse aus beiden Verfahren zeigt, dass es nicht möglich ist eine Aussage zu treffen, nach der die mit dem **Modifizierten S4-Verfahren** ermittelten Gehalte um einen bestimmten Prozentsatz unter denen des **S4-Verfahrens** liegen. Zwar sind Gehalte aus dem S4-Test bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Elemente größer als beim Modifizierten S4-Test, es ist jedoch eine größere Spannweite in den Verhältnissen der Messwerte beider Verfahren festzustellen. Als ein Grund hierfür ist das Brechen der Materialien auf unterschiedliche Korngrößen bei beiden Verfahren zu nennen. Der Effekt der Neuschaffung von Reaktionsflächen ist beim Modifizierten S4-Verfahren (Brechen der Körner > 32 mm) wesentlich geringer als beim S4-Verfahren (Brechen der Körner > 10 mm). Grund hierfür ist, dass beim Modifizierten S4-Verfahren nach dem Brechvorgang nur die Körnung 16 – 32 mm Verwendung findet und dem Korngemisch < 32 mm beigegeben wird. Andere Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass die Körnung < 10 mm beim S4-Verfahren hinsichtlich einer praxisgerechten Untersuchung von Materialien kritisch zu betrachten ist (BMV 1998, MESTERS 1998). Die geringe Probenmasse von 100 g beim S4-Verfahren ist für solch heterogene Materialien wie Recycling-Baustoffe ebenfalls als kritisch anzusehen.

Durch die anhand der optischen Untersuchung (SCHÄFER 2002) bzw. der Prüfberichte der Lieferanten festgestellten stofflichen Zusammensetzungen sind ebenfalls keine Rückschlüsse möglich auf die zu erwartenden Gehalte aus einer Elution nach dem S4- und dem Modifizierten S4-Verfahren.

Langzeitversuche über 192 Stunden zeigen, dass eine **Gleichgewichtseinstellung** nach der vorgeschriebenen Elutionsdauer von 24 Stunden für beide Verfahren bei einigen Stoffen (Cr, Mo, Ca, Na, K) noch nicht erreicht ist (Abbildung 24). Aus diesem Grund scheint die vorgegebene Versuchslaufzeit für Recycling-Materialien nicht ausreichend zu sein. Nach OBERMANN & CREMER (1992) ist die Lösungsgeschwindigkeit direkt von der verfügbaren Oberfläche und damit von der Korngröße des eingesetzten Materials abhängig. Erfolgt ein Versuchsabbruch vor Erreichen des Gleichgewichtszustandes zwischen Festphase und Lösung, werden Ergebnisse somit stark von der eingesetzten Korngröße geprägt.

### 5.2.2 Einfluss der Korngröße auf die Stofffreisetzung

Neben dem S4- und Modifizierten S4-Verfahren wurden Schüttelversuche mit den Materialien RCL 1 und 2 in Feinfraktion durchgeführt, wobei das Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 beibehalten wurde.

Ein Ergebnisvergleich der **Schüttelversuche mit verschiedenen Korngrößen** zeigt, dass sich bei Arsen, Nickel und Nitrat erhöhte Gehalte bei den grobkörnigeren Fraktionen von RCL 1 und 2 andeuten (Abbildung 38). Für Blei, Chrom und Molybdän zeichnet sich dagegen eine größere Freisetzung aus klein gebrochenem (S4-Test) bzw. fein gemahlenem Material ab.

Nach HILLIER et al. (1999) kann bei einer Probenzerkleinerung mit Backenbrecher bzw.

Schwingmühle möglicherweise eine Kontamination beim Zerkleinerungsprozess auftreten, was dementsprechend Auswirkung auf die Ergebnisse hat. Die Recycling-Materialien wurden mit zwei Backenbrechern (Fa. KHD Humboldt Wedag AG) klein gebrochen, bei denen die Brechbacken aus Mangan-Hartstahlguß bestehen. Zur Mahlung des Materials kam eine Scheibenschwingmühle (Fa. Siebtechnik GmbH) mit einer Beschichtung des Mahlwerkzeugs aus Wolframcarbide zum Einsatz. Mangankonzentrationen bei den verschiedenen Korngrößen deuten nicht auf eine Anreicherung dieses Stoffes beim Brechvorgang hin. Insbesondere beim S4-Versuch, für den das Material in mehreren Brechvorgängen hergestellt wurde, sind keine wesentlichen Konzentrationsunterschiede zu den Versuchen mit anderen Korngrößen festzustellen. Dadurch ist davon auszugehen, dass keine signifikante Kontamination der Proben beim Zerkleinerungsprozess stattgefunden hat.

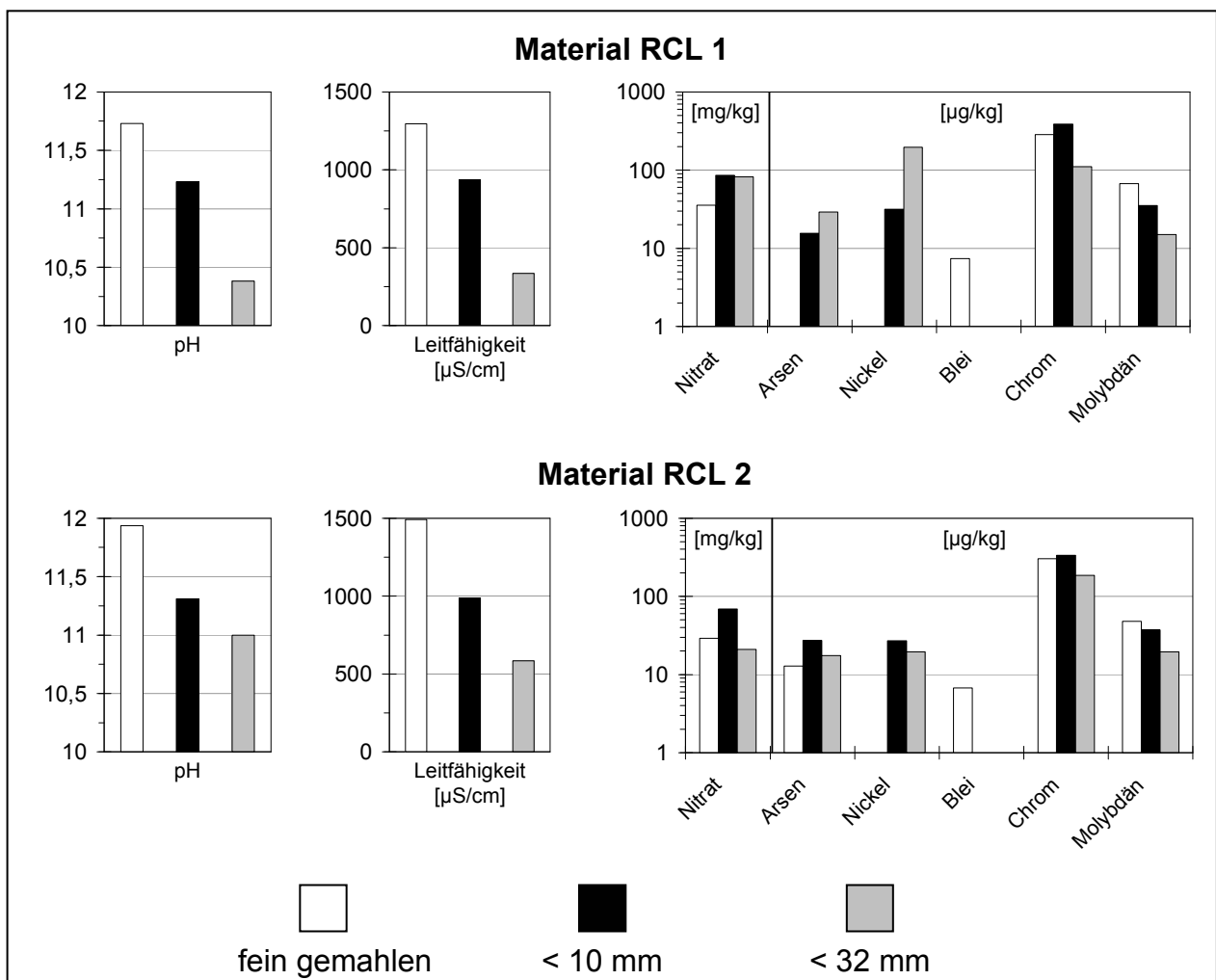


Abbildung 38: Ermittelte Massenanteile aus den Schüttelversuchen mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 in unterschiedlichen Korngrößen (Wasser/Feststoff-Verhältnis 10:1, Laufzeit 192 Stunden)

Abbildung 38 zeigt, dass pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit mit abnehmender Korngröße ansteigen, wobei pH-Werte bei allen drei Kornfraktionen deutlich im alkalischen Bereich liegen. Demnach sind pH-Wert Unterschiede nicht als wesentliche Ursache für abweichende Stoffkonzentrationen bei unterschiedlichen Korngrößen anzusehen. Vielmehr sind andere Einflussgrößen für die Stofffreisetzung bei Recycling-Materialien in unterschiedlichen Korngrößen verantwortlich zu machen:

- **erhöhte Freisetzung in der Feinfraktion**

Zum einen kann der Stoff homogen verteilt im Feststoff vorliegen. Durch die im Rahmen des Brechvorganges erfolgende Oberflächenvergrößerung kann eine verstärkte Freisetzung im Vergleich zum ungebrochenen Zustand stattfinden, weil das Kleinbrechen eine Verkürzung des Diffusionspfades zur Folge hat. Dadurch kann eine schnellere Freisetzung von Stoffen im Vergleich zur Originalkorngröße auftreten (FÄLLMAN & AUREL 1996, VAN DER SLOOT 2000).

Andererseits kann der Bereich um den Materialkern herum bereits an diesem Stoff verarmt sein, was entsprechend zu geringeren Konzentrationen bei der Grobfraktion führt. Demnach hat der Brechvorgang mit Offenlegung des Materialinneren eine verstärkte Freisetzung zur Folge.

- **erhöhte Freisetzung in der Grobfraktion**

Eine Erklärung für geringere Konzentrationen bei kleineren Korngrößen könnte in Sorptions- und Fällungsprozessen liegen. Sorption an einer neu gebildeten Phase wie Calcit kann auf Grund der Versuchslaufzeit von 192 Stunden stattgefunden haben und demnach Konzentrationsunterschiede zwischen den verschiedenen Korngrößen erklären. Ebenso kann Sorption an den neu geschaffenen Oberflächen eine Ursache sein für geringere Konzentrationen bei kleineren Korngrößen, zumindest beim kationischen Nickel. pH-Werte nehmen mit abnehmender Korngröße zu, Arsengehalte dagegen ab. Daher sind verstärkte Sorptionsprozesse von anionischem Arsen bei kleinerer Korngröße als Begründung für Konzentrationsunterschiede nicht plausibel.

Für beide Testfeld-Materialien wurden neben S4-Tests analog zur DIN-Vorschrift auch Versuche über längere **Laufzeiten** (48 bzw. 192 Stunden) durchgeführt. Wie bereits beschrieben, scheint anhand des ermittelten Konzentrationsverlaufes einiger Elemente die Versuchslaufzeit von 24 Stunden nicht ausreichend zu sein (Abschnitt 5.2.1). Bei Verlängerung dieser Zeitdauer muss jedoch ein verstärkter Materialabrieb mit entsprechenden Auswirkungen auf die Stofffreisetzung berücksichtigt werden.

Abbildung 39 zeigt für Material RCL 1 eine deutliche Zunahme der Kornfraktion  $\leq 4$  mm bei einer Laufzeit von 192 Stunden, was sich auch bei RCL 2 abzeichnet.

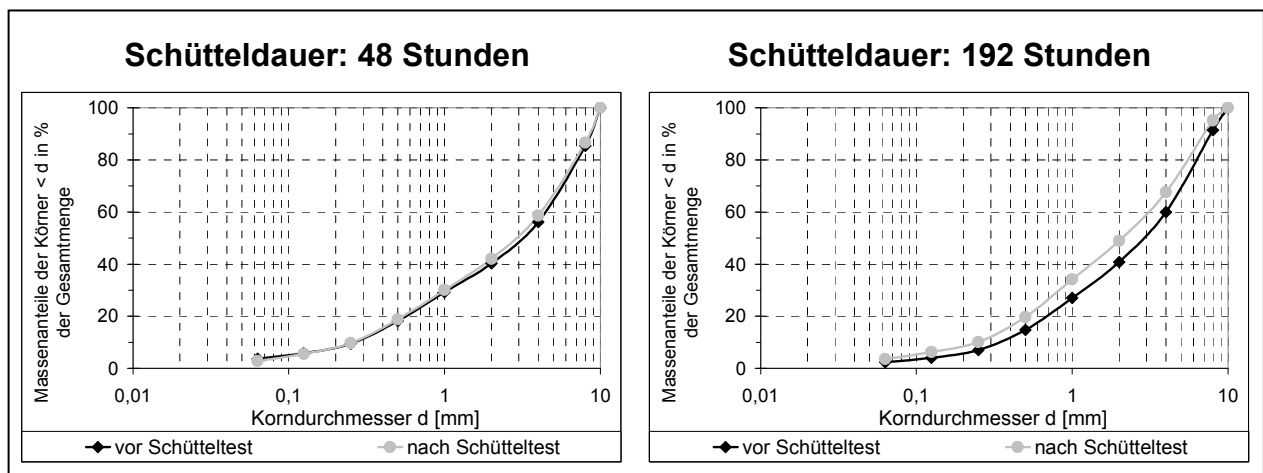


Abbildung 39: Kornsummenkurven vor und nach Schüttelversuchen analog zum S4-Test mit Material RCL 1 für Versuchslaufzeiten von 48 bzw. 192 Stunden

Im Vergleich dazu treten keine signifikanten Änderungen nach 48 Stunden Laufzeit ein.

Vom auftretenden Materialabrieb her betrachtet ist somit eine Laufzeit zwischen 48 und 192 Stunden anzustreben. Eine Ermittlung der optimalen Zeitdauer für das S4-Verfahren, bis zu der für wesentliche Elemente eine Gleichgewichtseinstellung, jedoch noch kein bedeutsamer Materialabrieb zu erwarten ist, hängt neben Materialeigenschaften ebenfalls von der Schüttelfrequenz ab.

Die sich nach 192 Stunden Laufzeit ergebende Oberflächenzunahme ist für beide Materialien in Abbildung 40 dargestellt. Die Berechnung der Oberflächen für bestimmte mittlere Korndurchmesser erfolgte dabei nach BUSCH & LUCKNER (1974). Für beide Materialien ist insbesondere bei der Fraktion  $\leq 0,1$  mm ein deutlicher Unterschied zwischen den berechneten Oberflächen vor und nach dem Schütteltest zu erkennen. Der Oberflächenzuwachs, bezogen auf die mittleren Korndurchmesser, beträgt bei RCL 1 und 2 etwa  $20 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach 192 Stunden Laufzeit.

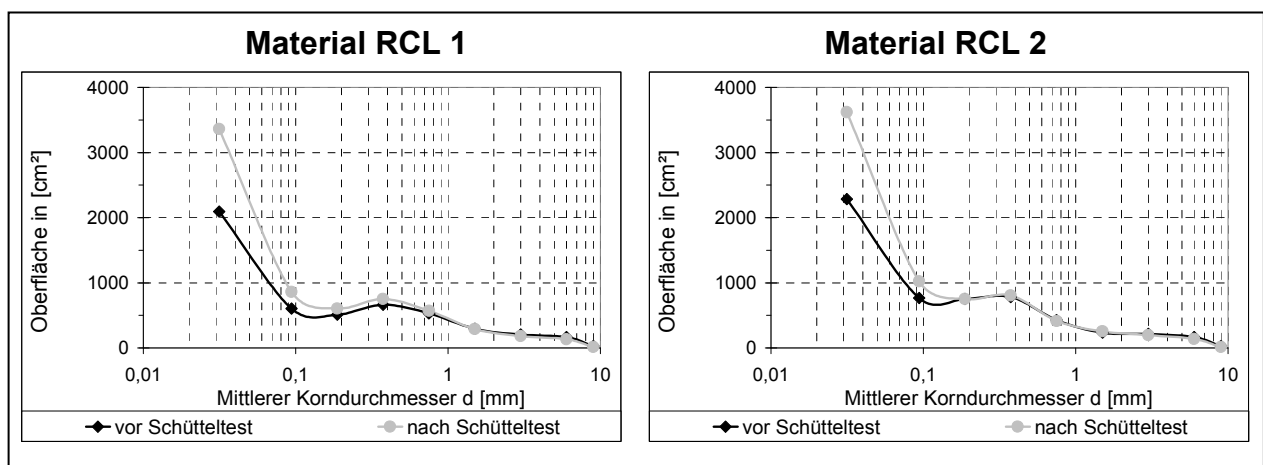


Abbildung 40: Berechnete Oberflächen für bestimmte mittlere Korndurchmesser vor und nach Schüttelversuchen analog zum S4-Test über einen Zeitraum von 192 Stunden mit den Materialien RCL 1 und 2

Ein Vergleich der Kornsummenkurven für Material RCL 1 beim Test mit 192 Stunden Laufzeit (Abbildung 39) und der berechneten Oberflächen für bestimmte mittlere Korndurchmesser (Abbildung 40) zeigt, dass sich die für die Kornfraktion  $\geq 1$  mm ermittelte Zunahme beim Massenanteil nicht signifikant auf berechnete Oberflächen in diesem Bereich auswirkt. Dagegen nimmt die Feinfraktion  $< 0,125$  mm beim Massenanteil zwar lediglich um 2 % nach 192 Stunden Laufzeit zu (Zunahme von 4 % auf 6 %), dies resultiert jedoch in einem Anwachsen des Anteils an der gesamten Oberfläche von 53 % vor dem Schütteltest auf 62 % danach. Bei Material RCL 2 zeigt sich eine vergleichbare Tendenz hinsichtlich Massenanteil (Zunahme von 4 % auf 7 %) und Anteil an der gesamten Oberfläche (Zunahme von 54 % auf 64 %) für die Feinfraktion  $< 0,125$  mm vor und nach dem Schütteltest mit 192 Stunden Laufzeit. Daran zeigt sich, dass ein vergleichsweise geringes Anwachsen der Kornfraktion  $< 0,125$  mm eine erhebliche Vergrößerung der berechneten Oberfläche zur Folge hat. Bei einer Studie von ENGESER et al. (1998) mit Hochbauschutt (0 – 32 mm  $\varnothing$ ) trug die Feinfraktion  $< 0,125$  mm trotz eines geringen Massenanteils (ca. 4 %) ebenfalls bereits 44 % zur gesamten Oberfläche bei. Demnach erhöhen selbst geringe Feinanteile die Oberfläche überproportional.

Versuche mit Materialien verschiedener Korngröße lassen Rückschlüsse auf die Stoffverteilung im Material sowie auf wesentliche Kornfraktionen für die Freisetzung be-

stimmter Stoffe zu. Untersuchungen mit zementbürtigen Materialien verschiedener Korngröße zeigen, dass Elutionsversuche mit Materialien, bei denen die Originalstruktur zerstört wird, nicht für eine Beurteilung des Freisetzungsverhaltens unter den Verwendungsbedingungen geeignet sind (RECHENBERG et al. 1991). Allerdings kann die Betrachtung von zerkleinertem Material für eine Beurteilung des Elutionsverhaltens sinnvoll sein, wenn in Abhängigkeit von der Verwendung beispielsweise langfristig eine Zerkleinerung durch Frosteinwirkung möglich ist.

Die Versuche zeigen, dass einige Stoffe ein unterschiedliches Freisetzungsverhalten bei verschiedenen Korngrößen aufweisen. Nach KARIUS & HAMER (2001) schreiben viele Elutionsversuche zwar eine maximal zu verwendende Korngröße vor, allerdings wird keine untere Grenze aufgeführt. Um den Einfluss der Korngröße auf die Stofffreisetzung besser kontrollieren zu können und eine bessere Vergleichbarkeit von Ergebnissen zu ermöglichen wäre es daher denkbar, auch eine untere Grenze für einzusetzende Korngrößen festzulegen bzw. das Material in Originalkorngröße und separat in der Feinfraktion zu untersuchen.

### 5.2.3 Aussagekraft der Kombination Schüttelversuche und Standtest

Für die Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 zeigt sich, dass im Vergleich zu den **Schüttelversuchen mit unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen** (Material in Feinfraktion) beim **Langzeit-Standtest** (Material in Originalkorngröße) für die überwiegende Zahl der untersuchten Elemente die Konzentrationshöchstwerte auftreten (Abbildung 29). Dies ist auf das vergleichsweise geringe Wasser/Feststoff-Verhältnis von etwa 1:4 beim Langzeit-Standtest zurückzuführen.

Die Versuchsdauer von 70 Tagen für den Langzeit-Standtest richtet sich nach der aus dem Tracerversuch berechneten mittleren Verweilzeit von 76 Tagen in Becken RCL 1 bzw. 90 Tagen in Becken RCL 2 (Abschnitt 4.2.1). Bei der mittleren Verweilzeit muss berücksichtigt werden, dass der Markierstoff nach der Recycling-Materialschicht zunächst die darunter liegende Kiesschicht passieren musste, bevor der Sammelschacht erreicht wurde. Eine Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $k_f$ -Wert) erfolgte beim Kies mit 0 - 32 mm Körnung mittels des aus der Sieblinie ermittelten Ungleichförmigkeitsgrades (PRINZ 1991). Da sich hierbei mit einem  $k_f$ -Wert von  $6 \cdot 10^{-4}$  m/s eine starke Durchlässigkeit ergab, ist von einer geringen Verweildauer des Markierstoffes bzw. Wassers in den Kiesschichten (2 – 8 mm bzw. 0 – 32 mm  $\emptyset$ ) auszugehen.

Es ist ebenfalls zu beachten, dass der Tracerversuch im Dezember gestartet wurde und sich Sickerwasser im Winter vermutlich längere Zeit in den Probenkörpern befand als im Sommer. Demnach orientiert sich die Laufzeit des Langzeit-Standtests an maximalen Werten der mittleren Verweilzeit des Markierstoffes in den Lysimetern, die bei den Feldversuchen auftraten.

Die Schüttelversuche mit den Materialien RCL 1 und 2 zeigen bei den unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen ähnlich hohe **Konzentrationen** bei Calcium, Sulfat, Arsen, Silicium und Aluminium (Abbildung 29). Stärkere Abweichungen bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 100:1 und größer können durch Verwendung einer unterschiedlichen Probecharge begründet sein, die hierfür zum Einsatz kam. Demnach weisen die Ergebnisse für diese Stoffe auf eine von der Löslichkeit limitierte Freisetzung

bei den fein gemahlten Materialien unter den Versuchsbedingungen hin. Der Langzeit-Standtest zeigt jedoch außer bei Aluminium für die Materialien in Originalkorngröße im Vergleich höhere Konzentrationen. Dementsprechend geben im Vergleich ähnlich hohe Konzentrationen bei den Schüttelversuchen keine maximal auftretenden Werte wieder, so dass für die Mehrzahl der untersuchten Stoffe der Langzeit-Standtest für einen Vergleich maximaler Konzentrationen mit dem Feldversuch herangezogen wird (Abschnitt 5.4.1).

Die **Massenanteile** weisen überwiegend Höchstwerte bei größeren Wasser/Feststoff-Verhältnissen auf und nehmen mit kleiner werdenden Wasser/Feststoff-Verhältnissen zum Langzeit-Standtest hin ab (Abbildung 29). Bei Berücksichtigung, dass die Proben mit dem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 100:1 und größer aus einer anderen Probecharge stammen, weisen Chlorid, Nitrat, Kobalt, Chrom, Molybdän und schwächer ausgeprägt auch Natrium ähnlich hohe Massenanteile auf. Bei diesen Stoffen wird demzufolge die Freisetzung von der Verfügbarkeit kontrolliert, was auf ein begrenzt freisetzbare Stoffvorkommen in Material RCL 1 und 2 hinweist.

Eine Versuchskombination aus Langzeit-Standtest und Schüttelversuchen bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen liefert somit Informationen zur **Löslichkeit und Verfügbarkeit** von Stoffen bei den Recycling-Materialien. Bei diesen Versuchen mit statischer Versuchsanordnung kann sich die Eluatkonzentration erhöhen, bis das chemische Gleichgewicht erreicht ist. Die Konzentration nach Erreichen des Gleichgewichtes ist allein abhängig von der Löslichkeit des Stoffes unter den gegebenen Bedingungen, solange dieser nicht in der Verfügbarkeit begrenzt ist. Die Auslaugung einiger Elemente kann durch ihre Verfügbarkeit in der Festphase limitiert sein.

Mit der Durchführung von Versuchen mit Proben in Originalkorngröße und in der Feinfraktion werden die in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Verteilungsformen, in denen Stoffe in den Materialien vorliegen können, berücksichtigt. Durch ausbleibende Bewegung der Probe beim Langzeit-Standtest wird ein Materialabrieb und daraus resultierende Einflüsse auf die Stofffreisetzung vermieden. Bei den Schüttelversuchen spielt Materialabrieb durch die Verwendung von bereits fein gemahlten Proben keine signifikante Rolle.

## 5.3 Feld- und Säulenversuche

### 5.3.1 Ursachen für auftretende pH-Werte

Die Stoffgruppe **Betonbruch** in beiden Testfeld-Materialien war vor der Aufbereitung als Recycling-Baustoff Bestandteil von Bauwerken, vermutlich über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Bei der Untersuchung der Einzelkomponenten in Material RCL 1 konnten drei Betonarten mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen identifiziert werden. Schüttelversuche mit den fein gemahlene Komponenten ergaben, dass sich im Vergleich zu Beton mit fluviatilem Zuschlagstoff aus den Betonarten mit gebrochenem und dunklem Zuschlagstoff eine deutlich größere Menge an Natrium, Kalium und Calcium löste (Abbildung 41).

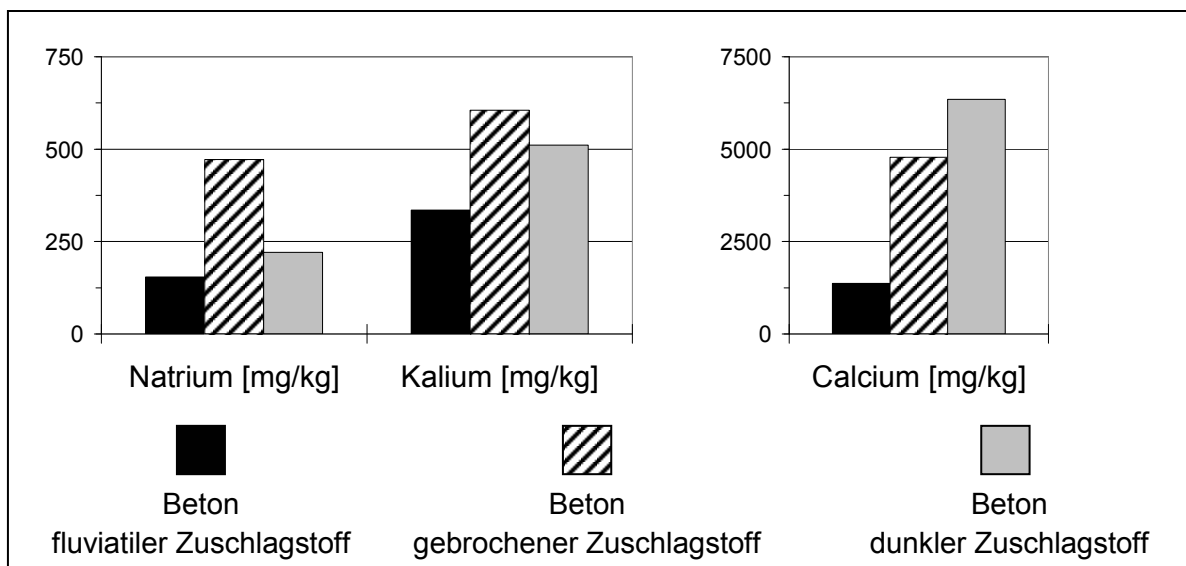


Abbildung 41: Ermittelte Gehalte aus Schüttelversuchen mit den fein gemahlene Einzelkomponenten aus Material RCL 1 für die drei identifizierten Betonarten mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen

Der pH-Wert bei diesen beiden Betonarten war beim Schüttelversuch mit 12,4 etwas höher als bei Beton mit fluviatilem Zuschlagstoff mit 11,8. Dies weist darauf hin, dass bei Beton mit gebrochenem und dunklem Zuschlagstoff eine größere Menge an Hydroxiden ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ) unter den Versuchsbedingungen gelöst wurde, vorwiegend aus Portlandit. Im Vergleich hierzu waren bei Beton mit fluviatilem Zuschlagstoff Carbonatisierungsreaktionen offenbar weiter fortgeschritten, was eine etwas geringere Freisetzung von Hydroxiden zur Folge hatte.

Der Grund für diese Abweichungen bei den Betonarten liegt vermutlich in einer unterschiedlich langen Verwendung bzw. unterschiedlichen Feuchtigkeitsbedingungen in den Bauwerken. Beides kann Carbonatisierungsreaktionen, bei denen zunächst Portlandit in Calcit umgewandelt wird, wesentlich beeinflussen (Abschnitt 2.3). Nach Abbruch der Bauwerke sowie Kleinbrechen der Betonbruchstücke konnten durch eine unterschiedlich lange Haldenlagerung und wechselnde Feuchtigkeitsbedingungen ebenfalls Unterschiede in Carbonatisierungsreaktionen auf den neu entstandenen Bruchflächen auftreten.

Aus den in Material RCL 1 identifizierten Betonarten setzt sich der Betonbruch in Mate-

rial RCL 2 ebenfalls zusammen. Nach der optischen Untersuchung (SCHÄFER 2002) tritt in Material RCL 2 ein größerer Anteil an Betonbruch auf als in RCL 1. Dagegen kommt nach den Prüfberichten des Lieferanten in beiden Materialien eine ungefähr gleich hohe Menge an Betonbruch vor. Die Abweichungen in der Beschreibung der stofflichen Zusammensetzung der Recycling-Materialien können nach WÖRNER et al. (2001) im Fehlen einer einheitlichen Prüfvorschrift für die Ansprache der einzelnen Stoffgruppen begründet sein. Selbst wenn den Prüfberichten mehr Glauben geschenkt wird ist nicht davon auszugehen, dass die jeweiligen Anteile der drei identifizierten Betonarten in beiden Materialien gleich hoch sind.

Die **pH-Werte** im Sickerwasser von Becken RCL 1 liegen über die gesamte Versuchslaufzeit zwischen 6,5 und 8. In Becken RCL 2 treten während der ersten 13 Monate größtenteils pH-Werte zwischen 8 und 9,5 auf, bevor ein Anstieg bis pH 12 erfolgt. Diese Abweichungen in den pH-Werten können über unterschiedlich hohe Massenanteile der carbonatisierten Betonarten in den Materialien erklärt werden in Verbindung mit stattfindenden Reaktionen in den Becken, bei denen eine unterschiedliche Menge an  $\text{CO}_2$  verbraucht wurde.

Im Sickerwasser von **Material RCL 1** liegt der pH-Wert über die gesamte Versuchslaufzeit im Bereich des Carbonatpuffers zwischen 8,6 – 6,2 (MATTHEß 1990). Dies lässt darauf schließen, dass das  $\text{CO}_2$  in Becken RCL 1 nicht vollständig durch hydroxidische Phasen aufgebraucht wurde. Die im Wesentlichen puffernde Betonart im Material muss bereits vor Einbau ausreichend carbonatisiert vorgelegen haben, da ansonsten im Verlauf der Feldversuche mit der Freisetzung von Hydroxiden und einem pH-Wert Anstieg zu rechnen gewesen wäre. Zwar ist die Pufferwirkung von Calcit in natürlichen Systemen durch die relativ schnelle Lösungskinetik sehr effektiv (ISENBECK-SCHRÖTER 1995), jedoch weist  $\text{CaCO}_3$  eine geringere Löslichkeit auf als die Ausgangsverbindung  $\text{Ca(OH)}_2$  (PALITZSCH 2002). Nach RASSINEUX et al. (1989) kann durch Carbonatisierung eine Calcitkruste entstehen, die in Abhängigkeit von der Ausprägung das Eindringen von Ionen in darunter liegende Bereiche erschwert oder sogar unmöglich macht. Zementbürtige Materialien werden nach VAN DER SLOOT (2000) bei pH-Werten um 8 gepuffert, wenn sie voll carbonatisiert vorliegen.

Die pH-Werte im Sickerwasser von **Material RCL 2** sind während der ersten 13 Monate Versuchslaufzeit deutlich höher als bei Becken RCL 1, bevor der signifikante Anstieg erfolgt. Dies weist auf verschiedenartige Prozesse in den Becken hin. In Becken RCL 2 ist davon auszugehen, dass die hauptsächlich vorkommende Betonart einen wesentlich niedriger ausgeprägten Carbonatisierungsgrad aufweist im Vergleich zu Becken RCL 1. Dementsprechend ist im wesentlichen Portlandit für auftretende pH-Wert Unterschiede in den ersten 13 Monaten Versuchslaufzeit verantwortlich zu machen. Weder bei Kalium noch bei Natrium ist aus dem auftretenden Konzentrationsverlauf in Becken RCL 2 eine Beeinflussung des pH-Wertes durch die Freisetzung in Form von Hydroxiden ableitbar.

Einen Hinweis auf unterschiedlich vorkommende Betonarten mit abweichendem Carbonatisierungsgrad in den Materialien RCL 1 und 2 gibt ein Vergleich ermittelter pH-Werte aus dem S4-Test, Modifizierten S4-Test und Langzeit-Standtest (Abbildung 42).

Beim S4-Test tritt kein wesentlicher Unterschied beim pH-Wert zwischen RCL 1 und 2

auf. Offensichtlich wurden durch den Brechvorgang neue Oberflächen in ausreichendem Maße erzeugt, so dass sich die bei den Feldversuchen auftretenden Abweichungen beim pH-Wert nicht einstellen. Demnach erfolgt eine Freisetzung von Hydroxiden aus dem vorherigen Materialinneren, die pH-Werte von etwa 11,3 bei RCL 1 und 2 zur Folge hat.

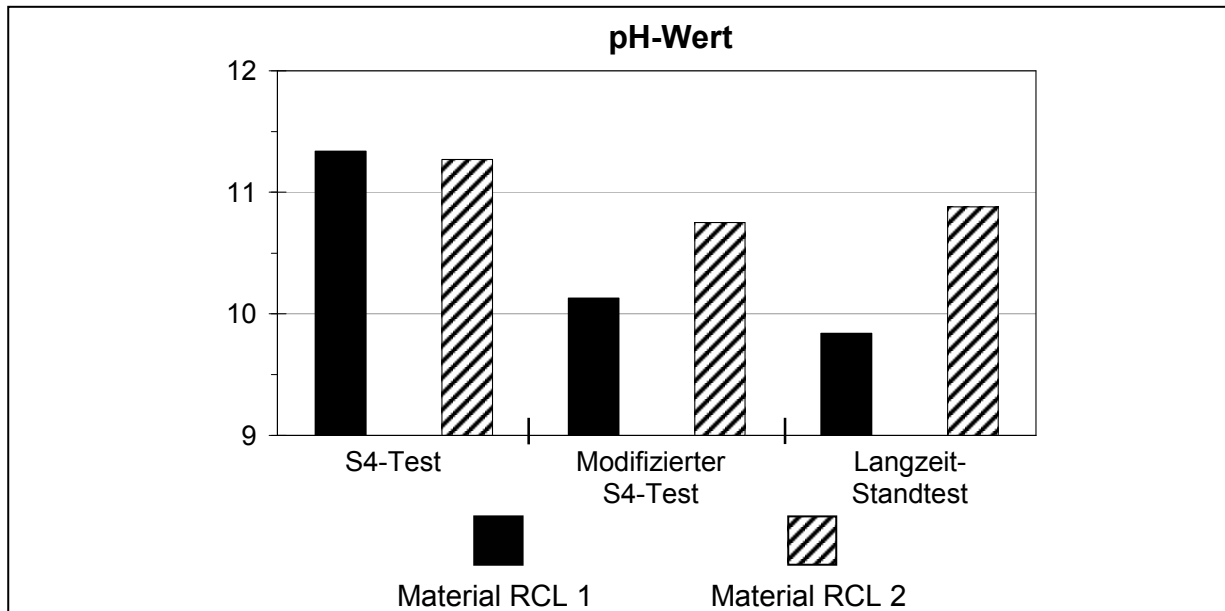
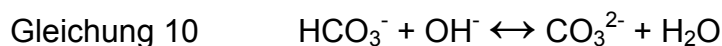


Abbildung 42: Gemessene pH-Werte beim S4-Test, Modifizierten S4-Test und Langzeit-Standtest mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2

Beim Modifizierten S4-Test und dem Langzeit-Standtest treten dagegen höhere pH-Werte bei Material RCL 2 auf. Da beim Modifizierten S4-Test die Erzeugung neuer Oberflächen wesentlich geringer ist im Vergleich zum S4-Test und beim Langzeit-Standtest Material in Originalkorngröße verwendet wurde, weist dies auf unterschiedliche Betonanteile mit verschieden ausgeprägter Carbonatisierung hin. Demnach ist im Unterschied zu Material RCL 1 bei RCL 2 Portlandit bei der dominanten Betonart in wesentlich größerem Maß vorhanden, was bei Modifiziertem S4-Test und Langzeit-Standtest eine größere Freisetzung von Hydroxiden und dementsprechend einen höheren pH-Wert zur Folge hat.

Nach DOW & GLASSER (2003) wird  $\text{CO}_3^{2-}$  die dominante aquatische Spezies, sobald  $\text{OH}^-$ -Ionen aus einer Quelle wie  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{KOH}$  oder  $\text{NaOH}$  vorhanden sind (Gleichung 10). Dabei wird die Reaktionsrate mit  $\text{CO}_2$  (Gleichung 11) in alkalischen Verhältnissen mit verstärkt auftretenden  $\text{OH}^-$ -Ionen erhöht.



Gelöstes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kann mit  $\text{CO}_3^{2-}$  reagieren und fällt als Calcit aus, wobei Portlandit schnell reagiert (BIN SHAFIQUE et al. 1998). Die Bestimmung der anorganischen Kohlenstoffspezies im Sickerwasser von Becken RCL 2 bestätigt das Vorhandensein von  $\text{CO}_3^{2-}$  bei Anstieg des pH-Wertes (Abbildung 17). Auf eine stattfindende Calcit ausfällung weisen neben zunehmenden Trübungswerten und Ablagerungen in der Probenahmeeinrichtung im Sammelschacht nach etwa 3 Monaten Versuchslaufzeit auch Untersuchungen von Filtrerrückständen per Röntgen-Diffraktometrie hin.

Der signifikante pH-Wert Anstieg in Becken RCL 2 nach 13 Monaten Versuchslaufzeit kann erklärt werden mit Carbonatisierungsreaktionen innerhalb des Recycling-Materials. Es ist davon auszugehen, dass atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Testfelder auf Grund der schnell ablaufenden Pufferreaktionen auf den oberen Materialbereich beschränkt war. Nach Untersuchungen von PALITZSCH (2002) mit Rostasche zeigte sich eine sehr geringe Eindringtiefe von CO<sub>2</sub> in eine Halde. Demzufolge kann in beiden Becken ein bestimmtes CO<sub>2</sub>-Vorkommen nach Einbau der Materialien existiert haben, das im Versuchsverlauf nicht wesentlich erneuert, sondern durch Carbonatisierungsreaktionen innerhalb des Recycling-Materials allmählich aufgebraucht wurde. Nach etwa 13 Monaten Versuchslaufzeit resultierte das Aufbrauchen des CO<sub>2</sub>-Vorkommens im Becken RCL 2 in einem pH-Wert Anstieg.

Bei den **Säulenversuchen** mit Material RCL 1 treten in den Eluaten der Säulen mit natürlicher Beregnungsrate (Säule 1 und 2) **pH-Werte** zwischen 7 – 8 auf und liegen damit im gleichen pH-Bereich, der sich bei den Feldversuchen im Sickerwasser von Becken RCL 1 einstellt.

Auf Grund der geringeren Korngröße in Säule 2 (0 - 10 mm  $\varnothing$ ) im Vergleich zu Säule 1 (0 - 45 mm  $\varnothing$ ) wären eventuell höhere pH-Werte durch Oberflächenvergrößerung und verstärkte Auflösung von Portlandit in Säule 2 zu erwarten gewesen. Bei Untersuchungen von MULDER (1991) zeichnet sich eine pH-Wert Erhöhung durch Korngrößenverkleinerung ab. Die aus dem Tracerversuch ermittelten unterschiedlichen Verweilzeiten von 29 Tagen in Säule 1 gegenüber mindestens 43 Tagen in Säule 2 scheinen jedoch einer Einstellung voneinander abweichender pH-Werte in beiden Säulen entgegenzuwirken zu haben. Durch die um mindestens 2 Wochen längere Kontaktzeit zwischen Festphase und Eluent in Säule 2 konnten demnach Carbonatisierungsreaktionen mit einem daraus resultierenden niedrigeren pH-Wert weiter fortschreiten (SCHUWIRTH 2002). Aus diesem Grund hatte die vergrößerte Zugänglichkeit von Portlandit beim klein gebrochenen Material keine signifikante pH-Wert Erhöhung zur Folge.

Für die Säule mit erhöhter Beregnungsrate und Material mit einer Korngröße von 0 - 10 mm (Säule 4) treten die höchsten pH-Werte aller Säulen bereits bei Versuchsbeginn auf. Daraus folgt, dass bei einer mittleren Verweilzeit von 64 Stunden in dieser Säule Carbonatisierungsreaktionen nicht in einer wesentlichen pH-Wert Absenkung resultieren konnten. Vielmehr scheinen die neu geschaffenen Oberflächen eine erhebliche Freisetzung von Hydroxiden wie Portlandit zur Folge gehabt zu haben, welche unter CO<sub>2</sub>-Einfluss nicht vollständig zu Carbonaten umgewandelt wurden. Die Säule mit Material in Originalkorngröße (0 - 45 mm  $\varnothing$ ) und erhöhter Beregnungsrate (Säule 3) zeigt bei einer mittleren Verweildauer von 51 Stunden deutlich höhere pH-Werte im Vergleich zu Säule 1 (mit derselben Korngröße und natürlicher Beregnungsrate). Durch die wesentlich geringere Verweildauer in Säule 3 resultierte das nicht vorhandene Gleichgewicht zwischen CO<sub>2</sub> und der Festphase demnach in einem höheren pH-Wert.

### 5.3.2 Bildung von Sekundärphasen und deren Einfluss auf Sorption

Bei den Feldversuchen wurden über die 21 Monate Versuchslaufzeit insgesamt ca. 1 kg an Partikeln aus Becken RCL 1 sowie etwa 4 kg aus Becken RCL 2 ausgetragen. Die Normierung der insgesamt ausgetragenen Partikelmenge auf RCL-Materialmasse und

Abflussvolumen ergibt dabei für Becken RCL 1 ca.  $0,7 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$  und für RCL 2 etwa  $3,5 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$ . Zum Vergleich tritt für Säule 2 mit ca.  $72 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$  der höchste Wert bei den Säulenversuchen auf. In Säule 1 beläuft sich die ausgetragene Partikelmenge auf etwa  $62 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$ , bei den Säulen mit erhöhter Beregnung treten in Säule 3 ( $43 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$ ) und Säule 4 ( $38 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{l}$ ) deutlich geringere Werte auf. Diese Zahlen deuten ein umfangreiches Auftreten von **Sekundärphasen**, insbesondere bei den Feldversuchen in Becken RCL 2, an.

Die Bildung von Sekundärphasen in den Testfeldern und bei den Säulenversuchen betrifft vor allem **Calcium**, das als Carbonat gefällt werden kann. Eine Ausfällung von Calciumcarbonat konnte in allen Säulen beobachtet werden (SCHUWIRTH 2002).

Die aufgeschlossenen Filterrückstände beider Becken zeigen höhere Gehalte an Mangan, Kobalt und Zink in den aufgelösten Partikeln. Da nach COMANS & MIDDELBURG (1987) diese Metalle an Calcit sorbiert werden können weisen die Ergebnisse darauf hin, dass bei den Feldversuchen diese Stoffe an Calcit sorbiert und letztendlich in den Filterrückständen angereichert werden konnten.

Das Auftreten von Mangan kann weitere Ursachen haben. Höhere Gehalte an **Aluminium, Eisen und Mangan** insbesondere in den Filterrückständen von Becken RCL 2 deuten an, dass sich in diesem Testfeld Oxid- bzw. Hydroxidminerale dieser Elemente bilden konnten. Nach SPARKS (1998) können sich die Metalloxide und -hydroxide direkt aus der Verwitterung primärer Silicate entwickeln oder durch Umwandlung von Tonmineralen wie Kaolinit entstehen.

Die Braunfärbung der Filterrückstände, insbesondere von Becken RCL 2, weist ebenfalls auf Eisenhydroxide hin, die auf Grund von röntgenamorphen Eigenschaften bei der Röntgen-Diffraktometrie nicht nachgewiesen werden konnten. Bei Untersuchungen von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (2000a) bildeten sich bei mehrmonatigen Laborlysimeterversuchen mit Schlacke während der Elution Eisenhydroxide als neue Phasen bei pH-Werten größer 10. Auf Grund des alkalischen Milieus in den letzten Monaten der Feldversuche in Material RCL 2 konnten sich Eisenhydroxide vermutlich ebenfalls in diesem Becken bilden, wobei Eisenkonzentrationen in den Sickerwässern beider Becken während der Feldversuche konstant kleiner  $0,6 \text{ mg/l}$  bleiben. Eisenverbindungen weisen eine erhöhte Sorptionskapazität für Schwermetalle auf und können als sekundäre Speicherminerale Schwermetalle und Oxoanionen nicht nur stark adsorbieren, sondern bei Neubildungsvorgängen auch inkorporieren (GERTH 2001, KERSTEN 1996).

Bei Untersuchungen mit den Einzelkomponenten stellen sich Natursteine als Quelle für die Eisen- und Manganfreisetzung dar, Mangan wurde zudem aus Asphalt und Schlacke eluiert.

**Ettringit** kann als neue Phase im alkalischen Milieu auftreten, wodurch eine Bildung in den letzten Monaten Versuchslaufzeit in Becken RCL 2 möglich war. Allerdings ist zu beachten, dass Ettringit bei pH-Werten kleiner 10,7 instabil wird und dies wiederum eine Auflösung dieser neu gebildeten Phase bewirken kann. Untersuchungen mit Rostasche zeigen die Bildung von Ettringit nach mehreren Wochen Lagerung (GIAMPAOLO et al. 2002, PALITZSCH 2002, TAYLOR 1997).

Nach VENHUIS & REARDON (2001) kann Gibbsit ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) als Carbonatisierungsprodukt aus  $\text{AF}_m$ -Phasen und Ettringit entstehen. Vermutlich trat das Aluminiumoxid in beiden Testfeldern auf, da Gibbsit erst im stark sauren Bereich nicht mehr stabil ist (DE GROOT

et al. 1989, JASMUND & LAGALY 1993).

Bei den Partikeln, welche die Trübung in den Sickerwasserproben verursachten, konnten neben Calcit auch Kaolinit und Illit in Filtrerrückständen beider Becken per Röntgen-Diffraktometrie nachgewiesen werden. Nach JASMUND & LAGALY (1993) ist die Tonmineralneubildung ein lang dauernder Prozess. Daher ist das Auftreten von Kaolinit und Illit in den Filtrerrückständen vorwiegend der mechanischen Zerkleinerung über Wirkung des Frostes sowie Quellung und Schrumpfung zuzuschreiben. Das Ausmaß des Auftretens dieser Tonminerale hängt dabei vom Gehalt an potentiell tonbildenden Mineralen wie beispielsweise Feldspäte und Glimmer in den Bauschutt-Materialien ab.

### 5.3.3 Prozesse bei der Hauptelementfreisetzung

Neben Calcium zeigt sich bei den Feldversuchen auch für Chlorid, Nitrat, Sulfat und Magnesium in beiden Becken eine erhöhte Freisetzung in den ersten Monaten der Laufzeit. Da die Versuche im Oktober 2001 gestartet wurden und die Temperaturen in den Monaten darauf absanken, ist diese Freisetzung nicht auf Einfluss durch Temperaturzunahme zurückzuführen. Der Grund für die erhöhte Freisetzung liegt vielmehr in einer Abwaschphase, während der diese Elemente anfänglich aus leicht verfügbaren Formen auf den Materialoberflächen freigesetzt wurden (Tabelle 8). Dies fand solange statt, bis das jeweilige Vorkommen an leicht verfügbaren Substanzen durch den Abtransport mit Sickerwasser aufgebraucht war.

Ein Vergleich beider Becken zeigt, dass für die besagten Elemente die Konzentrationen im Sickerwasser aus Becken RCL 1 teilweise deutlich höher sind als aus RCL 2. Ein Grund hierfür könnten unterschiedliche Gehalte verschiedener Betonarten mit unterschiedlich ausgeprägten Salzausblühungen in beiden Materialien sein.

Weiter ist es möglich, dass nur geringe Unterschiede in den Sickerwassergeschwindigkeiten und somit im Wasserhaushalt beider Becken die Konzentrationsunterschiede vor allem während der anfänglichen Auswaschphase bewirkt haben. Untersuchungen zeigen, dass sich Sickerwasser im Winter längere Zeit in Probenkörpern befinden kann als im Sommer (JOHNSON et al. 1998). Durch die längere Verweildauer und somit längere Kontaktzeit des Wassers mit dem Material im Winter 2001/2002 können schon geringe Unterschiede in der Sickerwassergeschwindigkeit zu höheren Konzentrationen in Becken RCL 1 geführt haben. Je länger die Verweilzeit des Eluenten im Material ist, desto eher ist mit dem Erreichen eines Gleichgewichtszustandes zu rechnen.

Zemente mit einem hohen Alkaligehalt haben oft auch einen großen Sulfatgehalt zur Regelung des Erstarrens. Sulfate sind die wichtigste und bekannteste Gruppe von Salzmineralien in Mauerwerken (ARNOLD 1981, KRAUS 2002, SPRINGENSCHMID et al. 1993). Für **Sulfat** kann von Frühjahr bis Herbst 2001, mit zunächst steigenden und dann fallenden Temperaturen, ein Konzentrationsanstieg und –abfall in beiden Becken deutlich beobachtet werden. Auch für 2002 ist bis zur Einstellung der Feldversuche ein Konzentrationsanstieg im Sickerwasser beider Becken mit ansteigenden Temperaturen vorhanden. Nach der anfänglichen oberflächlichen Abwaschung ist bei Sulfat eine temperaturabhängige Freisetzung aufgetreten (Abbildung 43).

Schüttelversuche mit der fein gemahlene Einzelkomponente Ziegel ergaben höhere Sulfatkonzentrationen im Eluat, was bei einer Untersuchung von HAMER (2002) ebenfalls auftrat. Daher bildet die Stoffgruppe der Ziegel in den Recycling-Materialien eine weitere mögliche Quelle der Sulfatfreisetzung. Eine Freisetzung aus Gips wäre ebenfalls denkbar, weil Gips nach ARNOLD (1981) verwitterungsaktiv ist. Da Gips nach JAU-BERTHIE & RENDELL (2003) jedoch bei neutralen pH-Werten eine relativ geringe Löslichkeit besitzt, ist Gips als wesentliche Quelle für die Sulfatfreisetzung, zumindest in Becken RCL 1, eher auszuschließen.

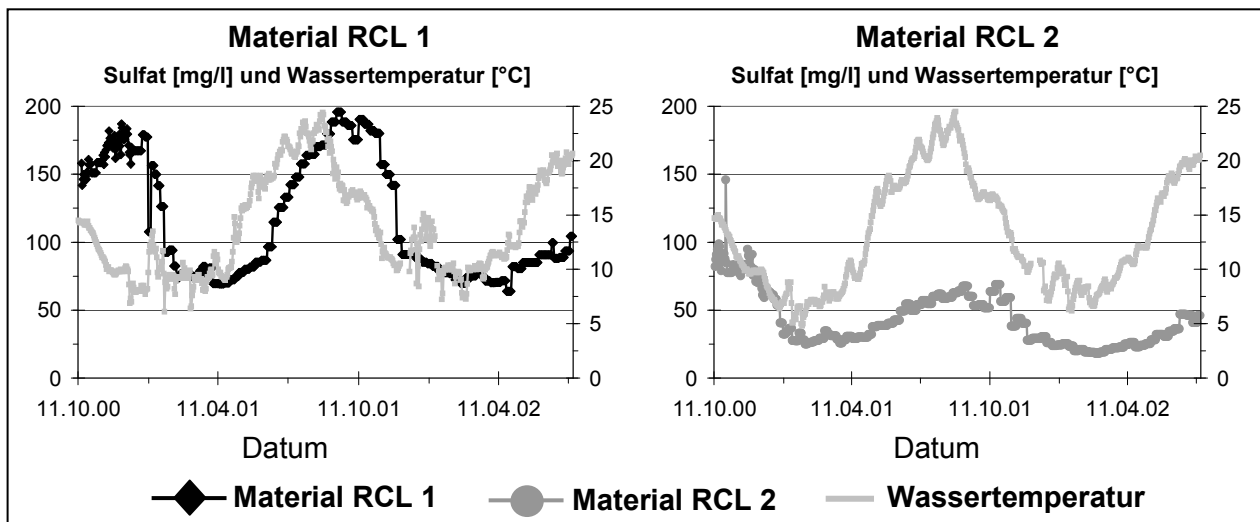


Abbildung 43: Sulfatkonzentration (linke y-Achse) und Wassertemperatur (rechte y-Achse) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 (linke Hälfte) und RCL 2 (rechte Hälfte)

Bei den Säulenversuchen mit konstanten Randbedingungen hinsichtlich Temperatur und Beregnungsrate können aus einer doppel-logarithmischen Ergebnisauftragung der Freisetzungsrates gegen die Zeit Aussagen zu vorherrschenden Prozessen bei der Stofffreisetzung abgeleitet werden (Abschnitt 2.4.2). Bei Sulfat stellt sich in den Säulen mit natürlicher (Säule 1 und 2) und erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) bis zur Einstellung der Versuche eine Steigung von  $-1$  ein (Abbildung 44). Da dieser Steigungswert langfristig bei den vier Säulen auftritt, ist die Freisetzung aus dem heterogenen Korngemisch als dominanter Prozess bei der Sulfatfreisetzung anzusehen. Oberflächliche Stoffabwaschung zeigt sich zwar ebenfalls an einer Steigung von  $-1$ , ist jedoch ein kurzfristiger Prozess. Die Ergebnisse aus den Säulenversuchen weisen darauf hin, dass bei den Feldversuchen neben oberflächlicher Abwaschung und temperaturabhängiger Freisetzung auch von einer Sulfatfreisetzung aus der feinkörnigen Fraktion des heterogenen Korngemisches insbesondere zu Versuchsbeginn auszugehen ist.

Die Feldversuche zeigen bei **Chlorid** nach einer oberflächlichen Abwaschung in den ersten Monaten in beiden Becken zumindest für Material RCL 2 einen Einfluss der Temperatur auf die Stofffreisetzung. Bei den Säulenversuchen ergibt sich vergleichbar zu Sulfat ebenfalls langfristig die Freisetzung aus den verschiedenen Fraktionen des Korngemisches als vorherrschender Prozess (Abbildung 44). Demnach geben die Säulenversuche den Hinweis darauf, dass dieser Freisetzungsmechanismus auch bei den Feldversuchen aufgetreten ist.

Für **Nitrat** kann bei den Feldversuchen nach einer anfänglichen Abwaschung mit steigenden und dann fallenden Temperaturen im Jahr 2001 ein Konzentrationsanstieg und

–abfall in beiden Becken beobachtet werden. Allerdings ist dieser im Vergleich zu Sulfat weniger deutlich ausgeprägt. Als mögliche Quelle für Nitrat kommt Beton bzw. Mauerwerk aus dem Bereich der Grundfeuchte und der Sickerwässer aus Ställen, Kloaken sowie Friedhöfen in Betracht (ARNOLD 1981).

Für **Calcium** werden die bei Feld- und Säulenversuchen aufgetretenen Konzentrationen hauptsächlich von der Auflösung von Portlandit beeinflusst (Abschnitt 5.3.1). Die Säulenversuche zeigen für die Säulen mit erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) nach einer zu Beginn auftretenden oberflächlichen Stoffabwaschung (Steigung = -1) die kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche (Steigung = 0) als dominanten Prozess (Abbildung 44).

Für Natrium und Kalium ist als wesentliche Quelle bei der Stofffreisetzung der Zement anzusehen (GLASSER 1997). Bei **Natrium** deuten Konzentrationsverläufe im Sommer 2001 auf einen Temperatureinfluss auf die Stofffreisetzung in beiden Becken hin, ansteigende Temperaturen im Frühjahr 2002 rufen allerdings keinen wesentlichen Konzentrationsanstieg hervor.

Nach ARNOLD (1981) können Ausblühungen an Beton und Mörteln aus Natriumcarbonat oder Natriumsulfat oder einem Gemisch von beiden bestehen. Größere Sommerniederschläge mit höheren Temperaturen könnten die Auswaschung von Natriumsulfat zur Folge gehabt haben. Eine Betrachtung der molaren Gehalte von Natrium und Sulfat (Abbildung 16) zeigt, dass Auflösung und Abtransport dieses Salzes im Sommer 2001 die aufgetretenen Konzentrationen im Sickerwasser von Becken RCL 1 teilweise erklären könnten. Natriumkonzentrationen in Becken RCL 2 sind dagegen zu hoch, um allein über diesen Prozess erklärt zu werden. In diesem Material könnten andere natriumhaltige Salze ebenfalls aufgelöst worden sein, was wiederum unterschiedliche Gehalte verschiedener Betonarten (Abbildung 41) mit unterschiedlich ausgeprägten Salzausblühungen in beiden Materialien andeuten würde.

Die Säulenversuche zeigen bei den Freisetzungsraten für Natrium ähnliche Kurvenverläufe wie bei Sulfat (Abbildung 44). Demzufolge ist bei einer langfristig vorherrschenden Steigung von -1 die Freisetzung aus den verschiedenenkörnigen Fraktionen des Korngemisches als dominanter Prozess anzusehen.

Auf Grund der geringen **Kalium**konzentrationen in den ersten Monaten Versuchslaufzeit ist keine wesentliche Auswaschung von leicht löslichen, kaliumhaltigen Salzen anzunehmen. Nach einer Untersuchung von CONSTANTINER & DIAMOND (2003) trat bei mehrmonatigen Versuchen mit zementbürtigen, feldspathhaltigen Materialien eine kontinuierliche Freisetzung von Kalium und Natrium auf. Als Quelle für die in der Porenlösung ermittelten Alkalien wurde Feldspat nachgewiesen. Da diese Ergebnisse bei Material in Feinfraktion auftraten, ist bei grobkörnigen Materialien von einem langsameren Prozess auszugehen. Von den Alkalien steigen die Natriumkonzentrationen in beiden Becken vergleichsweise schnell an, weshalb nicht von einer Freisetzung aus Feldspatauflösung als Ursache hierfür auszugehen ist. Dagegen könnte bei den allmählich zunehmenden Kaliumkonzentrationen in Becken RCL 2 die Freisetzung aus Feldspat zu den ermittelten Gehalten beigetragen haben.

Die Säulenversuche weisen bei der Freisetzungsraten ebenfalls nicht auf eine Abwaschung leicht löslicher Salze hin (Abbildung 44). Vielmehr deuten die Säulen mit natürli-

cher Beregnungsrate (Säule 1 und 2) mit einer relativ konstanten Steigung von 0 eine kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche als dominanten Prozess an. Säule 3 und 4 (erhöhte Beregnungsrate) weisen dagegen mit einer Steigung von  $-0,5$  auf porenraumretardierte Freisetzung als wesentlicher Prozess hin. Offensichtlich spielt die Verweilzeit des Eluenten eine entscheidende Rolle, da bei erhöhter Beregnung und kürzerer Verweildauer durch zunehmende Auslaugung oberflächennaher Bereiche die Kaliumnachlieferung aus tieferen Materialschichten per Diffusion zunehmend mehr Zeit in Anspruch nimmt. Dagegen reicht in Säule 1 und 2 die Verweildauer des Eluenten für die Konstanthaltung der Freisetzungsrates aus.

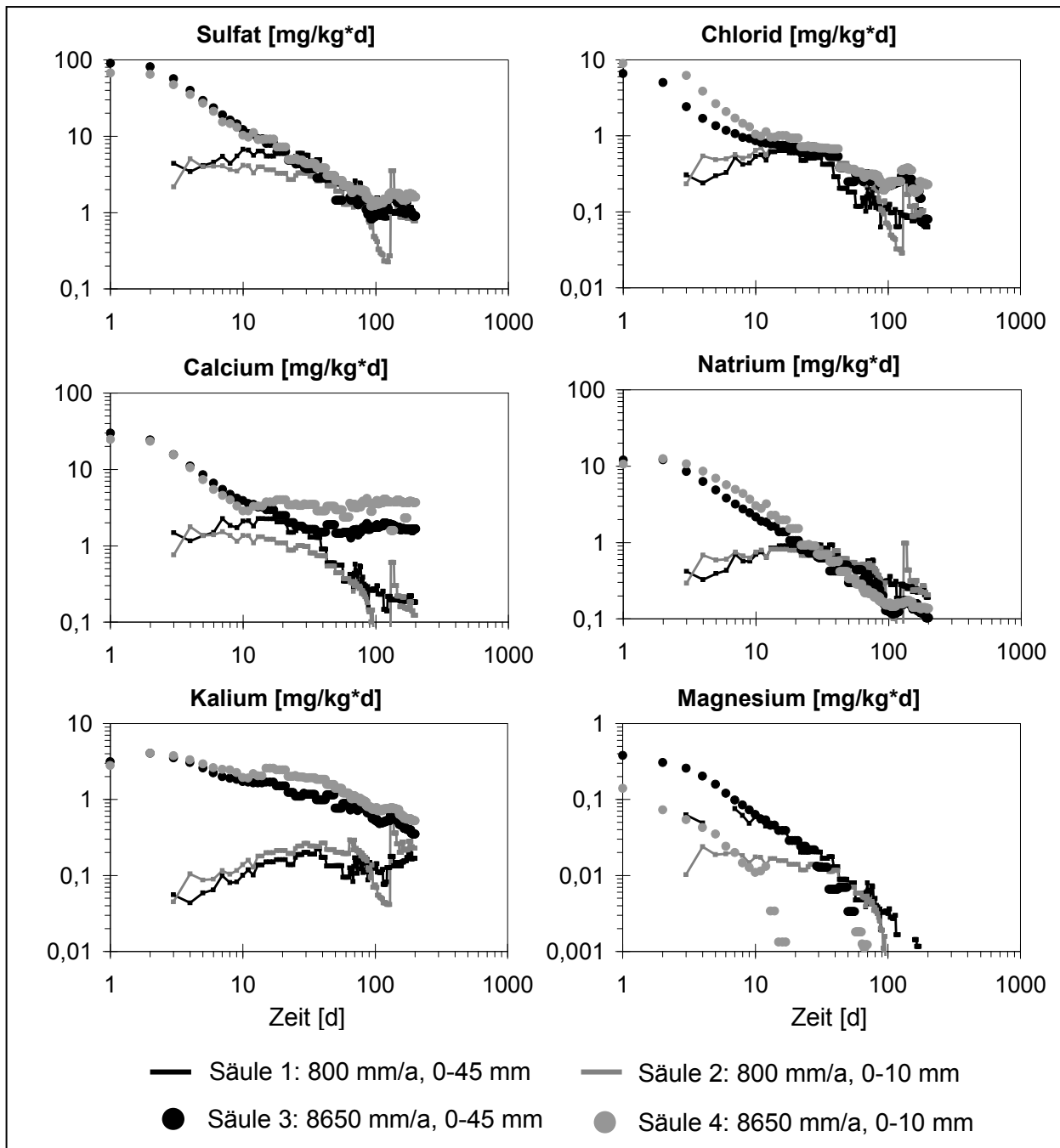


Abbildung 44: Ermittelte Freisetzungsraten  $[\text{mg/kg}\cdot\text{d}]$  aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Hauptelemente

Für **Magnesium** ist bei den Feldversuchen nach der oberflächlichen Abwaschung in den ersten Monaten der Temperatureinfluss schwächer ausgeprägt, jedoch in Becken RCL 1 zu erkennen. Die Freisetzungsraten bei den Säulenversuchen weisen ebenfalls auf oberflächliche Stoffabwaschung als auftretender Prozess hin (Abbildung 44).

Da zwischen **elektrischer Leitfähigkeit** und **Beckenabfluss** keine Korrelation auftritt (Anhang E 37), ist die Mächtigkeit der Recycling-Materialschicht von 0,5 m als ausreichend anzusehen für das Erreichen einer Sättigung bei den Feldversuchen.

### 5.3.4 Prozesse bei der Spurenelementfreisetzung

Während die **Arsen**konzentrationen in Becken RCL 1 durchgehend gering bleiben, steigen die Gehalte im Sickerwasser von RCL 2 auf Höchstwerte bis knapp unter 120 µg/l an. Der Konzentrationsanstieg in Becken RCL 2 erfolgt dabei bereits vor der signifikanten pH-Wert Zunahme (Abbildung 16, Abbildung 18). Bei der Untersuchung der fein gemahlten Einzelkomponenten ergeben sich vergleichsweise hohe Arsengehalte in den Eluaten der Stoffgruppen Asphalt, Schlacke und Natursteine (Abbildung 30). Diese Stoffgruppen weisen in beiden Materialien keine wesentlichen Unterschiede bei den Massenanteilen auf. Daher sind Arsenkonzentrationen in Becken RCL 2 nicht auf Grund wesentlich höherer Anteile der für die Freisetzung relevanten Stoffgruppen in diesem Material begründbar.

Die Modellierung dominanter Arsenspezies im Sickerwasser von Becken RCL 1 und 2 mit PhreeqC (PARKHURST & APPELO 2002) zeigt, dass Arsenat bei den ermittelten Redox- und pH-Bedingungen vorherrscht (Abbildung 45, vgl. Tabelle 12). Dieses Ergebnis stimmt mit Ausführungen von MANNING et al. (2002) überein, nach denen Arsenatspezies unter oxidierenden Bedingungen dominieren. Nach den Modellierungsergebnissen tritt im wesentlichen  $\text{HAsO}_4^{2-}$  im Sickerwasser bei den Feldversuchen auf.

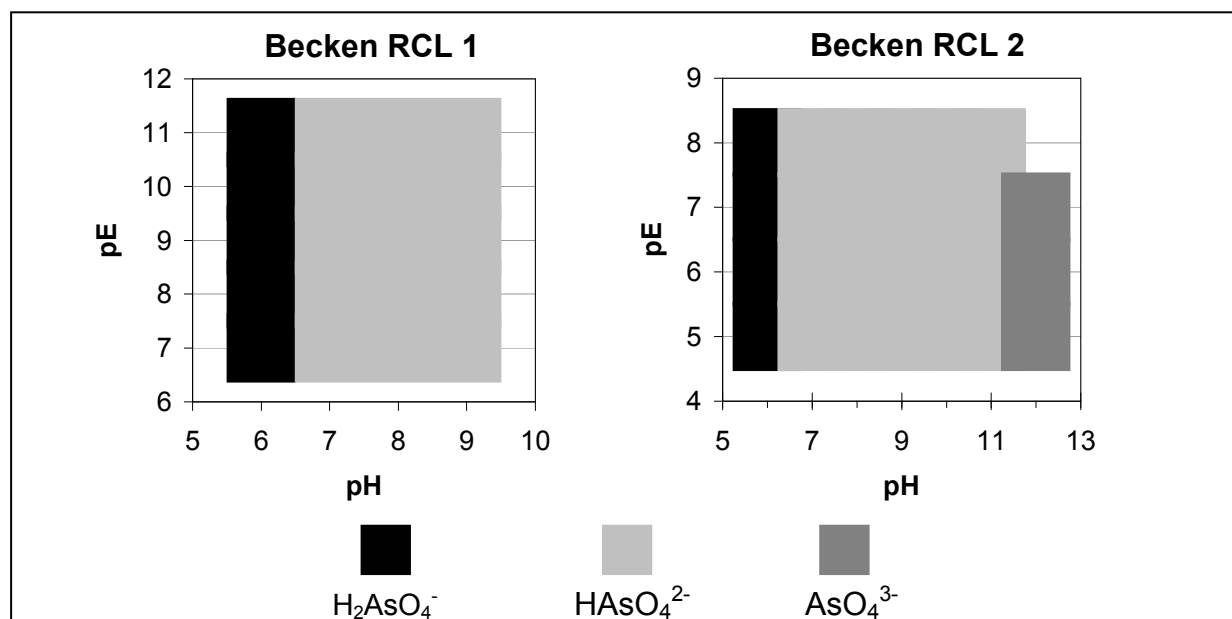


Abbildung 45: Modellierung mit PhreeqC (PARKHURST & APPELO 2002): Vorherrschende Arsenspezies in den Sickerwässern von Becken RCL 1 und 2 bei den ermittelten Messbereichen von pH- und pE-Wert (Konzentrationswerte für die Modellierung entsprechen den Werten vom 16.01.02 für Becken RCL 1 und 2)

Die pH-Wert Unterschiede zwischen Becken RCL 1 und 2 und hierdurch hervorgerufene abweichende Freisetzungsraten bzw. Lösungsprozesse könnten als Ursache für die signifikanten Konzentrationsunterschiede bei den Feldversuchen herangezogen werden. Danach haben seit Beginn der Feldversuche höhere pH-Werte in Becken RCL 2 im Vergleich zu RCL 1 umfangreichere Lösungsprozesse von Arsen verursacht.

Allerdings zeigt sich bei Untersuchungen von DANKWARTH & GERTH (2002), dass die Arsenkonzentration im Sickerwasser im Wesentlichen durch Sorptionsprozesse gesteuert wird und nicht durch Lösungs- und Fällungsprozesse. Demnach sind andere Faktoren für die Konzentrationsunterschiede zwischen Becken RCL 1 und 2 verantwortlich zu machen.

Bei Arsenatspezies besteht tendenziell eine größere Abstoßung bei ansteigenden pH-Werten mit einhergehender Zunahme der negativ geladenen Oberflächen (Abschnitt 2.4.4, vgl. Tabelle 13). Demzufolge nimmt bei ansteigendem pH-Wert die Bindungsstärke bei der Sorption von Arsenat ab. Wie die Modellierungsergebnisse zeigen, sind Arsenatspezies unter den oxidierenden Bedingungen im Sickerwasser beider Becken vorherrschend. Daher kann durch höhere pH-Werte in Becken RCL 2 entsprechend eine umfangreichere Desorption von Arsenat in diesem Becken stattgefunden haben (Abbildung 46).

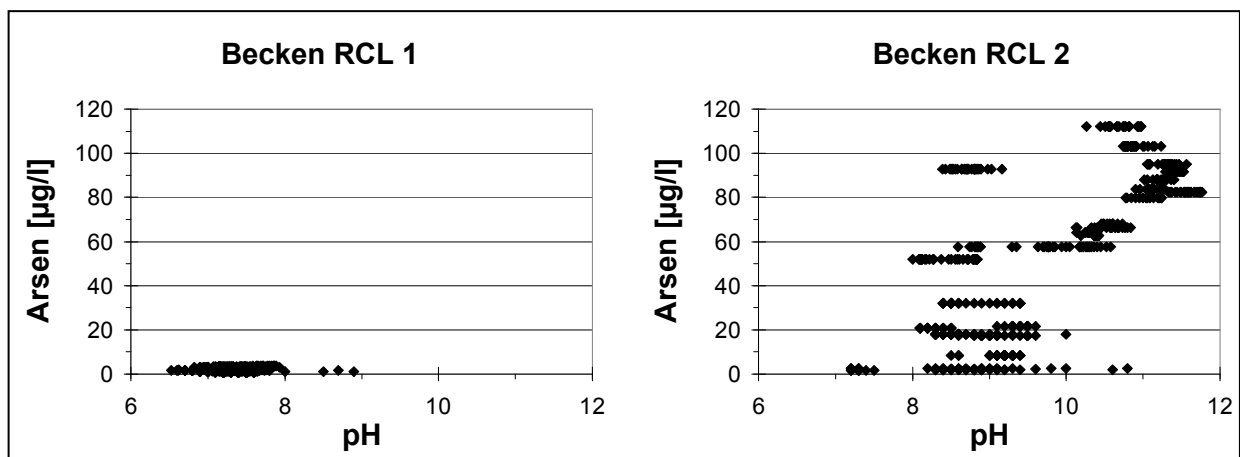


Abbildung 46: Korrelation zwischen ermittelten Arsenkonzentrationen und pH-Werten bei den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2

Die bis zum Frühjahr 2001 ausbleibende Arsenfreisetzung in Becken RCL 2 ist erklärbar mit dem mobilitätshemmenden Effekt, den Calcium auf Arsen bei erhöhter Ionenstärke auf Grund einer Abschwächung von abstoßenden Kräften haben kann (DANKWARTH & GERTH 2002, VAN DER SLOOT 1991). Demnach ist es möglich, dass erhöhte Calciumgehalte in den Anfangsmonaten die Arsenfreisetzung in Becken RCL 2 unterbunden haben. Nach Rückgang der Calciumgehalte steigen Arsenkonzentrationen in Becken RCL 2 an (Abbildung 47).

Der Konzentrationsrückgang in Becken RCL 2 nach Erreichen der Höchstkonzentration kann zum einen im Aufbrauch des vorhandenen desorbierbaren Arsenvorkommens begründet sein. Eine durch den pH-Wert Anstieg verursachte Bildung von eisen-, aluminium- bzw. manganhaltigen Sekundärphasen sowie von Ettringit (Abschnitt 2.4.4) kann mit der Sorption von Arsen an diesen Sekundärmineralen ebenfalls hierfür verantwortlich sein. Für genauere Rückschlüsse auf den für den Konzentrationsrückgang verantwortlichen Prozess müsste der weitere Verlauf der Arsenkonzentration in Becken

RCL 2 bekannt sein. Bei stetigem Rückgang wäre von einem Verbrauch auszugehen, ein erneuter Konzentrationsanstieg würde in Abhängigkeit vom pH-Wert für eine Freisetzung nach der Auflösung von Sekundärphasen sprechen.

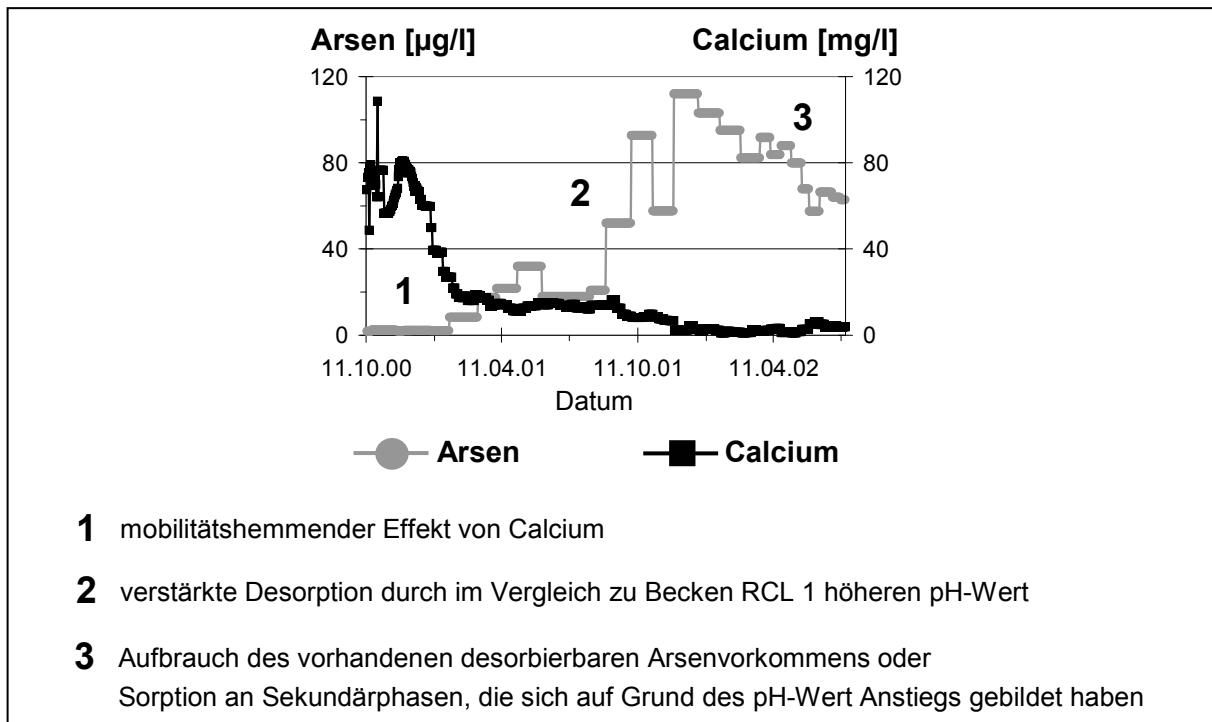


Abbildung 47: Für den Konzentrationsverlauf von Arsen in Becken RCL 2 verantwortliche Prozesse

Mit Ausnahme eines leichten Anstiegs bei Säule 1 (natürliche Beregnungsrate) gegen Versuchsende zeigen die Säulenversuche für Arsen eine relativ konstante Freisetzungsrates (Steigung = 0), was auf eine kontinuierliche Freisetzung von der Materialoberfläche als dominanter Prozess hinweist (Abbildung 48). Dabei treten deutlich höhere Freisetzungsrates bei den Säulen mit erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) im Vergleich zu Säule 1 und 2 auf. Dies kann auf Grund der wesentlich höheren pH-Werte in Säule 3 und 4 und der geringeren Verweildauer in diesen Säulen auf eine erhöhte Desorption von Arsenat in diesem Milieu hinweisen.

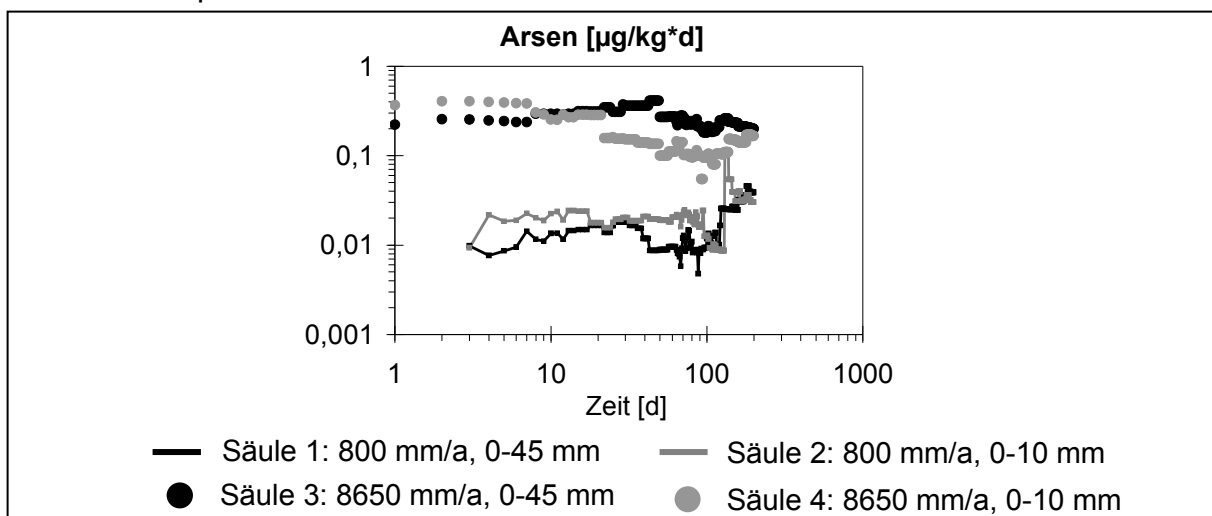


Abbildung 48: Ermittelte Freisetzungsrates  $[\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{d}]$  aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Arsen

Bei **Aluminium** ist deutlich die Einwirkung des pH-Wertes auf die Stofffreisetzung in beiden Becken zu erkennen (Abbildung 49). In Becken RCL 1 herrschen während der gesamten Versuchslaufzeit relativ konstante pH-Werte zwischen 6,5 und 8 vor, ebenso bleiben die Aluminiumkonzentrationen im Sickerwasser aus diesem Becken durchgehend gering. In Becken RCL 2 liegen die pH-Werte für ungefähr 13 Monate zunächst zwischen 8 und 10, Aluminiumkonzentrationen bleiben in diesem Zeitraum ebenfalls gering. Der sprunghafte Anstieg des pH im November 2001 auf Werte bis knapp unter 12 verursacht einen raschen Konzentrationsanstieg in Becken 2. Danach hat ein leichtes Absinken der pH-Werte ab Mai 2002 wiederum einen Rückgang der Aluminiumkonzentrationen zur Folge.

Bei den Säulenversuchen zeigt sich für Aluminium eine zu den Feldversuchen vergleichbare Abhängigkeit der Stofffreisetzung vom pH-Wert. In Säule 3 und insbesondere Säule 4 nehmen Konzentrationen zeitgleich zum pH-Wert Anstieg zu.

Wie die Untersuchungen mit den fein gemahlten Einzelkomponenten zeigen, ist Beton als wesentliche Quelle für die Aluminiumfreisetzung anzusehen.

Bei **Silicium** werden die Konzentrationen in den Sickerwässern beider Becken durch den pH-Wert und vermutlich auch die Temperatur beeinflusst (Abbildung 49). In Becken RCL 1 ist mit dem relativ konstanten pH-Wert während der Versuchslaufzeit ein Konzentrationsanstieg und -abfall parallel zur Temperatur für 2001 und 2002 zu beobachten.

Nach MATTHEß (1990) nimmt die Differenz aus Sättigungskonzentration und Konzentration in einer Lösung im Allgemeinen mit steigender Temperatur zu, daher können bei ansteigenden Temperaturen Konzentrationen ebenfalls zunehmen.

Aus diesem Grund ist es möglich, dass sich bei höheren Sommertemperaturen im Porensystem des Zementsteins größere Mengen an Silicium in der Porenflüssigkeit gelöst haben als im Winter. In Becken RCL 2 steigen und sinken die Gehalte im Sommer 2001 ebenfalls entsprechend der Außentemperatur. Der pH-Wert Anstieg im Winter 2001/2001 verursacht ein deutliches Ansteigen der Siliciumkonzentrationen im Sickerwasser aus Becken RCL 2, die bei vergleichbar niedrigen Temperaturen im Winter 2000/2001 geringer waren. Mit sinkendem pH-Wert im Frühjahr 2002 fallen die Konzentrationen ebenfalls zunächst, bis der Temperaturanstieg den pH-Wert Einfluss überlagert und Gehalte wiederum ansteigen. Bei Vergleich der aufgetretenen Konzentrationsmaxima in beiden Becken ist der pH-Wert als dominanter Parameter für die Freisetzung anzusehen.

Die Säulenversuche zeigen bei konstanten Temperatur- und Beregnungsverhältnissen eine relativ konstante Steigung von 0 bei den Freisetzungsraten aller Säulen (Abbildung 50). Dies weist ebenso wie bei Calcium auf eine kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche als dominanter Prozess hin. In den Säulen mit erhöhter Beregnungsrate (Säule 3 und 4) treten deutlich größere Freisetzungsraten auf im Vergleich zu Säule 1 und 2. Dies ist auf die wesentlich höheren pH-Werte in Säule 3 und 4 zurückzuführen und zeigt auf Grund der geringeren Verweildauer in diesen Säulen eine erhöhte Löslichkeit in diesem Milieu an.

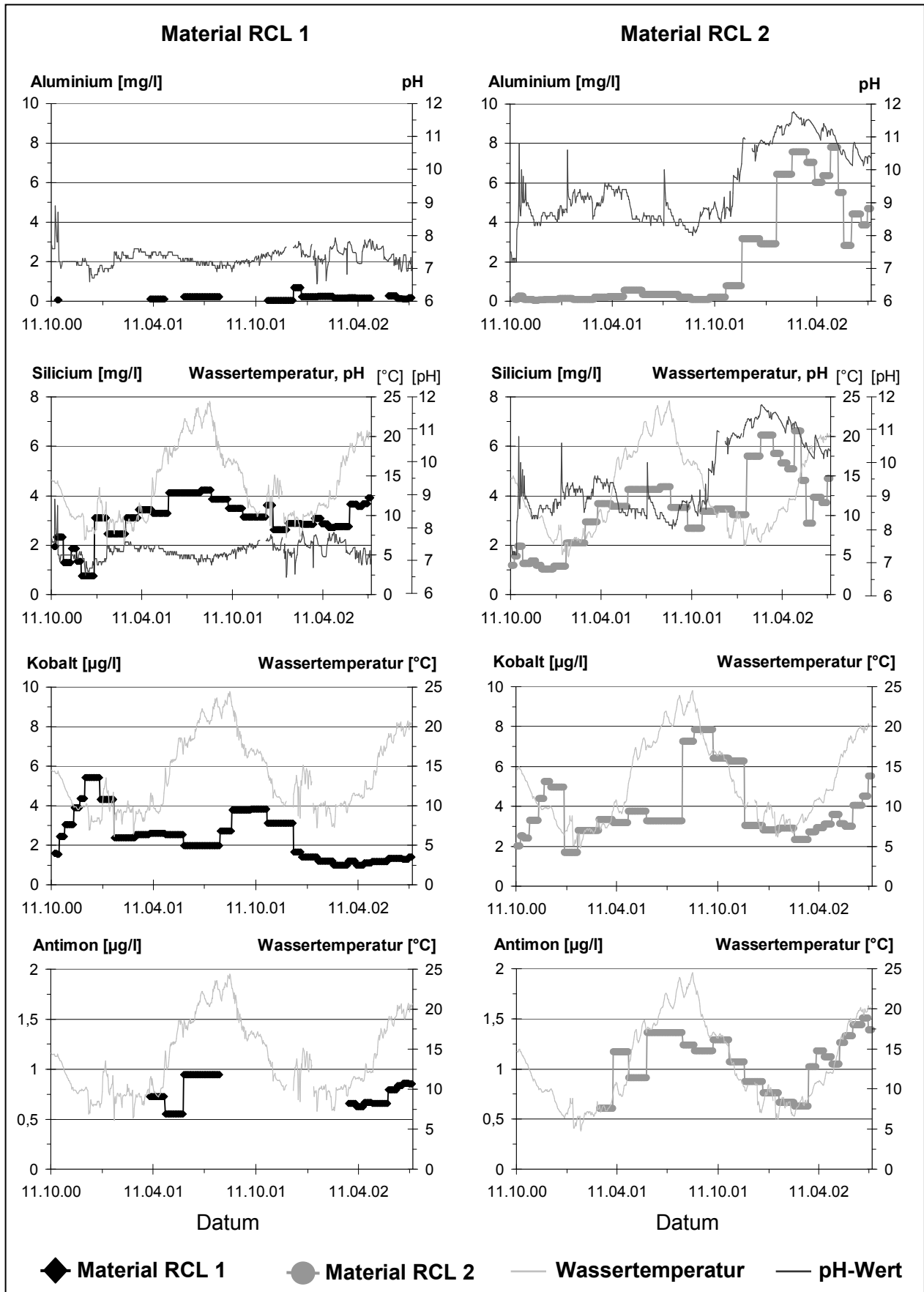


Abbildung 49: Elementkonzentrationen (linke y-Achse), Wassertemperatur bzw. pH-Wert (rechte y-Achse) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 (linke Hälfte) und RCL 2 (rechte Hälfte)

Bei **Kobalt** sind mehrere Prozesse für den Konzentrationsverlauf im Sickerwasser beider Becken verantwortlich zu machen. In den Anfangsmonaten trat zunächst eine oberflächliche Abwaschung von leicht verfügbarem Kobalt auf, was zu höheren Konzentrationen bei beiden Materialien führte (Abbildung 49). Ähnlich zu Silicium könnten sich bei höheren Sommertemperaturen im Porensystem des Zementsteins größere Mengen an Kobalt in der Porenflüssigkeit gelöst und höhere Gehalte im Sickerwasser verursacht haben. Dies würde vor allem den Konzentrationsverlauf in Becken RCL 2 erklären. In diesem Becken treten die Höchstkonzentrationen vor dem signifikanten pH-Wert Anstieg auf und sind somit nicht durch diese Einflussgröße erklärbar.

Allerdings ist der Rückgang der Kobaltkonzentration in Becken RCL 2 verbunden mit pH-Wert Anstieg und der möglichen Bildung von Ettringit. Diese neu gebildete Phase kann Kobalt eingebunden und nach Auflösung wiederum freigesetzt haben (Tabelle 10). Eluatgehalte bei den aufgeschlossenen Filterrückständen, insbesondere von Becken RCL 2, deuten außerdem auf eine verstärkte Sorption von Kobalt an Partikeln wie beispielsweise Calcit hin.

Die Säulenversuche zeigen anfänglich größere Freisetzungsraten bei erhöhter Beregnung (Säule 3 und 4), was durch ähnlich hohe Werte in beiden Säulen unabhängig von der Korngröße auftritt (Abbildung 50). Im Vergleich zu Säule 1 und 2 ist der Grund hierfür in geringeren Kobaltkonzentrationen auf Grund der kürzeren Verweildauer des Eluenten in Säule 3 und 4 zu suchen, wodurch sich das System bei den Säulen mit erhöhter Beregnungsrate weiter weg vom Gleichgewicht befindet als in Säule 1 und 2. Dies macht sich zu Beginn in höheren Freisetzungsraten bemerkbar, die darauf in den Säulen mit erhöhter Beregnung auf Grund einer schnellen Auslaugung des leicht löslichen Kobaltvorkommens im Material zurückgehen. In den Säulen mit natürlicher Beregnungsrate (Säule 1 und 2) deuten die Ergebnisse auf porenraumretardierte Freisetzung (Steigung = -0,5) als langfristig wesentlicher Prozess hin.

Nach der Untersuchung der Einzelkomponenten kommen im wesentlichen Natursteine und Beton als mögliche Quellen für die Kobaltfreisetzung in Frage.

Konzentrationsunterschiede bei **Molybdän** in beiden Becken können mehrere Ursachen haben. Die unterschiedlichen pH-Werte bei RCL 1 und 2 seit Beginn der Feldversuche könnten maßgeblich die Freisetzung beeinflusst haben. Demnach förderten die höheren pH-Werte in Becken RCL 2 die Molybdänfreisetzung im Vergleich zu den nahezu neutralen Bedingungen in RCL 1. Einen Hinweis hierauf geben Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen (Abschnitt 4.3.4), bei denen für beide Testfeld-Materialien größere Molybdängehalte bei höheren pH-Werten, zumindest bis pH 8, auftreten. Allerdings zeigt Molybdän nach DE GROOT et al. (1989) eine maximale Freisetzung bei neutralen pH-Werten, Stoffkonzentrationen nehmen zum sauren bzw. alkalischen Bereich hin ab. Hiernach ist ein pH-Wert Einfluss auf die Molybdänfreisetzung bei den Feldversuchen weniger plausibel. Eine andere Erklärungsmöglichkeit für die Konzentrationsunterschiede bietet der sommerliche Temperatureinfluss, der insbesondere in Becken RCL 2 erhöhte Konzentrationen bei ansteigender Temperatur zur Folge gehabt haben kann.

Die höchsten Eluatgehalte bei der Untersuchung der fein gemahlene Einzelkomponenten treten bei Asphalt und Schlacke auf. Nach einer Studie von LINDGREN (1996) ist wahrscheinlich vor allem die Gesteinskomponente für Metallgehalte im Asphalt verantwortlich zu machen. Eine weitere Ursache für die Konzentrationsunterschiede bei Mo-

lybdän kann in wesentlichen Abweichungen der Gehalte bei den für die Freisetzung relevanten Stoffgruppen liegen. Da Asphalt und Schlacke jedoch in beiden Materialien keine wesentlichen Unterschiede bei den Massenanteilen aufweisen, ist diese Begründung weniger überzeugend. Der deutliche Konzentrationsrückgang in Becken RCL 2 ist verbunden mit dem pH-Wert Anstieg auf über 11. Tabelle 10 zeigt, dass durch Bildung von sekundärem Ettringit und dessen Auflösung nach pH-Wert Rückgang Molybdän zunächst gebunden und dann wieder freigesetzt worden sein kann.

Die Säulenversuche weisen bei Molybdän auf eine porenraumretardierte Freisetzung als langfristig vorherrschender Prozess bei konstanten Temperatur- und Beregnungsverhältnissen hin (Abbildung 50). Eine signifikante Beeinflussung der Freisetzung durch erhöhte pH-Werte bei Säule 3 und 4, wie es bei Aluminium zu verzeichnen ist, zeigt sich bei den Säulenversuchen für Molybdän nicht.

Die Ergebnisse aus den Feldversuchen deuten eine Abhängigkeit der **Selen**freisetzung vom pH-Wert an. Selen konnte im Sickerwasser aus Becken RCL 1 überhaupt nicht nachgewiesen werden, tritt jedoch bei RCL 2 lückenhaft nach dem pH-Wert Anstieg auf. Dies weist auf ein Vorkommen von Selenat ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) hin, das sich unter den stärker alkalischen Bedingungen gebildet haben kann. Da Selenat löslicher ist als Selenit, kann dies den Konzentrationsanstieg in Becken RCL 2 erklären. Die Lücken im Konzentrationsverlauf sind damit begründbar, dass in Becken RCL 2 nach dem pH-Wert Anstieg auf Werte über 11 eine Bildung von Ettringit möglich war. Diese neu gebildete Phase kann Selenat binden und somit zu einem Konzentrationsrückgang geführt haben (Tabelle 10, PERKINS & PALMER 2000).

Mit dem erneuten Auftreten von Selen in den letzten Monaten Versuchslaufzeit erfolgt ein Rückgang auf pH-Werte kleiner 11 in Becken RCL 2, was wiederum eine Auflösung von neu gebildetem Ettringit mit einhergehender Selenfreisetzung bewirken konnte. Obwohl Selen nach PEZZAROSSA & PETRUZZELLI (2001) an Huminstoffen sowie Calcit sorbiert werden kann, weisen Ergebnisse aus den aufgeschlossenen Filterrückständen weder auf Sorption an Calcit noch an huminstoffähnlichen Substanzen hin.

Bei **Antimon** steigen und fallen vor allem in Becken RCL 2 Sickerwasserkonzentrationen parallel zum Temperaturverlauf (Abbildung 49), was einen Temperatureinfluss auf die Stofffreisetzung andeutet. Bei einer Untersuchung von DE GROOT et al. (1989) verhielt sich Antimon als anionische Spezies ähnlich wie beispielsweise Molybdän oder Selen, wodurch eine Begründung für den Konzentrationsverlauf wie bei diesen Stoffen nahe liegt. Jedoch konnte nach Tabelle 10 Antimon nicht als potentielles Ion für eine Substitution in Ettringit identifiziert werden, wodurch dies nicht als Ursache für den Konzentrationsrückgang in Becken RCL 2 herangezogen werden kann.

Bei den Säulenversuchen treten für Antimon nahezu konstante Freisetzungsraten bei allen Säulen auf (Abbildung 50), was wie bei Calcium (für Säule 3 und 4) und Silicium auf eine kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche als dominanter Prozess bei der Freisetzung hinweist. Zudem zeigen die Ergebnisse eine durchgängig größere Freisetzungsraten bei höherem pH-Wert und kürzerer Verweildauer des Eluenten in Säule 3 und 4. Die konstanten Freisetzungsraten können auf Grund der konstanten Temperaturverhältnisse ebenfalls ein Indiz für eine temperaturbeeinflusste Antimonfreisetzung sein, die bei den Feldversuchen auf Grund der auftretenden Temperaturänderungen Schwankungen unterworfen war.

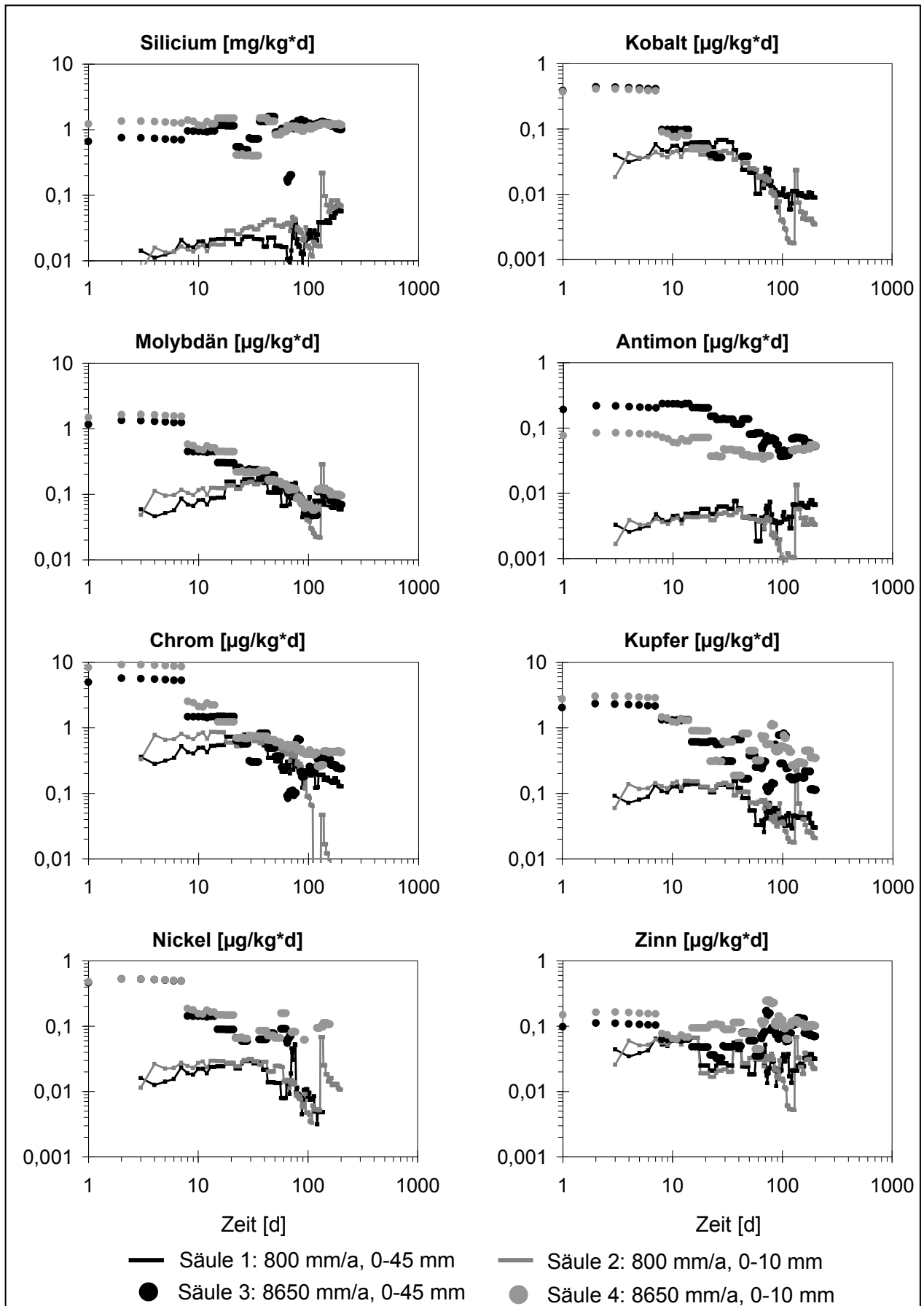


Abbildung 50: Ermittelte Freisetzungsraten ( $[\text{mg/kg}\cdot\text{d}]$  bzw.  $[\text{µg/kg}\cdot\text{d}]$ ) aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Spurenelemente

Als mögliche Quellen für die Freisetzung von Antimon treten bei der Untersuchung der fein gemahlene Einzelkomponenten sowohl Asphalt als auch Natursteine auf.

**Chrom** kann unter anderem vorliegen als Cr (III) oder Cr (VI, Chromat,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ), wobei Chromat als wasserlöslich und Cr (III) als relativ unlöslich gilt. Als eine Quelle für Chrom kommen die Rohstoffe zur Herstellung von Zement in Frage, die in sehr geringen Mengen Chrom enthalten, das zu Chromat im Zementklinker umgewandelt wird (BDZ 2001, HEIMANN et al. 1992, SPARKS 1998, TRABER et al. 2000). Bei der Untersuchung der fein gemahlene Einzelkomponenten ergibt sich bei Zementputz der höchste Gehalt an Chrom im Eluat. Da Zementputz bzw. Putzmörtel einen Zementanteil besitzen können (BDZ 2000), ist neben den Betonarten ebenfalls eine wesentliche Freisetzung aus dieser Komponente anzunehmen.

Die im Vergleich zu Becken RCL 2 größtenteils geringeren Chromkonzentrationen im Sickerwasser von RCL 1 sind auf Grund unterschiedlicher Anteile der Betonarten in beiden Materialien mit dementsprechend abweichenden Chromatgehalten im Zementklinker erklärbar. Bei einer Untersuchung von VAN DER SLOOT (2000) stellt sich der unterschiedliche Anteil an  $\text{CrO}_4^{2-}$  bzw. Cr (III) als mögliche Ursache für eine unterschiedliche Chromfreisetzung aus mehreren Zementen dar. Der Grund für die unterschiedlichen Anteile kann im Brennprozess bei der Zementherstellung und der in Abhängigkeit hiervon erfolgenden Oxidation von Cr (III) in das leicht löslichere Chromat liegen.

Der Rückgang der Chromkonzentrationen in Becken RCL 2 ist verbunden mit einem pH-Wert Anstieg auf über 11 und somit Bedingungen, bei denen die Freisetzbarkeit von  $\text{CrO}_4^{2-}$  vergleichsweise gering ist (VAN DER SLOOT 2002). In diesem pH-Bereich ist eine sekundäre Ettringitbildung möglich, wodurch Chrom in dieser neu gebildeten Phase gebunden und nach Auflösung derselben bei pH-Wert Rückgang wieder freigesetzt worden sein kann (Tabelle 10, PERKINS & PALMER 2000).

Eine weitere Erklärung für den Konzentrationsrückgang in Becken RCL 2 liegt in der Bildung einer anderen Sekundärphase. In Becken RCL 2 zeigen sich beim aufgeschlossenen Filterrückstand erhöhte Gehalte an Eisen und Chrom. Dies ist mit einer Sorption von Chrom an Eisenhydroxiden nach dem pH-Wert Anstieg erklärbar. Nach HIRSCHMANN & FÖRSTNER (2000b) können Sekundärphasen wie Eisenhydroxide Chrom effektiv einbinden. Bei neutralen bis alkalischen pH-Werten kann die Sorption von Chrom bei hohen Sulfatgehalten vermindert werden (FRUCHTER et al. 1990). Im Filterrückstand von Becken RCL 1 wurde ein erhöhter Gehalt an Eisen, jedoch nicht an Chrom festgestellt. Dies könnte darauf hinweisen, dass auch in diesem Material die Bildung von Eisenhydroxiden stattfand, deutlich höhere Sulfatkonzentrationen in Becken RCL 1 jedoch eine verstärkte Sorption von Chrom unterbunden haben. Als Ursache für den Rückgang der Chromkonzentration in Becken RCL 2 während der letzten Monate Versuchslaufzeit kommt somit die Bindung an Ettringit sowie an Eisenhydroxiden in Frage.

Die Säulenversuche zeigen für die Freisetzungsraten bei Chrom ein ähnliches Bild wie bei Molybdän (Abbildung 50), wodurch sich porenraumretardierte Freisetzung (Steigung = - 0,5) als wesentlicher Prozess abzeichnet. Dies steht in Einklang mit Untersuchungen von COTE et al. (1987), bei denen die Freisetzung von Chrom aus zementbürtigen Materialien zurückgeführt wurde auf Diffusion der gelösten Anteile durch das Porensystem.

Beton und Zementputz zeigen bei der Untersuchung der fein gemahlene Einzelkomponenten die höchsten **Kupfer**gehalte im Eluat. Daher sind, ähnlich wie bei Chrom, die im Vergleich zu Becken RCL 2 überwiegend geringeren Kupferkonzentrationen im Sickerwasser von RCL 1 auf Grund unterschiedlicher Anteile der Betonarten in beiden Materialien erklärbar.

Eine weitere mögliche Begründung für ansteigende Kupferkonzentrationen in Becken RCL 2 mit fortschreitender Zeit liegt in einer schnelleren Lösungskinetik bei alkalischeren Verhältnissen im Vergleich zu den neutralen pH-Werten in Becken RCL 1. Ergebnisse aus den Säulenversuchen zeigen insbesondere anfänglich größere Freisetzungsraten bei erhöhter Beregnung (Säule 3 und 4), was wie bei Kobalt unabhängig von der Korngröße stattfindet (Abbildung 50). Anschließend gehen Freisetzungsraten in Säule 3 und 4 zwar zurück, bleiben jedoch größer als die bei den Säulen mit natürlicher Beregnungsrate (Säule 1 und 2) aufgetretenen Freisetzungsraten. Dies kann bei geringerer Verweildauer des Eluenten auf eine größere Löslichkeit bei höheren pH-Werten in Säule 3 und 4 hinweisen und auch bei den Feldversuchen einen pH-Wert Einfluss bei der Kupferfreisetzung andeuten.

Nach ISENBECK-SCHRÖTER (1995) kann Kupfer in Abhängigkeit vom pH-Wert Hydroxokomplexe bilden oder über Oberflächenkomplexierung an Oxiden oder Tonmineralen sorbiert vorliegen. Ergebnisse aus den aufgeschlossenen Filterrückständen deuten darauf hin, dass insbesondere in Becken RCL 2 Kupfer an Partikeln  $> 0,45 \mu\text{m}$  sorbiert wurde, was eine Verminderung der Gehalte an gelöstem Kupfer im Sickerwasser zur Folge hatte.

Außer zu Beginn der Feldversuche konnte **Zink** im Sickerwasser beider Becken nicht nachgewiesen werden. Insbesondere in Becken RCL 2 zeigt sich beim aufgeschlossenen Filterrückstand ein erhöhter Gehalt an Zink, was auf eine erhöhte Partikelfracht mit Zink hinweist. Nach DIERKES (1999) kann Zink durch die Zugabe von Eisenoxiden gebunden werden. Zink weist in der Form  $\text{Zn}(\text{OH})^+$  eine hohe Affinität gegenüber Mangan- und Eisenoxiden auf, wobei Gehalte an  $\text{Zn}(\text{OH})^+$  mit steigendem pH-Wert zunehmen können. Zink kann vermutlich ebenfalls als Hydroxid ausfallen (POON et al. 1985, SAVRIC 2001). Bei den Säulenversuchen war Zink nur kurzzeitig im Eluat von Säule 3 nachweisbar.

**Zinn** ist bei den Feldversuchen nur lückenhaft und hauptsächlich in den letzten Monaten der Versuchslaufzeit nachweisbar. Bei den Säulenversuchen tritt dagegen Zinn in allen Säulen mit durchgängig konstanten Freisetzungsraten (Steigung = 0) auf (Abbildung 50). Demnach ist die kontinuierliche Stofflösung von der Materialoberfläche der dominante Prozess bei den konstanten Temperaturverhältnissen und Beregnungsraten. Säule 3 und 4 (erhöhte Beregnungsrate) weisen etwas höhere Freisetzungsraten im Vergleich zu den Säulen mit natürlicher Beregnungsrate (Säule 1 und 2) auf.

Für **Nickel** ist bei den Feldversuchen keine Abhängigkeit der Stofffreisetzung von Temperatur oder pH-Wert erkennbar. Die Säulenversuche weisen bei den Freisetzungsraten ein ähnliches Bild zu Kupfer auf und zeigen somit größere Freisetzungsraten bei kürzerer Verweildauer des Eluenten (Säule 3 und 4, Abbildung 50).

**Blei** tritt bei Feld- und Säulenversuchen nur lückenhaft auf. Für Blei und insbesondere Nickel zeigt sich, dass in Becken RCL 2 Sorption an huminstoffähnlichen Substanzen stattfand.  $\text{Pb}^{2+}$  besitzt eine hohe und  $\text{Ni}^{2+}$  zumindest eine geringe Bindungsneigung an

Huminstoffe (Gisi et al. 1997). Aufschlüsse der Filtrerrückstände deuten jedoch an, dass in beiden Becken die Sorption an Partikeln  $> 0,45 \mu\text{m}$  der bedeutsamere Prozess bei Blei und Nickel war.

## 5.4 Übertragbarkeit von Labor- auf Feldversuche

### 5.4.1 Extraktionsverfahren und statische Verfahren

Die Ergebnisse aus den **Königswasser-Aufschlüssen** liefern keine Rückschlüsse auf die Ergebnisse aus den Feldversuchen. Nach OBERMANN & CREMER (1992) entsprechen die aggressiven chemischen Bedingungen beim Königswasser-Aufschluss in keiner Weise dem Milieu, dem das Material im Kontakt mit Regen- oder Sickerwässern ausgesetzt ist. Daher geben aus diesem Verfahren ermittelte Ergebnisse keinen Hinweis auf kurz- oder langfristige Eluierbarkeit von Feststoffen in Kontakt mit wässrigen Lösungen.

Bei Vergleich der Konzentrationen aus dem **Ammoniumnitrat-Extrakt** und maximalen Konzentrationen, die bei den Feldversuchen aufgetreten sind, zeigt sich ein sehr uneinheitliches Bild (Abbildung 51). Stoffe sind zum einen beim Ammoniumnitrat-Extrakt nicht nachweisbar (Al, Pb, Fe, Sn), treten jedoch beim Feldversuch auf bzw. erreichen im Feld deutlich höhere Konzentrationen wie Zink bei RCL 1 sowie Arsen, Mangan und Molybdän bei RCL 2. Chrom, Kupfer und Nickel zählen dagegen zu den Elementen, die bei der Ammoniumnitrat-Extraktion in deutlich höheren Konzentrationen auftreten als bei den Feldversuchen.

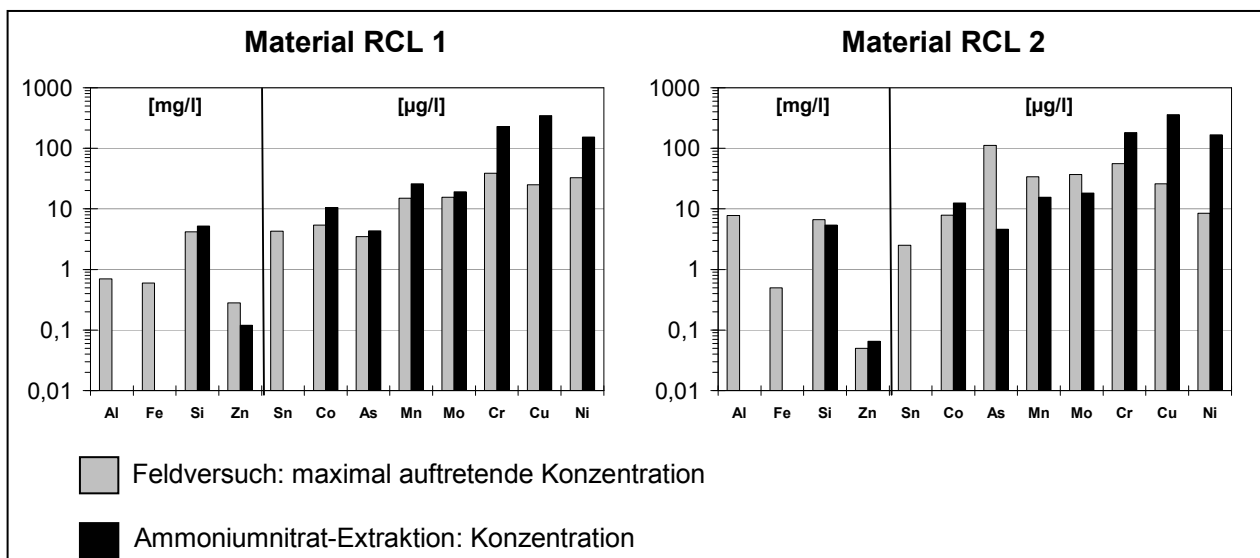


Abbildung 51: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen bei den Feldversuchen und Konzentrationen aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt für die Materialien RCL 1 und 2

Die verschiedenen Bindungsformen und -stärken der Stoffe in den Recycling-Materialien (Abschnitt 5.1.3) und im Feld auftretende Prozesse, die auf die Stofffreisetzung aus diesen Bindungsformen entscheidenden Einfluss haben, sind als Ursache für die Abweichungen anzusehen. In diesem Zusammenhang sind der Einfluss von CO<sub>2</sub> sowie pH-Wert- und Temperaturschwankungen zu nennen. Die Komplexität dieser Prozesse kann demnach mit der Ammoniumnitratlösung nicht nachgebildet werden.

Nach Umrechnung der Konzentrationen in Massenanteile zeigen sich deutlich höhere Gehalte beim Ammoniumnitrat-Extrakt im Vergleich zu aufsummierten Massenanteilen aus den Feldversuchen nach 21 Monaten Laufzeit (Abbildung 52).

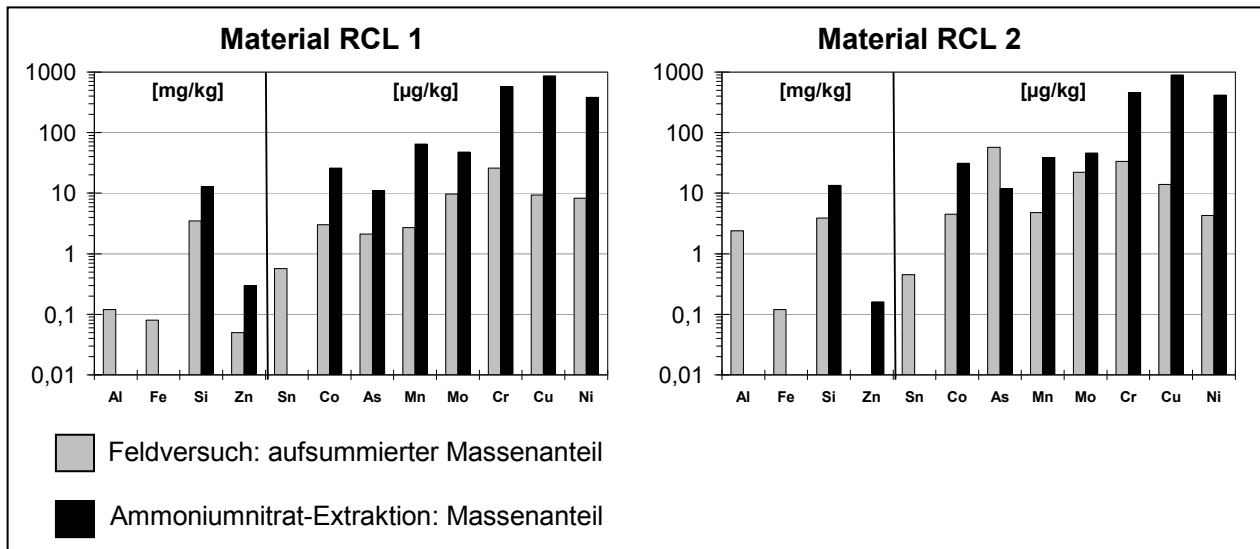


Abbildung 52: Vergleich aufsummierter Massenanteile aus den Feldversuchen und Massenanteilen aus der Ammoniumnitrat-Extraktion mit den Materialien RCL 1 und 2

Dies gilt für alle Elemente, die bei RCL 1 und 2 sowohl bei der Ammoniumnitrat-Extraktion als auch bei den Feldversuchen nachgewiesen werden konnten mit Ausnahme von Arsen. Die teilweise hohen Konzentrationen im Sickerwasser von Becken RCL 2 haben zur Folge, dass aufsummierte Massenanteile für Arsen aus diesem Becken deutlich höher sind als der sich aus der Extraktion ergebende Massenanteil.

Demnach lassen ermittelte Gehalte aus der Ammoniumnitrat-Extraktion keine umfassenden Rückschlüsse auf die Ergebnisse aus den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und 2 zu. Weder Konzentrationen noch umgerechnete Massenanteile aus der Ammoniumnitrat-Extraktion ermöglichen genauere Prognosen zum Stoffaustrag aus den Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen. Kritische Anmerkungen zum Ammoniumnitrat-Extrakt sind bei FÖRSTNER & THÖMING (1997), FÖRSTNER (1998) sowie HALL et al. (1998) zu finden.

Ein Vergleich ermittelter Stoffkonzentrationen aus dem **pH-stat Versuch bei pH 4** mit den Feldversuchen ist für RCL 1 und 2 nicht zulässig. Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen sind keine Lösungskonzentrationen, die real im Sickerwasser zu erwarten sind. Vielmehr wird der absolut mobilisierte Anteil einer Komponente in Relation zu der eingesetzten Feststoffeinwaage beschrieben (OBERMANN & CREMER 1992).

Für den Großteil der untersuchten Elemente nehmen umgerechnete Massenanteile aus dem pH-stat Versuch bei pH 4 deutlich höhere Werte ein als aufsummierte Massenanteile aus den Feldversuchen. Ausnahmen bilden u.a. Molybdän und Antimon, die nicht in jedem Eluat der Materialien RCL 1 und 2 zum pH-stat Versuch bei pH 4 nachgewiesen werden konnten. Dies ist mit höheren Löslichkeiten im alkalischen Bereich begründbar, wie es sich aus den pH-stat Versuchen bei pH 8 sowie aus den Feldversuchen andeutet.

**S4- und Modifizierter S4-Test** spiegeln gesättigte Bedingungen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 wider. Dadurch ist ein unmittelbarer Vergleich von ermittelten Konzentrationen aus diesen Schüttelversuchen mit den Feldversuchen nicht zulässig. Nach Berechnung der freigesetzten Massenanteile für beide Verfahren zeigt

sich beim Vergleich mit den aufsummierten Massenanteilen aus den Feldversuchen kein einheitliches Bild. Für die überwiegende Anzahl der untersuchten Elemente sind ermittelte Massenanteile aus dem S4- und Modifizierten S4-Test deutlich höher als bei den Feldversuchen. Jedoch sind Massenanteile aus beiden Schüttelversuchen beispielsweise für Selen, Zink sowie Arsen bei Material RCL 2 deutlich niedriger. Basierend auf dem S4- und Modifizierten S4-Test würde demnach eine Abschätzung der langfristigen Stofffreisetzung bei zu den Feldversuchen vergleichbaren Bedingungen zu einer Unterschätzung des Stoffaustrages bei diesen Elementen führen. Beim S4- und Modifizierten S4-Test werden wichtige Einflussgrößen wie Auswirkung auf die Stofffreisetzung durch pH-Wert Schwankungen oder Bildung von Sekundärphasen mit Sorptions- und Desorptionsprozessen nicht erfasst.

Nach WIENBERG (1998) steht beim S4-Verfahren nicht die Wirklichkeitsnähe, sondern die Vergleichbarkeit operationell definierter Elutionsdaten im Vordergrund. Danach ist der Vergleich unterschiedlicher Materialien untereinander sowie mit vorgegebenen Grenz- und Richtwerten wesentlicher Inhalt. Kritik am S4-Verfahren findet sich bei FÖRSTNER (1998), FÖRSTNER & THÖMING (1997), FRIEGE et al. (1990), HILLIER et al. (1999), HIRNER et al. (1998), HOLNSTEINER (1997).

Der Vergleich maximaler Konzentrationen aus der **Kombination Langzeit-Standtest und Schüttelversuche** mit Höchstwerten aus den Feldversuchen zeigt, dass lediglich Natrium, Antimon und Kupfer in derselben Größenordnung bei RCL 1 und 2 auftreten (Abbildung 53). Für beide Testfeld-Materialien ist die Konzentration bei der Mehrzahl der untersuchten Elemente in den Laborversuchen entweder deutlich höher (z.B.  $\text{SO}_4$ , Ca, Cr, Co) oder erheblich niedriger (z.B.  $\text{NO}_3$ , Fe, Mn) im Vergleich zu maximalen Konzentrationen bei den Feldversuchen.

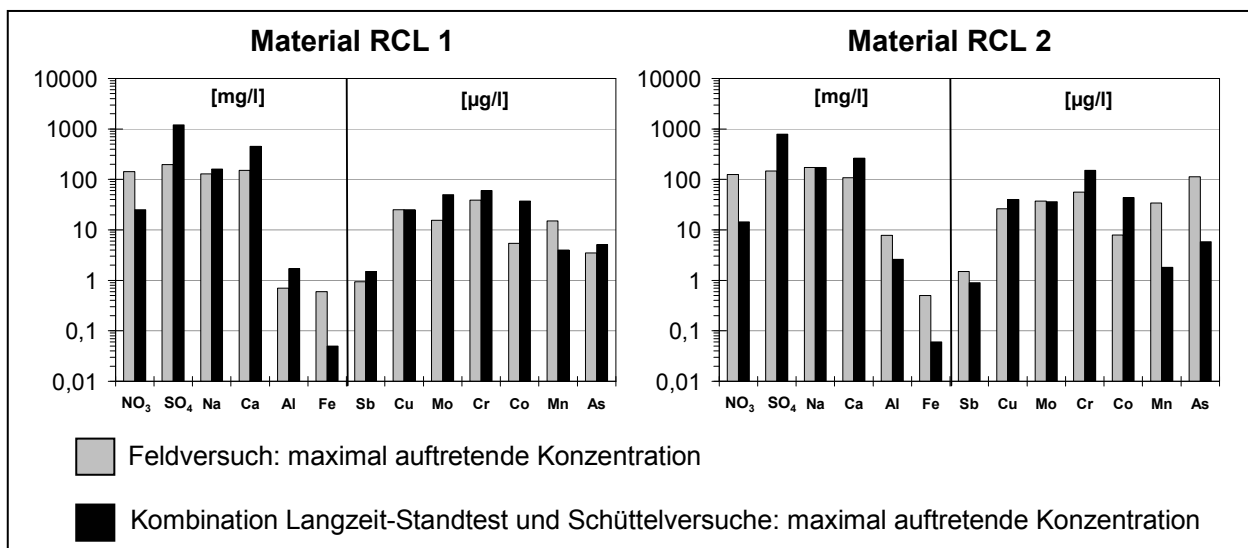


Abbildung 53: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen zwischen den Feldversuchen und der Kombination Langzeit-Standtest und Schüttelversuche bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen für die Materialien RCL 1 und 2

Für Material RCL 1 ist beim Langzeit-Standtest der pH-Wert von 9,8 deutlich höher als bei den Feldversuchen aufgetretene Werte. Bei RCL 2 nimmt der pH beim Langzeit-Standtest mit 10,9 einen höheren Wert im Vergleich zu RCL 1 ein, liegt jedoch im pH-Bereich, der sich gegen Ende der Feldversuche in Material RCL 2 einstellt. Neben dem pH-Wert treten im Sickerwasser von Material RCL 2 im Verlauf der Feldversuche auch

Temperaturen über kurze Zeiträume auf, die den beim Langzeit-Standtest vorherrschenden Bedingungen (9,5 °C) ähnlich sind, was einen Vergleich ermöglicht. Bei Aluminium liegt zwar eine vom pH-Wert abhängige Freisetzung bei den Feldversuchen vor, jedoch ist die beim Langzeit-Standtest ermittelte Konzentration erheblich geringer als bei vergleichbaren Bedingungen während der Feldversuche. Für Silicium, bei dem sowohl pH als vermutlich auch Temperatur die Freisetzung beeinflussen, sind dagegen Konzentrationen beim Langzeit-Standtest wesentlich höher im Vergleich zu ähnlichen Bedingungen bei den Feldversuchen.

Dies zeigt, dass zwar bei einigen Elementen Höchstkonzentrationen im Feld in derselben Größenordnung beim Langzeit-Standtest im Labor auftreten, jedoch beispielsweise für die Freisetzung von Aluminium und Silicium und hierdurch hervorgerufene Konzentrationen im Freiland komplexere Prozesse verantwortlich sind. Die Prozesse können demzufolge nicht ohne weiteres mit diesem Laborversuch nachvollzogen werden. Beim Langzeit-Standtest werden gesättigte Verhältnisse simuliert, wogegen bei den Feldversuchen durch die Sickerwasserbewegung und Luftzutritt ungesättigte Verhältnisse vorherrschen. Abweichungen bei den Randbedingungen haben vermutlich eine unterschiedlich ausgeprägte Bildung von Sekundärphasen sowie eine unterschiedliche Sorption bzw. Desorption von Stoffen zur Folge.

Maximalwerte für Massenanteile, die bei den Schüttelversuchen auftreten, sind beim Großteil der Elemente deutlich größer als aufsummierte Massenanteile aus den Feldversuchen (Abbildung 54).

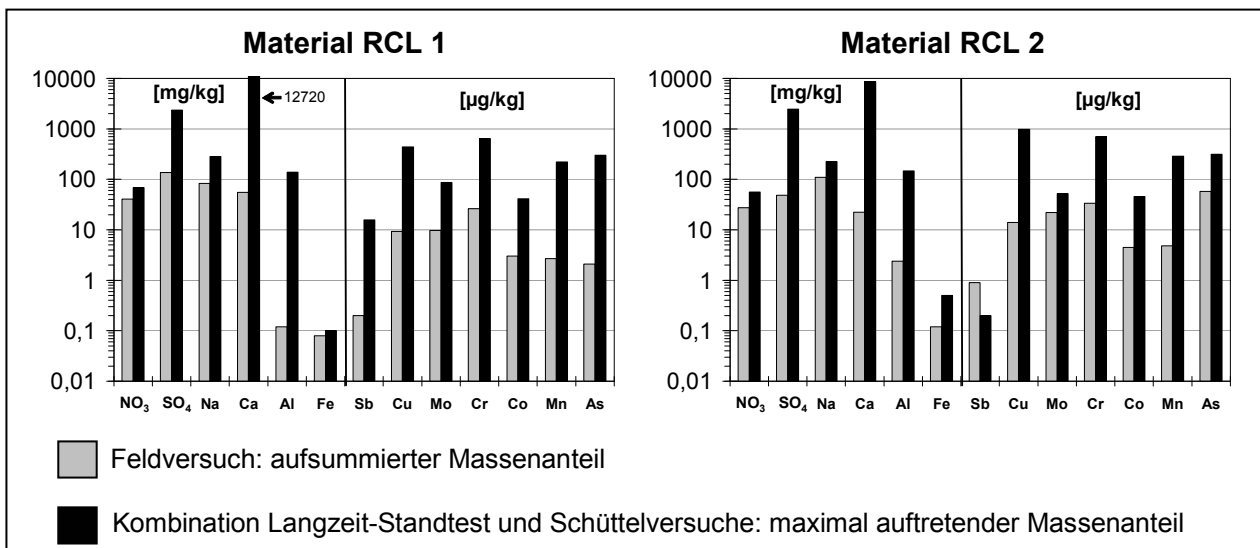


Abbildung 54: Vergleich aufsummierter Massenanteile aus den Feldversuchen und maximal auftretender Massenanteile aus der Kombination Langzeit-Standtest und Schüttelversuche bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen für die Materialien RCL 1 und 2

Eine Abschätzung des Stoffaustrages bei den Feldversuchen, bezogen auf den aufsummierten Massenanteil nach 21 Monaten Laufzeit, kann demzufolge anhand der Schüttelversuche nicht erfolgen. Langfristig ermöglichen die Schüttelversuche jedoch eine Abschätzung des Stoffdepots, das aus dem Material ausgelaugt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die aus den Schüttelversuchen ermittelten Ergebnisse die maximale Verfügbarkeit der Elemente unter den vorherrschenden Versuchsbedingungen widerspiegeln. Insbesondere der pH-Wert ist hier zu nennen, der bei den Schüttelversuchen im stark alkalischen Bereich (pH-Werte > 10) lag.

### 5.4.2 Säulenversuche

Die Ausführungen in Abschnitt 5.3.3 und 5.3.4 zeigen, dass bei Feld- und Säulenversuchen vorherrschende Prozesse hinsichtlich der Stofffreisetzung größtenteils übereinstimmen, was beispielsweise für die Freisetzung aus den verschiedenen körnigen Fraktionen des Korngemisches bzw. die oberflächliche Stoffabwaschung bei Sulfat zutrifft. Allerdings tritt bei den Feldversuchen für Sulfat ebenfalls eine temperaturabhängige Stofffreisetzung auf, die durch konstante Randbedingungen bei den Laborversuchen nicht erfasst wird. Des Weiteren zeigt sich für Aluminium und Silicium eine pH-Wert abhängige Freisetzung, die für den Vergleich ermittelter Konzentrationen aus Säulen- und Feldversuchen berücksichtigt werden muss. In diesem Zusammenhang ist auch die pH-abhängige Bildung von Sekundärphasen zu nennen, die insbesondere durch Sorption von Schwermetallen einen erheblichen Einfluss auf Konzentrationsverläufe haben kann.

Bei Betrachtung der Übertragbarkeit ermittelter **Konzentrationen** von Säulen- und Feldversuchen werden aus diesem Grund lediglich die in Säule 1 ermittelten Werte verwendet. Mit einer natürlichen Beregnungsrate und Verwendung von ungebrochenem Material entspricht diese Säule am ehesten den im Freiland aufgetretenen Bedingungen, was sich in vergleichbaren pH-Werten widerspiegelt. Da die Korngröße einen erheblichen Einfluss bei der Stofffreisetzung hat (Abschnitt 5.2.2), erscheint eine Verwendung von Säule 2 für den Konzentrationsvergleich mit dem Feldversuch nicht sinnvoll. Gegen die Einbeziehung von Säule 3 und 4 beim Konzentrationsvergleich sprechen die erhöhten Beregnungsraten mit einhergehenden unterschiedlichen Verweildauern des Eluenten, was sich dementsprechend auf die Konzentrationen auswirkt.

Für den Vergleich aufgetretener Konzentrationshöchstwerte zwischen Säule 1 und Becken RCL 1 werden Werte bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,63 verglichen, da die Säulenversuche mit natürlicher Beregnungsrate bis zu diesem Punkt durchgeführt wurden. Es zeigt sich, dass für Konzentrationsunterschiede von  $\pm 10$  mg/l bzw.  $\mu\text{g/l}$  als Beurteilungskriterium bei Magnesium, Antimon, Arsen, Kupfer und Mangan ähnlich hohe Maximalwerte in den Eluatens von Säule 1 und in Becken RCL 1 auftreten (Abbildung 55).

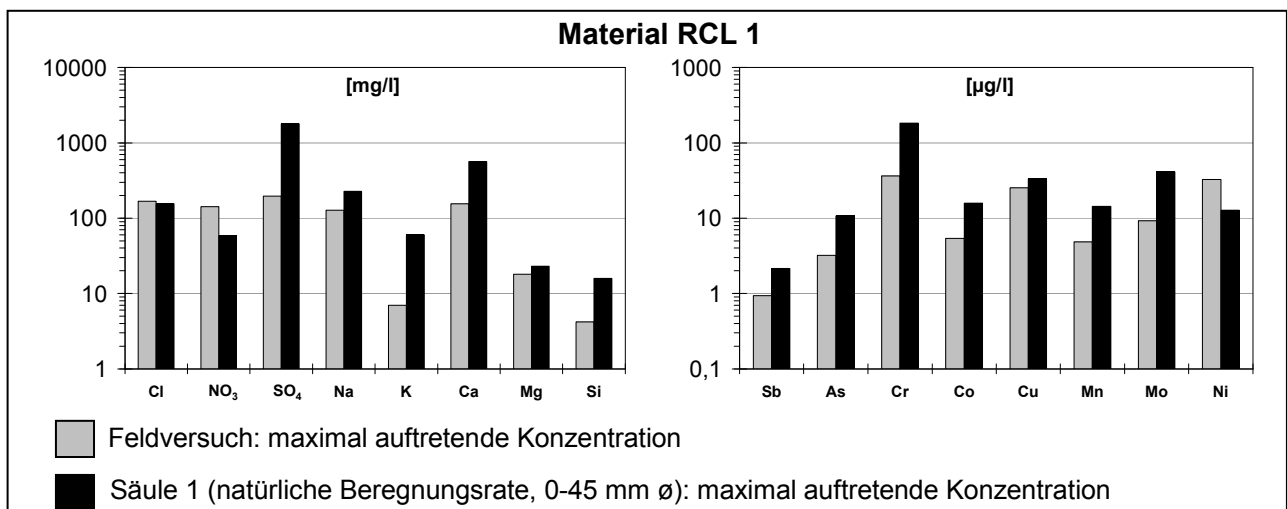


Abbildung 55: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen zwischen dem Feldversuch und dem Säulenversuch mit Material RCL 1 (Säule 1: natürliche Beregnungsrate, 0-45 mm ø) bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,63

Bei Arsen ist zu beachten, dass Konzentrationen in Säule 1 gegen Versuchsende ansteigen und sich somit möglicherweise bei einer längeren Versuchsdauer wesentlich größere Gehalte als im Sickerwasser von Becken RCL 1 eingestellt hätten. Deutlich höhere Konzentrationen beim Säulenversuch als im Feld treten für Sulfat, Kalium, Calcium, Chrom und Molybdän auf, das Umgekehrte gilt für Nitrat und Nickel.

Bei den anionischen Hauptelementen (ohne Berücksichtigung der Alkalität) zeigt mit Versuchsbeginn Sulfat einen wesentlich höheren relativen Anteil an den Gesamtgehalten bei Säule 1 im Vergleich zum Feldversuch (Abbildung 56). Der zu Anfang der Feldversuche deutlich höhere relative Anteil von Chlorid und Nitrat tritt bei der Säule mit natürlicher Beregnung und ungebrochenem Material nicht auf.

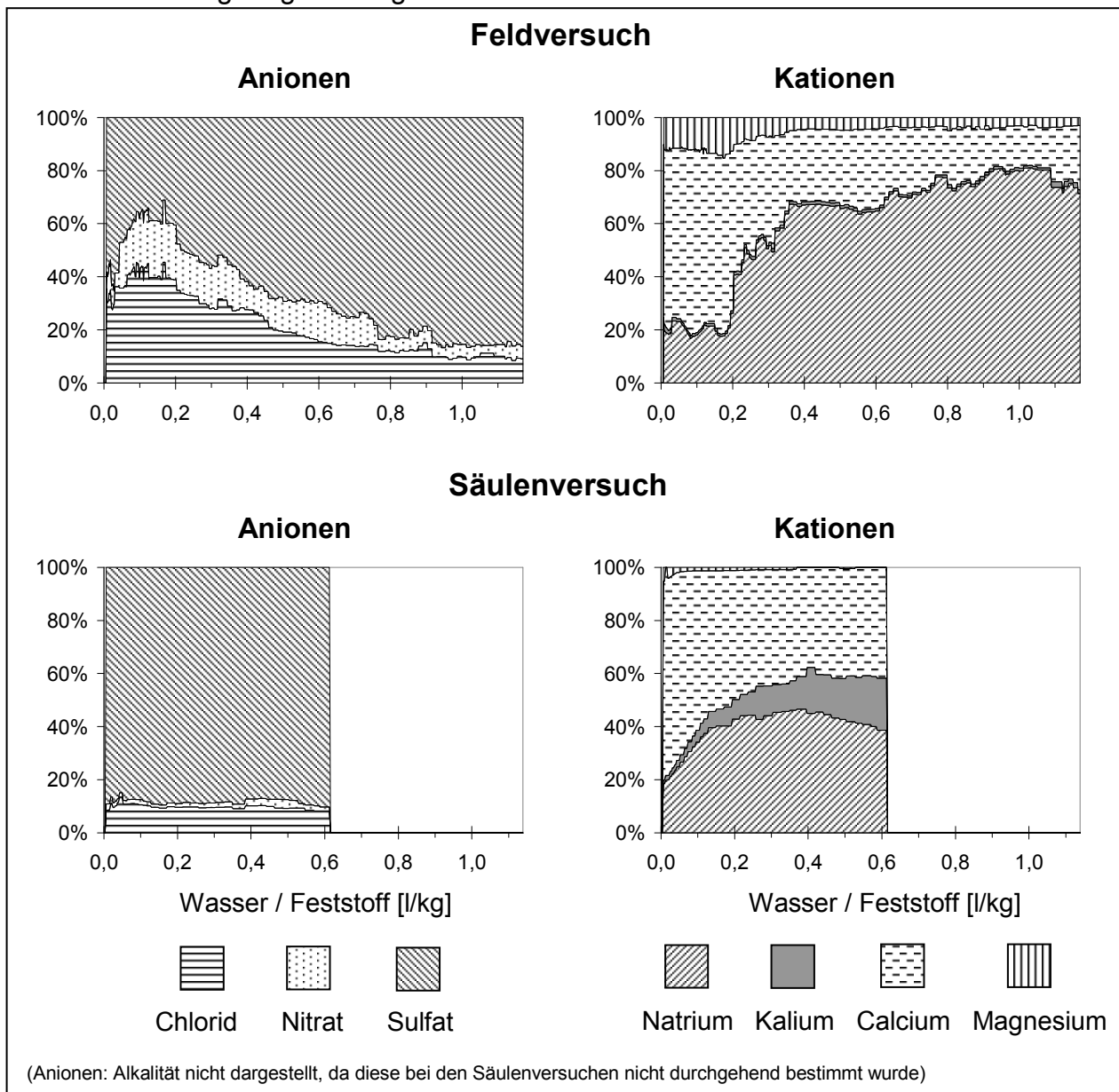


Abbildung 56: Anteil an Gesamtgehalten der jeweiligen Anionen und Kationen in [%] nach Umrechnung der Konzentrationen in [meq/l] aus dem Feld- und Säulenversuch (Säule 1: natürliche Beregnungsrate, Material ungebrochen) mit Material RCL 1

Für die Kationen nehmen relative Anteile von Magnesium und Calcium bei Feld- und Säulenversuch mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis ab. Natrium erreicht bis

zur Einstellung der Säulenversuche einen höheren relativen Anteil in Becken RCL 1 als in Säule 1. Für Kalium tritt ein nahezu konstant niedriger Anteil am Gesamtgehalt der kationischen Hauptelemente im Feldversuch auf, wogegen beim Säulenversuch ein Zuwachs mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis zu verzeichnen ist.

Trotz vergleichbarer Randbedingungen beim Feldversuch in Becken RCL 1 und bei Säule 1 hinsichtlich pH-Wert und eingesetztem Material weisen die Ergebnisse für die Hauptelemente auf die Komplexität des Stofffreisetzungsverhaltens in Freiland und Labor hin.

Eine längere **Kontaktzeit** zwischen Material und Eluent im Feld als in Säule 1, für die im Wesentlichen die mächtigere RCL-Schicht verantwortlich zu machen ist, lässt im Freiland eher die Annäherung an einen gleichgewichtsähnlichen Zustand erwarten als bei den Säulenversuchen. Ähnliche Maximalwerte in Säule 1 und im Feld für einige Stoffe deuten an, dass hierbei auftretende Höchstkonzentrationen nicht durch unterschiedliche Verweilzeiten signifikant beeinflusst werden. Allerdings lassen es deutlichere Abweichungen bei anderen Stoffen ratsam erscheinen, auf Grund der unterschiedlichen Verweilzeiten in Säule 1 und beim Feldversuch mit Material RCL 1 bei Säulenversuchen gleiche Materialmächtigkeiten wie im Freiland einzusetzen. Die Verwendung einer gleichmächtigen Materialschicht hat den Vorteil, dass diese Einflussgröße als mögliche Ursache für auftretende Konzentrationsunterschiede ausgeschlossen werden kann.

Zur Beurteilung der Übertragbarkeit hinsichtlich **aufsummierter Massenanteile** werden Ergebnisse aus Säule 1 (natürliche Beregnungsrate) und 3 (erhöhte Beregnungsrate) mit Material in derselben Korngröße wie beim Feldversuch herangezogen. Dabei können die Ergebnisse bei zu den Freilandbedingungen angepassten Beregnungsraten (Säule 1) mit dem Feldversuch verglichen und die unter erhöhten Beregnungsraten ermittelten Werte (Säule 3) für eine Langzeitabschätzung eingesetzt werden. Es müssen jedoch wie beim Konzentrationsvergleich von Säulen- und Feldversuchen element-spezifisch dominante Parameter bei der Freisetzung berücksichtigt werden.

Bei Stoffen wie Aluminium und Silicium zeigt sich eine erhebliche Einwirkung des pH-Wertes auf die Freisetzung, wobei der pH-Wert in den Säulen beeinflusst wird von Beregnungsrate bzw. Verweildauer und Korngröße. Daher ist bei diesen Stoffen aus einer Erhöhung der Beregnungsrate nicht unmittelbar ein Zeitraffereffekt auf die Stofffreisetzung ableitbar, womit die aus Säule 3 ermittelten Ergebnisse nicht für eine Langzeitabschätzung auf Grund der abweichenden Randbedingungen verwendet werden können.

Die Freisetzung aus den verschiedenenkörnigen Fraktionen des Korngemisches tritt bei Sulfat langfristig als vorherrschender Prozess bei allen Säulen auf. Der Feldversuch zeigt daneben eine weitere Einflussgröße (Temperatur) bei der Sulfatfreisetzung was verdeutlicht, dass es sich bei der Übertragbarkeit hinsichtlich des aufsummierten Massenanteils nur um eine grobe Abschätzung handeln kann. Dies zeigt sich in Abbildung 57, wonach basierend auf den Säulenversuchen mit natürlicher (Säule 1) und erhöhter (Säule 3) Beregnungsrate zumindest bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 1 eine deutliche Überschätzung erfolgen würde. Bei Chlorid und Natrium deuten Ergebnisse eine bessere langfristige Prognostizierbarkeit anhand von Säulenversuchen an.

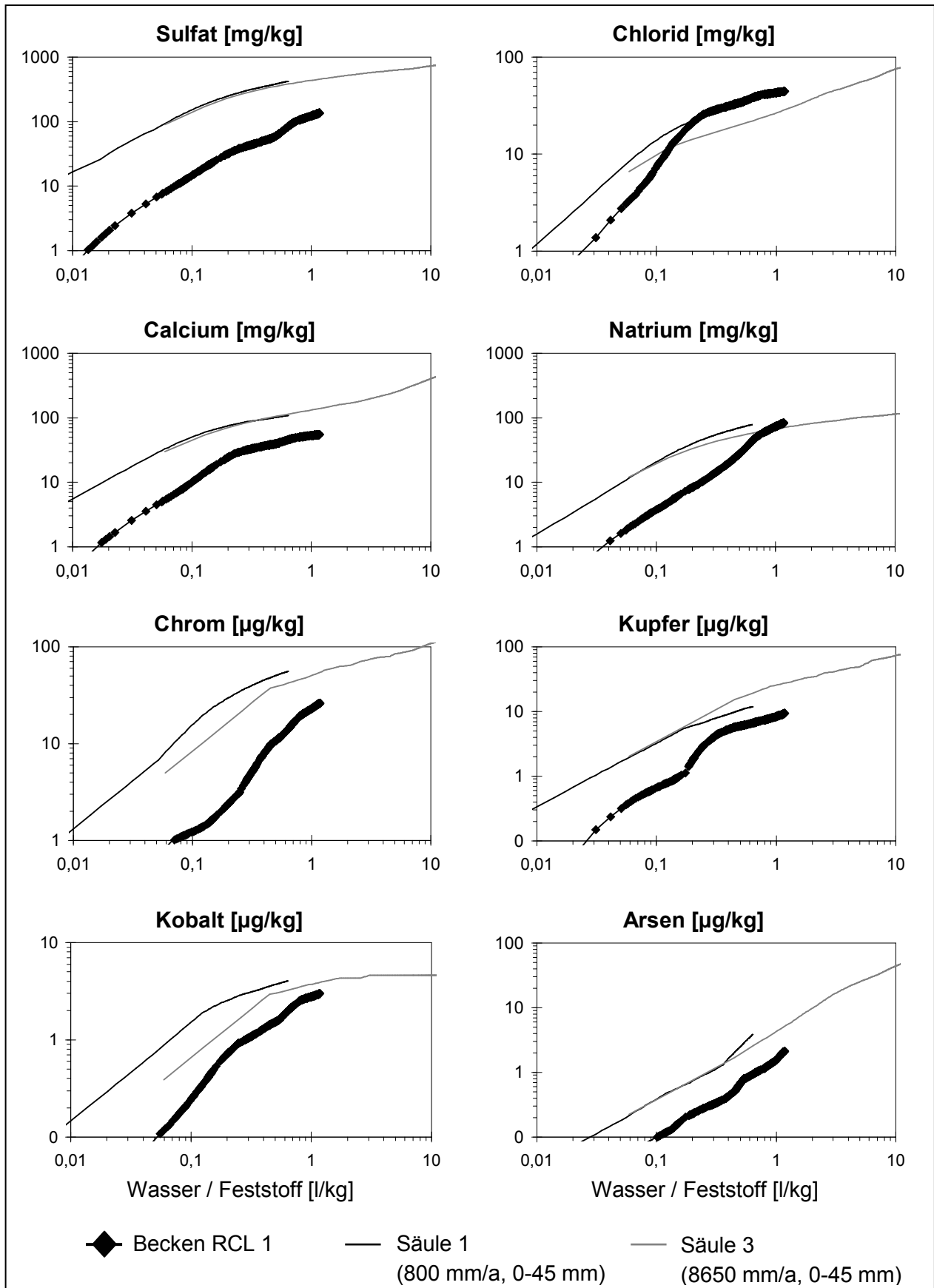


Abbildung 57: Aufsummierte Massenanteile für den Feldversuch (Becken RCL 1) sowie Säule 1 (natürliche Beregnungsrate, Originalkorngröße) und Säule 3 (erhöhte Beregnungsrate, Originalkorngröße) bezogen auf das Wasser/Feststoff-Verhältnis

Für Calcium spielt die Ausfällung von Sekundärphasen eine wichtige Rolle, was in Abhängigkeit vom Ausmaß zu Abweichungen beim Vergleich zwischen aufsummierten Massenanteilen aus Feld- und Säulenversuch führen kann.

Für Chrom deutet die diffusionskontrollierte Stofffreisetzung eine Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den Säulenversuchen für eine Langzeitprognose unter Freilandbedingungen an. Bei Kupfer, Kobalt und Arsen weist die Gegenüberstellung aufsummierter Massenanteile langfristig ebenfalls auf eine vergleichsweise gute Übertragbarkeit bzw. Prognostizierbarkeit hin, wobei für alle 4 Stoffe jeweils größere Werte aus Säule 1 und 3 gegenüber dem Feldversuch auftreten.

In Säule 1 treten mit dem Material in Originalkorngröße und einer Beregnungsrate, die sich an den Freilandversuchen orientiert, vergleichbare pH-Werte zum Feldversuch mit Material RCL 1 auf. Bei Säule 2 kommen für das klein gebrochene Material ähnliche pH-Werte wie in Säule 1 und beim Feldversuch vor. Allerdings ist dies auf die längere Kontaktzeit zwischen Festphase und Eluent zurückzuführen, was ein unterschiedliches Ausmaß an Carbonatisierungsreaktionen hervorruft. Insbesondere beim klein gebrochenen Material in Säule 2 tritt eine verstärkte Ausfällung von Calcit auf, was durch Sorptionsvorgänge Auswirkungen auf Schwermetallkonzentrationen haben kann. Für Stoffe, deren Löslichkeit vom pH-Wert beeinflusst wird oder die an potentiell auftretenden Sekundärphasen sorbiert werden können, erscheint es somit ratsam, das Material in der **Korngröße** zu untersuchen, in der es verwendet werden soll. Bei GLASSER (1997) wird bezweifelt, dass sich bei der Komplexität von Systemen durch Brechen von Material eine realistische Beschleunigung von Reaktionen erreichen lässt. Bedenken gegen das Kleinbrechen von Material finden sich auch bei HILLIER et al. (1999) sowie RECHENBERG et al. (1991).

In Tabelle 26 ist die prozentuale Zunahme aufsummierter Massenanteile aus dem Feldversuch mit Material RCL 1 vom Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 (Einstellung der Säulenversuche mit Säule 1) bis 1,17 (Einstellung der Feldversuche) dargestellt.

Für 10 der 17 betrachteten Stoffe tritt eine Zunahme  $\geq 50\%$  bei den aufsummierten Massenanteilen zwischen dem Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 bis 1,17 auf. Für eine langfristige Beurteilung des Stoffaustrages anhand von Säulenversuchen weist dies auf den Vorteil von Versuchen mit erhöhter **Beregnungsrate** hin, da bei natürlicher Beregnungsrate (Säule 1) bereits 7 Monate Laufzeit bis zum Erreichen eines Wasser/Feststoff-Verhältnisses von 0,63 erforderlich waren. Anhand von Säulenversuchen mit erhöhter Beregnungsrate lassen sich zumindest für einige Stoffe in vergleichsweise kurzer Versuchslaufzeit Aussagen zur langfristigen Grobabschätzung des Stoffaustrages ableiten.

Nach GERTH (2001) ist im Rahmen einer Materialuntersuchung im Labor die Nachbildung der unter in-situ Bedingungen vorherrschenden instationären Verhältnisse nicht durchführbar und nur im Feldlysimeter zu realisieren. Es zeigt sich jedoch, dass für einige Stoffe eine grobe Langzeitabschätzung der Stofffreisetzung (bezogen auf den aufsummierten Massenanteil) durch eine erhöhte Beregnungsrate bei Säulenversuchen möglich ist, wobei elementspezifisch Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Säulenversuche erlauben im Vergleich zu Tests mit statischer Versuchsanordnung in größerem Maß Rückschlüsse auf stattfindende Prozesse bei der Stofffreisetzung, was

für die Beurteilung von Prozessen im Freiland eine wichtige Hilfe darstellt.

Tabelle 26: Zunahme aufsummierter Massenanteile beim Feldversuch mit Material RCL 1 vom Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 bis 1,17

Stoff	Zunahme <b>aufsummierter Massenanteile</b> bei Becken RCL 1 zwischen Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 bis 1,17 [%]	Stoff	Zunahme <b>aufsummierter Massenanteile</b> bei Becken RCL 1 zwischen Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 bis 1,17 [%]
Chlorid	16	Chrom	86
Nitrat	20	Kobalt	52
Sulfat	64	Kupfer	41
Natrium	91	Mangan	329
Kalium	44	Molybdän	259
Calcium	22	Nickel	22
Magnesium	20	Silicium	91
Antimon	77	Zinn	1233
Arsen	126		

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 6.1 Bewertung der Recycling-Materialien

Im Rahmen dieser Arbeit tritt die **Heterogenität** in der stofflichen Zusammensetzung der Recycling-Materialien als zu berücksichtigende Einflussgröße auf, wie es sich bereits in früheren Studien herausstellt (ENGESER et al. 1998, JOHNSON et al. 1999). In diesem Zusammenhang deuten auftretende Unterschiede zwischen der optischen Untersuchung nach SCHÄFER (2002) und den Prüfberichten der Lieferanten an, dass eine einheitliche Prüfvorschrift anzustreben ist, worauf auch bei WÖRNER et al. (2001) hingewiesen wird. Dies ist in jedem Fall erforderlich, um Stoffgruppen in den Recycling-Materialien unabhängig vom Standort der Aufbereitungsanlagen im Bundesgebiet und Bearbeiter eindeutig identifizieren und vergleichen zu können.

Insbesondere bei Spurenelementen sind Rückschlüsse auf genauere Gehalte in den Materialien anhand bestimmter Anteile diverser Stoffgruppen auf Grund der Heterogenität nicht möglich. Bei Betonbruch wird beispielsweise der Gehalt an Spurenelementen durch die Zusammensetzung des Zementsteins und der Zuschlagstoffe beeinflusst, was eine genauere Charakterisierung der Stoffgruppe im Hinblick auf Spurenelementgehalte erschwert. Nach FRANKE (1993) muss bei Recycling-Baustoffen aus dem Hochbaubereich mit vielen möglichen Beimengungen gerechnet werden.

Zur Charakterisierung der Recycling-Materialien ist nach den vorliegenden Ergebnissen die Röntgen-Fluoreszenz-Analyse dem Aufschluss mit Königswasser vorzuziehen.

Betonbruch tritt bei der Mehrzahl der 19 untersuchten Materialien als dominante Stoffgruppe auf, wodurch die aus den pH-stat Versuchen ermittelten Werte zur **Säureneutralisationskapazität** (SNK) wesentlich beeinflusst werden. Eine aus dem pH-stat Versuch abgeleitete zeitliche Abschätzung des Puffervermögens unter Freilandbedingungen zeigt, dass die Materialien RCL 1 und 2 einen Säureeintrag per Niederschlagswasser über einen Zeitraum von mehreren zehntausend Jahren puffern können, bevor sich ein pH-Wert von 5 bzw. 4 einstellt. Von ähnlichen Zeiträumen ist auch bei den anderen untersuchten Materialien auszugehen, da die SNK von RCL 1 und 2 ungefähr im Durchschnitt aller Materialien liegt (Tabelle 23). Allerdings deuten die Untersuchungen ebenfalls an, dass aus dem Anteil des Betongehaltes in den Materialien nicht unmittelbar auf die genaue Höhe der SNK geschlossen werden kann. Wie die Untersuchungen zu den pH-stat Versuchen zeigen, kann durch Verwendung von fein gemahlenem Material ein Zeitraffereffekt bei dieser Versuchsart erzielt werden.

Für die pH-stat Versuche bei verschiedenen pH-Werten tritt nach Erschöpfung der Pufferkapazität eine erhöhte Stofffreisetzung bei niedrigen pH-Werten auf. Demnach ist die SNK der Recycling-Materialien als wesentliche Einflussgröße hinsichtlich der verstärkten Freisetzung von Metallen anzusehen. Die Feldversuche zeigen jedoch, dass eine durch andere Einflussgrößen gesteuerte signifikante Stofffreisetzung bereits vor Erschöpfung der Pufferkapazität erfolgen kann.

## 6.2 Bewertung der angewandten Laborverfahren

Hinsichtlich der **Versuchslaufzeiten** ist festzustellen, dass bei den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4 und 6 selbst mit Material in Feinfraktion keine Gleichgewichtseinstellung nach 24 Stunden Laufzeit auftritt (Abbildung 27). Eine Versuchsdurchführung bis zur Gleichgewichtseinstellung ist insofern bedeutsam, da ein Abbruch zu einem früheren Zeitpunkt zu einer Unterschätzung der Säureneutralisationskapazität führt. Ausreichend lange Versuchslaufzeiten sind abhängig vom eingestellten pH-Wert und dem dadurch betroffenen Pufferbereich, wie der Versuch bei pH 6 zeigt.

Beim S4- und Modifizierten S4-Test zeigen Langzeitversuche, dass elementspezifisch die vorgeschriebene Versuchslaufzeit von 24 Stunden nicht ausreicht, bis weitgehend konstante Gehalte bei den Recycling-Materialien auftreten. Allerdings hat bei längeren Laufzeiten der Schüttelvorgang eine verstärkte Oberflächenvergrößerung durch **Materialabrieb** zur Folge, was dementsprechend Stofffreisetzungs-, Sorptions- und Fällungsvorgänge und damit ermittelte Konzentrationen beeinflusst. Diese Einflussgrößen erschweren die Ergebnisinterpretation aus dem S4- und Modifizierten S4-Test, so dass diese Verfahren ungeeignet erscheinen für eine Abschätzung der Stofffreisetzung aus den Recycling-Materialien. Auf Grund der Materialheterogenität ist die für den S4-Test vorgesehene Probenmenge von 100 g bei der Untersuchung von Recycling-Materialien ebenfalls als kritisch anzusehen.

Bei einem **Vergleich ermittelter Konzentrationen und Massenanteile** ermöglichen weder Ammoniumnitrat-Extraktion, pH-stat Versuch bei pH 4 noch S4- und Modifizierter S4-Test genauere Prognosen zum Stoffaustrag aus den Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen.

Für die Einzelkomponenten aus Material RCL 1 ergibt der Vergleich auftretender Stoffgehalte aus Schüttelversuchen mit den aus der RFA ermittelten Totalgehalten deutliche Unterschiede bei den jeweils freigesetzten Anteilen. Dies weist auf unterschiedliche **Bindungsstärken** der Stoffe in den verschiedenen Einzelkomponenten hin. Eine vergleichende Ergebnisbetrachtung aus S4-Test, Ammoniumnitrat-Extraktion und pH-stat Versuch bei pH 4 zu den Bindungsstärken der Stoffe ergibt für Arsen ein ähnliches Muster bei den 19 Recycling-Materialien, das auf stärkere Bindungsformen hinweist. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse hinsichtlich der Arsenfreisetzung im Freiland bei Material RCL 2 zu. Konzentrationshöchstwerte bei Arsen in Becken RCL 2 sind etwa doppelt so hoch im Vergleich zu maximalen Chrom- und Kobaltkonzentrationen, obwohl diese beiden Stoffe nach der vergleichenden Versuchsbeurteilung überwiegend in schwächeren Bindungsformen vorliegen.

Demnach ist auf Grund der für die Bewertung von Bindungsstärken angewandten Laborverfahren keine präzise Abschätzung der Stofffreisetzung aus Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen möglich.

Mit dem **Langzeit-Standtest** (Material in Originalkorngröße) und **Schüttelversuchen mit unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen** (Material fein gemahlen) lassen sich die bei S4- und Modifiziertem S4-Test auftretenden Einflüsse durch Materialien in verschiedenen Korngrößen sowie Materialabrieb besser kontrollieren. Allerdings zeigen sich aus dieser Versuchskombination nur bei wenigen Elementen vergleichbare Maximalkonzentrationen bzw. Massenanteile zu den Feldversuchen.

Eine Möglichkeit, zu naturnaheren Ergebnissen hinsichtlich **Löslichkeit und Verfügbarkeit** von Stoffen zu kommen, besteht eventuell in der Verwendung von Material nur in der Korngröße, in der es für den späteren Verwendungszweck eingesetzt wird. Dabei würde auf das Kleinbrechen und Feinmahlen von Material bewusst verzichtet, um die bereits ausgeführten Prozesse, die in Abhängigkeit von der Korngröße auftreten, besser eingrenzen zu können. Demzufolge könnten analog zum Langzeit-Standtest mit Material in Originalkorngröße weitere Versuche mit derselben Korngröße, aber einem ansteigenden Wasser/Feststoff-Verhältnis durchgeführt werden. Bei größeren Wasser/Feststoff-Verhältnissen ist in Abhängigkeit von der Versuchsdauer auf Grund der ausbleibenden Schüttelbewegung eventuell die Gefahr gegeben, dass sich keine homogenen Konzentrationsverteilungen im Eluat einstellen. Dieses Problem könnte gelöst werden durch einen Versuchsaufbau analog zu gesättigten Säulenversuchen, bei denen das Material von unten nach oben durchströmt wird. Das Wasservolumen, welches in Kontakt mit dem Untersuchungsmaterial tritt, kann dabei entsprechend zum Wasser/Feststoff-Verhältnis, für das die Stofffreisetzung untersucht werden soll, eingestellt werden.

Ein Nachteil, den diese Vorgehensweise beinhaltet, besteht im wesentlich größeren Aufwand im Vergleich zu den Schüttelversuchen mit dem fein gemahlten Material. Dies umfasst sowohl eine wesentlich größere Materialmenge, die auf Grund der Korngröße und Materialheterogenität einzusetzen ist, als auch größere Probenbehälter für das Eluat, die zum Erreichen höherer Wasser/Feststoff-Verhältnisse erforderlich sind.

Mit **Säulenversuchen** können vorherrschende Mechanismen bei der Stofffreisetzung aus Recycling-Materialien wie Stofflösung von der Materialoberfläche, porenraumretardierte Freisetzung und oberflächliche Stoffabwaschung (kurzfristig) bzw. Freisetzung aus heterogenen Korngemischen (langfristig) ermittelt werden. Dabei weisen die Ergebnisse aus den Säulenversuchen auf eine gute Vergleichbarkeit mit den Feldversuchen hin, was sich an denselben vorherrschenden Prozessen bei der Freisetzung für eine Reihe von Stoffen zeigt (u.a.  $\text{SO}_4$ , Ca, Al, Cr).

Bei den Feldversuchen haben sowohl der Carbonatisierungsgrad des Betonbruchs als auch das  $\text{CO}_2$ -Vorkommen in den Becken maßgeblichen Einfluss auf sich einstellende pH-Werte. Ausführungen von GERTH (2001) heben ebenfalls den wesentlichen Einfluss des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks auf den pH-Wert und die Elution hervor. Diese für die Stofffreisetzung relevanten Einflussgrößen lassen sich mit Säulenversuchen ebenfalls erfassen, da sich beispielsweise in der Säule mit zum Feldversuch vergleichbaren Bedingungen bezüglich Korngröße und Beregnungsrate (Säule 1) ein ähnlicher pH-Wert in Feld und Labor für Material RCL 1 einstellt.

Abhängig vom Beurteilungskriterium (Abweichung von maximal  $\pm 10$  mg/l bzw.  $\mu\text{g/l}$ ) weisen mehrere Stoffe (Mg, Sb, As, Cu, Mn) ähnlich hohe **Konzentrationshöchstwerte** in den Eluaten von Säule 1 und Becken RCL 1 auf. Der Vergleich **aufsummierter Massenanteile** zeigt insbesondere bei Verwendung der Säulenversuchsergebnisse, die bei erhöhter Beregnungsrate auftreten (Säule 3), dass elementspezifisch dominante Parameter beachtet werden müssen. Da eine Einflussgröße wie Temperaturschwankungen bei den Säulenversuchen im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurde, liegt in diesem Fall eine langfristig nur grobe Abschätzbarkeit anhand der Säulenversuche mit erhöhter Beregnungsrate vor. Probleme bei der Übertragbarkeit zwischen Feld und Labor in Bezug auf Temperaturunterschiede werden auch bei SCHREURS et al.

(2000) erwähnt. Mehrere Stoffe (Cl, Na, Cr, Cu, Co, As) weisen jedoch auf eine vergleichsweise gute Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den Säulenversuchen für eine Langzeitprognose unter Freilandbedingungen in Bezug auf aufsummierte Massenanteile hin. Demnach kann elementspezifisch bei den Säulenversuchen durch Erhöhen der Beregnungsrate ein **Zeitraffereffekt** erzielt werden. Nach den bereits geschilderten Ausführungen, welche die Verwendung von Material in verschiedenen Korngrößen betreffen, empfiehlt sich auch bei Säulenversuchen die Untersuchung von Material in Originalkorngröße. Die Betrachtung des Wasser/Feststoff-Verhältnisses ist im Rahmen dieser Untersuchung als sinnvolle und weiterführende Vorgehensweise für den Vergleich zwischen Säulen- und Feldversuchen anzusehen.

**Huminstoffähnliche Substanzen** konnten bei den Feldversuchen im Sickerwasser beider Becken nachgewiesen werden. Dabei zeigen die Ergebnisse aus den aufgeschlossenen Filtrerrückständen, dass einige Stoffe (Zn, Cr, Mo) insbesondere an den huminstoffähnlichen Substanzen in Becken RCL 2 verstärkt gebunden vorlagen. Unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Probenbehandlung im Labor weisen darauf hin, dass die Konservierung durch Ansäuern eine Ausfällung dieser Substanzen mitsamt den daran sorbierten Stoffen zur Folge haben kann. Bei der Beurteilung der Stofffreisetzung aus den Recycling-Materialien muss aus diesem Grund der mögliche Einfluss huminstoffähnlicher Substanzen auf Analysenergebnisse berücksichtigt werden. Asphalt konnte im Rahmen dieser Arbeit als Quelle für die Freisetzung der huminstoffähnlichen Substanzen in den Recycling-Materialien identifiziert werden.

Die **Bildung von Sekundärphasen** tritt sowohl bei den Säulen- als auch bei den Feldversuchen auf. Dabei kommen bei den Feldversuchen neben Calcit auch aluminium- und eisenhaltige Phasen in Filtrerrückständen vor, einige Metalle (Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, As) konnten insbesondere in den Filtrerrückständen von Becken RCL 2 nachgewiesen werden. Die Bedeutung des partikulären Stofftransportes zeigt sich an Trübungswerten bis zu 500 mg/l bei den Feldversuchen. Die Ergebnisse bestätigen somit Ausführungen von FRIEGE et al. (1990), nach denen bei stückigen Materialien wie Bauschutt der partikelgebundene Stoffaustrag berücksichtigt werden muss. Vorübergehend zurückgehende Konzentrationen wie beispielsweise bei Molybdän, Kobalt und Chrom in Becken RCL 2 weisen auf die Bedeutung sekundär gebildeter Phasen für sich einstellende Stoffkonzentrationen hin.

Für eine genauere Bewertung, inwiefern diese in Becken RCL 2 aufgetretenen Prozesse nach dem pH-Wert Anstieg im Labor nachvollziehbar sind, könnten Säulenversuche mit Material RCL 2 weitere Klarheit bringen. Ein Rückgang des CO<sub>2</sub>-Vorkommens wie im Freiland ließe sich dabei durch Säulenversuche mit einem kontrollierten CO<sub>2</sub>-Partialdruck nachvollziehen. Dabei könnte ebenfalls der Frage nachgegangen werden, inwiefern die in Becken RCL 2 verstärkt aufgetretene Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen auch bei Säulenversuchen mit demselben Recycling-Material auftritt. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden auf Grund des erheblichen Aufwands bei den Säulenversuchen mit unterschiedlicher Beregnungsrate und Korngröße auf Material RCL 1 beschränkt. Bei den hier aufgeführten Möglichkeiten der Prozessstudie anhand von Säulenversuchen ist zu beachten, dass diese je nach Fragestellung mit einem erheblichen Zeit- und Materialaufwand verbunden sein können.

### 6.3 Ausblick

Nach den Ausführungen ist es nicht möglich, aus einem einzelnen der angewandten Laborversuche eine umfassende und präzise Prognose zum Stoffaustrag aus Recycling-Materialien unter Freilandbedingungen abzuleiten. Vielmehr ist eine Kombination verschiedener Verfahren zur bestmöglichen Beurteilung der Stofffreisetzung für kurz- und langfristige Zeiträume anzustreben.

Sowohl der pH-stat Versuch (Material fein gemahlen) als auch elementspezifisch (Cl, Na, Cr, Cu, Co, As) der Säulenversuch (Material in Originalkorngröße) mit erhöhter Beregnungsrate und bezogen auf aufsummierte Massenanteile zeigen, dass ein Zeitraffereffekt im Labor erzielt werden kann. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten daher das Augenmerk insbesondere auf Säulenversuche legen, wobei diese jedoch für Routineuntersuchungen als zu teuer anzusehen sind. Im Hinblick auf stattfindende Prozesse bei der Stofffreisetzung unter natürlichen Bedingungen bieten diese Versuche eine viel versprechende Möglichkeit, zu einem besseren Prozessverständnis anhand von Laborversuchen zu gelangen. Die Modifikation von Randparametern wie CO<sub>2</sub>-Partialdruck und Temperaturschwankungen und deren Auswirkungen auf Freisetzungsprozesse ist ein Bereich, in dem zukünftige Forschungsansätze im Hinblick auf Säulenversuche mit Recycling-Materialien liegen können.

Im Rahmen dieser Arbeit zeigt sich des Weiteren, dass durch Materialzerkleinerung Freisetzungsprozesse erheblich beeinflusst werden, was eine genauere Ergebnisinterpretation erschwert. Daher sollte ein weiteres Augenmerk auf Standtests mit Materialien in Originalkorngröße und unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen gelegt werden. Ein Ergebnisvergleich aus diesen Versuchen mit Resultaten aus den Feldversuchen würde weitere Aussagen hinsichtlich der naturnahen Prognostizierbarkeit anhand von Laborversuchen ermöglichen.

Bereits vor Erschöpfung der Pufferkapazität tritt bei den Feldversuchen in Becken RCL 2 mit hohen Arsenkonzentrationen ( $> 100 \mu\text{g/l}$ ) eine signifikante Stofffreisetzung auf. Aus der vergleichenden Ergebnisbetrachtung unterschiedlicher Laborverfahren lässt sich dieses Freisetzungsverhalten unter natürlichen Bedingungen nicht vorhersagen. Daher könnten eine weitergehende Untersuchung und Charakterisierung von Material RCL 2, insbesondere im Hinblick auf Bindungsformen und Speziation von Arsen in den Einzelkomponenten (Asphalt, Schlacke, Ziegel, Natursteine), genauere Rückschlüsse erlauben. Eine geeignete Messmethodik hierfür stellt eventuell XAFS (X-Ray Absorption Fine Structure) dar, die eine elementspezifische, direkte und zerstörungsfreie Bestimmung der Elementspeziation in festen Proben ermöglicht (REICH 2002). Durch die hohe Nachweisgrenze bei dieser Methode sind dafür jedoch nur Einzelkomponenten mit möglichst hohen Arsengehalten verwendbar.

In der Anwendung sequentieller Extraktionsverfahren besteht eine weitere Möglichkeit, zu weiterführenden Kenntnissen in dieser Hinsicht zu gelangen. Bei der sequentiellen Extraktion werden verschiedene Spezies stufenweise durch Zugabe von Agentien mit steigendem Oxidationspotential freigesetzt (ZEIEN & BRÜMMER 1989). Dabei kann sich nach PALITZSCH (2002) im Fall von Rostasche in Abhängigkeit von der Feststoffzusammensetzung und der Pufferkapazität des Materials die stufenweise Freisetzung einzelner Spezies durch Readsorption, Fällung bzw. Komplexbildung ändern. Auf Grund der Materialheterogenität müsste daher bei Recycling-Baustoffen zunächst überprüft wer-

den, ob sich nach dieser Vorgehensweise verschiedene Spezies reproduzierbar nachweisen lassen.

Die Modellierung vorherrschender Arsenspezies in den Sickerwässern von Becken RCL 1 und 2 mit dem Programm PhreeqC (PARKHURST & APPELO 2002) gibt bei den Feldversuchen wichtige Hinweise für die Ergebnisinterpretation. Demzufolge wird es zukünftig auch ein Bestreben sein, mit geeigneten Programmen Prozesse realitätsnah am Computer zu simulieren und Aussagen bezüglich auftretender Konzentrationen, Sekundärphasen und Sorptionsprozessen hieraus abzuleiten. Zur Untersuchung von Systemen, bei denen der pH-Wert eine wichtige Rolle spielt, kann als weiteres Modell das Programm GEMS (KULIK et al. 2003) mit seiner umfangreichen Datenbank, insbesondere im Hinblick auf die in Beton auftretenden CSH-Phasen, zukünftig eine nützliche Hilfe darstellen.

## 7 Literatur

- APPELO, C.A.J., POSTMA, D. (1999): Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, 536 S.
- ARNOLD, A. (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 61, S. 147-166
- BDZ (Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.) (2000): Putz. Zement-Merkblatt Hochbau, Nr. H7, 12/2000, Köln, 5 S.
- BDZ (Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.) (2001): Zemente und ihre Herstellung. Zement-Merkblatt Betontechnik, Nr. B1, 9/2001, Köln, 8 S.
- BECKERT, M., HARTMANN, R. (1976): Nichtmetallische Werkstoffe – allgemeinverständlich. Heyne Verlag, München, 272 S.
- BERNER, U.R. (1988): Modelling the Incongruent Dissolution of Hydrated Cement Minerals. Radiochimica Acta, 44/45, S. 387-393
- BERNSEE, A.M.J. (2003): Vergleich hydrochemischer Elutionsmethoden für Recyclingmaterialien. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Mainz, 79 S.
- BIN SHAFIQUE, Md., WALTON, J.C., GUTIERREZ, N., SMITH, R.W., TARQUIN, A.J. (1998): Influence of carbonation on leaching of cementitious wasteforms. Journal of Environmental Engineering, May 1998, S. 463-467
- BLANKENHORN, I. (1994): Derzeitige Anwendung und Entwicklung von Elutionsverfahren. In: Schriftenreihe Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung des Landesamtes für Umweltschutz Baden-Württemberg, 11/94; Karlsruhe
- BMV (Bundesministerium für Verkehr) (1998): Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Grenz- und Richtwerten des Schüttelverfahrens nach DEV-S4 auf Trogverfahren. Bundesministerium für Verkehr – Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Heft 759, Bonn-Bad Godesberg, 112 S.
- BMVBW & BMVG (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen & Bundesministerium der Verteidigung) (1998): Arbeitshilfen Recycling – Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Bauabfällen bei Planung und Ausführung von baulichen Anlagen, Bonn, 60 S.
- BOTHE JR., J.V., BROWN, P.W. (1999): The stabilities of calcium arsenates at 23 +/- 1 °C. Journal of Hazardous Materials, B69, S. 197-207
- BOURG, A.C.M. (1995): Speciation of Heavy Metals in Soils and Groundwater and Implications for Their Natural and Provoked Mobility. in: SALOMONS, W., FÖRSTNER, U., MADER, P. (1995): Heavy Metals – Problems and Solutions. Springer-Verlag, Berlin, 412 S.
- BRB (Bundesvereinigung Recycling Bau e.V.) (2002a): Presse-Information vom 17. Januar 2002 – ARGE Kreislaufwirtschaftsträger Bau übergibt 2. Monitoring-Bericht Bauabfälle an Bundesumweltminister Trittin
- BRB (Bundesvereinigung Recycling Bau e.V.) (2002b): RC-News Ausgabe I / 2002. Informationsdienst des Management-Centers Baustoff-Recycling, Berlin
- BUSCH, K.F., LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. Enke Verlag, Stuttgart, 442 S.
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBODSchV) vom 12. Juli 1999, BGBl. I, S. 1554

- CARLE, D. (1993): Ökologische Aspekte bei der Gestaltung von Kreislaufprozessen in der Bauwirtschaft. Diplomarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Umweltschutztechnik, September 1993, 77 S.
- COMANS, R.N.J., MIDDELBURG, J.J. (1987): Sorption of trace metals on calcite: Applicability of the surface precipitation model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, S. 2587-2591
- CONSTANTINER, D., DIAMOND, S. (2003): Alkali release from feldspars into pore solutions. *Cement and Concrete Research*, 33, S. 549-554
- COTE, P.L., CONSTABLE, T.W., MOREIRA, A. (1987): An evaluation of cement-based waste forms using the results of approximately two years of dynamic leaching. *Nuclear and Chemical Waste Management*, 7, S. 129-139
- DANKWARTH, F., GERTH, J. (2002): Abschätzung und Beeinflussbarkeit der Arsenmobilität in kontaminierten Böden. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 30, S. 41-48
- DE GROOT, G.J., WIJKSTRA, J., HOEDE, D., VAN DER SLOOT, H.A. (1989): Leaching Characteristics of Selected Elements from Coal Fly Ash as a Function of the Acidity of the Contact Solution and the Liquid/Solid Ratio. in: COTE, P.L., GILLIAM, T.M. (Hrsg.): *Environmental Aspects of Stabilization and Solidification of Hazardous and Radioactive Wastes*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, S. 170-183
- DIBT (Deutsches Institut für Bautechnik) (2000): Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser (Merkblatt). *Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik*, Reihe M, Heft 1, Fassung November 2000, Berlin, 19 S.
- DIERKES, C. (1999): Verhalten von Schwermetallen im Regenabfluß von Verkehrsflächen bei der Versickerung über poröse Deckenbeläge. Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Essen, 201 S.
- DIN ISO 11464 (1996): Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 18123 (1996): Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 18125 - Teil 2 (1986): Bestimmung der Dichte des Bodens. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 19682 - Teil 7 (1972) Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelzylinder-Infiltrimeter. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 19730 (1997): Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung. Beuth Verlag, Berlin
- DIN V 19735 (1999): Beschreibung der Gewinnung des Bodensättigungsextraktes – Anhang A.2 der DIN V 19735. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 38414 – Teil 4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 38414 – Teil 7 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen. Beuth Verlag, Berlin
- DOW, C., GLASSER, F.P. (2003): Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials. *Cement and Concrete Research*, 33, S. 147-154
- DREVER, J.I. (1982): *The geochemistry of natural waters*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 388 S.

- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin, 536 S.
- ENGESER, B., MEDERER, J., ZÖRKENDÖRFER, E. (1998): Untersuchungen an Bauschutt-Recycling Material und Diskussion der Bezüge zur LAGA-TR/Bauschutt. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, NLFb/N 4.07, Hannover, 45 S.
- FALBE, J., REGITZ, M. (Hrsg.) (1998): Römpp - Lexikon Chemie. 10. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart, 6 Bände
- FÄLLMAN, A.M., AURELL, B. (1996): Leaching tests for environmental assessment of inorganic substances in wastes, Sweden. *The Science of the Total Environment*, 178, S. 71-84
- FÄLLMAN, A.M. (1997): Performance and Design of the Availability Test for Measurement of Potentially Leachable Amounts from Waste Materials. *Environmental Science & Technology*, 31, S. 735-744
- FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (1999): Modifiziertes DEV-S4-Verfahren – Technische Prüfungsvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau (TP Min-StB Teil 7.1.1) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV-Verlag, Köln, 3 S.
- FÖRSTNER, U. (1987): Changes in metal mobilities in aquatic and terrestrial cycles. in: PATTERSON, J.W., PASSINO, R. (Hrsg.): *Metals speciation, separation and recovery*. Lewis Publishers, Chelsea, S. 3-26
- FÖRSTNER, U. (1998): Gefahrenbeurteilung von Böden und Altlasten / Schutz des Grundwassers: Kritische Anmerkungen zu Konzept und Methode der Gefahrenbeurteilung. in: FRANZIUS, V., BACHMANN, G. (Hrsg.): *Sanierung kontaminierter Standorte und Bodenschutz 1998*, Erich Schmidt Verlag Berlin, S. 43-54
- FÖRSTNER, U., THÖMING, J. (1997): Altlasten einfach wegrechnen ?. *Bodenschutz*, 3, S. 72-73
- FRANKE, H.J. (1993): Recycling von Betondecken im Autobahnbau. *Straße + Autobahn*, 10/93, S. 615-617
- FRIEGE, H., LEUCHS, W., PLÖGER, E., CREMER, S., OBERMANN, P. (1990): Bewertungsmaßstäbe für Abfallstoffe aus wasserwirtschaftlicher Sicht. *Müll und Abfall*, 7, S. 413-426
- FRIMMEL, F.H., ABBT-BRAUN, G., HEUMANN, K.G., HOCK, B., LÜDEMANN, H.D., SPITELLER, M. (2002): *Refractory Organic Substances in the Environment*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 546 S.
- FROST, R.R., GRIFFIN, R.A. (1977): Effect of pH on Adsorption of Arsenic and Selenium from Landfill Leachate by Clay Minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 41, S. 53-57
- FRUCHTER, J.S., RAI, D., ZACHARA, J.M. (1990): Identification of Solubility-Controlling Solid Phases in a Large Fly Ash Field Lysimeter. *Environmental Science & Technology*, 24, S. 1173-1179
- GARTNER, E.M., JENNINGS, H.M. (1987): Thermodynamics of Calcium Silicate Hydrates and Their Solutions. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 70, Nr. 10, S. 743-749
- GAUGLITZ, R., MÜLLER-HÖPPE, N. (1999): Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087) – Grundlagen der Bewertung von Hydroxylapatit als chemische Barriere gegenüber Schwermetallen. Abschlussbericht, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Juni 1999
- GDCH (Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker) (1996): *Chemie und Biologie der Altlasten*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 466 S.

- GERTH, J. (2001): Quelltermermittlung für anorganische Schadstoffe unter simulierten in situ-Verhältnissen. Altlasten Spektrum, 6, S. 305-309
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/ABFG) vom 27. September 1994, BGBl. I, S. 2705
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 12. November 1996, BGBl. I, S. 1695
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998, BGBl. I, S. 502
- GIAMPAOLO, C., LO MASTRO, S., POLETTINI, A., POMI, R., SIRINI, P. (2002): Acid neutralisation capacity and hydration behaviour of incineration bottom ash – Portland cement mixtures. Cement and Concrete Research, 32, S. 769-775
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STADELMANN, F.X., STICHER, H. (1997): Bodenökologie. 2. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart, 360 S.
- GLASSER, F.P. (1992): Chemistry of cement-solidified waste forms. in: SPENCE, R.D. (Hrsg.): Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms, Lewis Publishers, Boca Raton, 288 S.
- GLASSER, F.P. (1997): Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. Journal of Hazardous Materials, 52, S. 151-170
- GOETZ, D., GERWINSKI, W. (1989): Empfehlungen zur Vereinheitlichung der Auslaugbarkeit nach dem DEV-S4-Verfahren für die Untersuchung von Straßenbaustoffen. Straße und Autobahn, 10, S. 387-388
- GOUGAR, M.L.D., SCHEETZ, B.E., ROY, D.M. (1996): Ettringite and CSH Portland Cement Phases for Waste Ion Immobilization: a review. Waste Management, 16, S. 295-303
- GRATHWOHL, P. (2000): Materialuntersuchung in Säulenversuchen als Teil der Sickerwasserprognose: Konzeption, Reproduzierbarkeit, Kosten und Interpretation der Ergebnisse. Bodenschutz, 2, S. 38-42
- GSF (Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit) (1997): Grundlagen und Perspektiven einer nachhaltigen Bauwirtschaft – Phase A: Zustandsanalyse des für die Bauwirtschaft relevanten Ressourcenverbrauches (Ökologische und ökonomische Relevanz). Projekt-Nr. 07 OWI 03, Forschungszentrum für Umwelt- und Gesundheit GmbH, München, 314 S.
- HALL, G.E.M., MACLAURIN, A.I., GARRETT, R.G. (1998): Assessment of the 1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> extraction protocol to identify mobile forms of Cd in soils. Journal of Geochemical Exploration, 64, S. 153-159
- HAMER, K., KARIUS, V. (2002): Brick production with dredged harbour sediments - an industrial-scale experiment. Waste Management, 22, S. 521-530
- HARRIS, A.W., MANNING, M.C., TEARLE, W.M., TWEED, C.J. (2002): Testing of models of the dissolution of cements – leaching of synthetic CSH gels. Cement and Concrete Research, 32, S. 731-746
- HEIMANN, R.B., CONRAD, D., FLORENCE, L.Z., NEUWIRTH, M., IVEY, D.G., MIKULA, R.J., LAM, W.W. (1992): Leaching of simulated heavy metal waste stabilized / solidified in different cement matrices. Journal of Hazardous Materials, 31, S. 39-57
- HENNING, O., KNÖFEL, D. (1997): Baustoffchemie – eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. Verlag Bauwesen, Berlin, 6. Auflage, 192 S.

- HILLIER, S.R., SANGHA, C.M., PLUNKETT, B.A., WALDEN, P.J. (1999): Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, S. 515-521
- HIRNER, A.V., PESTKE, F.M., BUSCHE, U. (1998): Konzepte zur Mobilitätsabschätzung von Schadstoffen in Boden- und Abfallmaterialien. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 26, S. 226-229
- HIRSCHMANN, G., FÖRSTNER, U. (2000a): Langzeitprognosen zum Sickerwasseraustrag von Schwermetallen aus Deponien von Müllverbrennungsschlacken. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, 28, S. 262-271
- HIRSCHMANN, G., FÖRSTNER, U. (2000b): Langzeitverhalten von Schlackedeponien. Dokumentation der 2. Hamburger Abfallwirtschaftstage „Deponietechnik 2000“, Stegmann/Rettenberger/Bidlingmaier (Hrsg.), Hamburger Berichte Band 16, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 16 S.
- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2001): Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden – Grundwasser (Sickerwasserprognose) – Handbuch Altlasten, Band 3 Teil 3. Druck- und Verlagshaus Chmielorz, Wiesbaden, 80 S.
- HÖLTING, B. (1992): Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. Enke Verlag, Stuttgart, 415 S.
- HOFMANN, Th. (1998): Kolloidale und suspendierte Partikel – Herkunft, Transport und Relevanz von mobilen Festphasen im Hinblick auf die künstliche Grundwasseranreicherung. *Dortmunder Beiträge zur Wasserforschung*, Nr. 56, Dortmund, 226 S.
- HOLNSTEINER, R. (1997): Praxisgerechte Prüfung des Auslaugverhaltens von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen. *Straßenforschung Heft 468*, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 137 S.
- HOUST, Y.F., WITTMANN, F.H. (2002): Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. *Cement and Concrete Research*, 32, S. 1923-1930
- ISENBECK-SCHRÖTER, M. (1995): Transportverhalten von Schwermetallkationen und Oxoanionen – Laborversuche in Säulen und ihre Modellierung. Bericht Nr. 67, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, 182 S.
- JAIN, A., LOEPPERT, R.H. (2000): Effect of Competing Anions on the Adsorption of Arsenate and Arsenite by Ferrihydrite. *Journal of Environmental Quality*, 29, S. 1422-1430
- JASMUND, K., LAGALY, G. (1993): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 490 S.
- JAUBERTHIE, R., RENDELL, F. (2003): Physicochemical study of the alteration surface of concrete exposed to ammonium salts. *Cement and Concrete Research*, 33, S. 85-91
- JOHNSON, C.A., RICHNER, G.A., VITVAR, T., SCHNITTLI, N., EBERHARD, M. (1998): Hydrological and geochemical factors affecting leachate composition in municipal solid waste incinerator bottom ash – Part I: the hydrology of landfill Lostdorf, Switzerland. *Journal of Contaminant Hydrology*, 33, S. 361-376
- JOHNSON, C.A., MOENCH, H., BRANDENBERGER, S. (1999): Assessing the Potential Long-Term Behavior of the Landfill Fraction of Sorted Demolition Wastes. *Journal of Environmental Quality*, 28, S. 1061-1067
- KARIUS, V., HAMER, K. (2001): pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks. *The Science of the Total Environment*, 278, S. 73-85

- KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 9, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 519 S.
- KÄSTEL, D. (1992): Baustoff- und Beton-Recycling – Neuer Markt mit großen Chancen. Beton 3/92, S. 142-143
- KEON, N.E., SWARTZ, C.H., BRABANDER, D.J., HARVEY, C., HEMOND, H.F. (2001): Validation of an Arsenic Sequential Extraction Method for Evaluating Mobility in Sediments. Environmental Science & Technology, 35, S. 2778-2784
- KERSTEN, M. (1996): Emissionspotential einer Schlackenmonodeponie: Schwermetalle im Sickerwasser von Müllverbrennungsschlacken – ein langfristiges Umweltgefährdungspotential ?. Geowissenschaften, 14, Heft 5, S. 180-185
- KEUNE, H. (Hrsg.) (1989): Taschenlexikon Chemie. 2. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 512 S.
- KIM, R.Y., WELP, G., MÜLLER, I., BRÜMMER, G.W. (2002): Cr(VI) in Böden: Probleme mit der DIN 19734 sowie Cr(VI)-Gehalte und –Stabilität in belasteten und unbelasteten Böden Nordrhein-Westfalens. Altlasten Spektrum, 2, S. 59-65
- KLOTZ, D., SEILER, K.P., SCHROLL, R. (2000): Die GSF-Lysimeteranlagen. In SEILER, K.P., KLOTZ, D. (Hrsg.): Methoden der Sickerwassermodellierung – Theorie und Praxis. GSF-Bericht 18/00, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg, Dezember 2000, 204 S.
- KOß, V. (1997): Umweltchemie – eine Einführung für Studium und Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 288 S.
- KOENSLER, W. (1989): Sand und Kies – Mineralogie, Vorkommen, Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten. Enke Verlag, Stuttgart, 123 S.
- KRASS, K., KELLERMANN, Ch., ROHLEDER, M. (1999a): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997. Straße und Autobahn, 8, S. 414-422
- KRASS, K., MERKEL, Th. (1989a): Untersuchungen zum Elutionsverhalten von Straßenaufbruch – Einfluß unterschiedlicher Teeranteile - Teil 2. Forschungsbericht, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, 26 S.
- KRASS, K., MERKEL, Th. (1989b): Untersuchungen zum Elutionsverhalten von Asphaltgranulat – Verfahren und Bewertung - Teil 1. Forschungsbericht, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, 26 S.
- KRASS, K., STOPPKA, B., WILLMEROOTH, K.P. (1999b): Infiltrationsmessungen an wasserdurchlässigen Schichten. Straße und Autobahn, 11, S. 601-604
- KRAUS, K. (2002): Lösliche Alkalisalze in neuen Mörteln (Bestimmung, Gehalte, Bewertung, Untersuchungsbedarf und erste Ergebnisse). Bericht Nr. 14, Institut für Steinkonservierung, Mainz, S. 11-18
- KRAUSE, Ch., FISCH, E., ROHRBACH, G. (1993): Kationenaustauschkapazität – Ein Beitrag zur Methoden-Standardisierung für die Bewertung mineralischer Deponiebasisabdichtungen. Keramische Zeitschrift, 45, S. 385-389
- KULIK, D.A., KERSTEN, M. (2001): Aqueous Solubility Diagrams for Cementitious Waste Stabilization Systems: II, End-Member Stoichiometries of Ideal Calcium Silicate Hydrate Solid Solutions. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 84, No. 12, S. 3017-3026

- KULIK, D.A., DMYTRIYEVA, S.V., RYSIN, A.V., CHUDNENKO, K.V., KARPOV, I.K. (2003): GEM-Selektor version 2-PSI. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz
- KUMKE, M.U., ZWIENER, C., ABBT-BRAUN, G., FRIMMEL, F.H. (1999): Spectroscopic Characterization of Fulvic Acid Fractions of a Contaminated Groundwater. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, 27, S. 409-415
- KWTB (Kreislaufwirtschaftsträger Bau e.V.) (2000): Monitoring-Bericht Bauabfälle. Berlin / Düsseldorf / Duisburg, 20. März 2000, 38 S.
- LICHTFUSS, R. (2000): Verfahren zur Abschätzung von anorganischen Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser nach der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV). *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 92, S. 43-46
- LINDGREN, A. (1996): Asphalt wear and pollution transport. *The Science of the Total Environment*, 189/190, S. 281-286
- MANNING, B.A., GOLDBERG, S. (1997): Adsorption and Stability of Arsenic (III) at the Clay Mineral – Water Interface. *Environmental Science & Technology*, 31, S. 2005-2011
- MANNING, B.A., FENDORF, S.E., BOSTICK, B., SUAREZ, D.L. (2002): Arsenic (III) Oxidation and Arsenic (V) Adsorption Reactions on Synthetic Birnessite. *Environmental Science & Technology*, 36, S. 976-981
- MATERA, V., LE HECHO, I. (2001): Arsenic Behavior in Contaminated Soils: Mobility and Speciation. in: SELIM, H.M., SPARKS, D.L. (Hrsg.): *Heavy Metals Release in Soils*. Lewis Publishers, Boca Raton, 249 S.
- MATTHEß, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers – Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2. 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 498 S.
- MERKEL, B.J., PLANER-FRIEDRICH, B. (2002): *Grundwasserchemie*. Springer-Verlag Berlin, 2002, 219 S.
- MESTERS, K. (1998): Verfahren zur Auslaugung von Mineralstoffen. *Straße und Autobahn*, 2, S. 69-75
- MULDER, E. (1991): The Leaching Behaviour of Some Primary and Secondary Raw Materials Used in Pilot-scale Road Bases. in: GOUMANS, J.J.J.R., VAN DER SLOOT, H.A., AALBERS, T.G. (Hrsg.): *Waste Materials in Construction*, Elsevier, Amsterdam, 904 S.
- MYNENI, S.C.B., TRAINA, S.J., LOGAN, T.J., WAYCHUNAS, G.A. (1997): Oxyanion Behaviour in Alkaline Environments: Sorption and Desorption of Arsenate in Ettringite. *Environmental Science & Technology*, 31, S. 1761-1768
- MYNENI, S.C.B., TRAINA, S.J., WAYCHUNAS, G.A., LOGAN, T.J. (1998a): Experimental and theoretical vibrational spectroscopic evaluation of arsenate coordination in aqueous solutions, solids, and at mineral-water interfaces. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, S. 3285-3300
- MYNENI, S.C.B., TRAINA, S.J., WAYCHUNAS, G.A., LOGAN, T.J. (1998b): Vibrational spectroscopy of functional group chemistry and arsenate coordination in ettringite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, S. 3499-3514
- OBERMANN, P., CREMER, S. (1992): Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens (Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten). Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 127 S.

- OSCARSON, D.W., HUANG, P.M., LIAW, W.K. (1980): The Oxidation of Arsenite by Aquatic Sediments. *Journal of Environmental Quality*, 9, S. 700-703
- OTTO, M. (1995): *Analytische Chemie*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 668 S.
- PALITZSCH, S. (2002): Einfluss der Alterung auf die wasserwirtschaftliche Qualität von Rostaschen der thermischen Abfallbehandlung. Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Mainz, 140 S.
- PARKHURST, D.L., APPELO, C.A.J. (2002): User's guide to Phreeqc (Version 2) - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey – Water Resources Investigations Report 99-4259, Mai 2002, 310 S.
- PASCHKE, A., WENNRICH, R., MORGENSTERN, P. (1999): Comparison of 24 h and Long-term pH<sub>stat</sub> Leaching Tests for Heavy Metal Mobilization from Solid Matrices. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, 27, S. 223-229
- PERKINS, R.B., PALMER, C.D. (2000): Solubility of Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(CrO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>\*26H<sub>2</sub>O, the chromate analog of ettringite; 5 – 75 °C. *Applied Geochemistry*, 15, S. 1203-1218
- PEZZAROSSA, B., PETRUZZELLI, G. (2001): Selenium Contamination in Soil: Sorption and Desorption Processes. in: SELIM, H.M., SPARKS, D.L. (Hrsg.): *Heavy Metals Release in Soils*. Lewis Publishers, Boca Raton, 249 S.
- POON, C.S., CLARK, A.I., PETERS, C.J., PERRY, R. (1985): Mechanisms of metal fixation and leaching by cement based fixation processes. *Waste Management & Research*, 3, S. 127-142
- POON, C.S., CHEN, Z.Q., WAI, O. (1999): A Flow-Through Leaching Model for Monolithic Chemically Stabilized/Solidified Hazardous Waste. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49, S. 569-575
- PRINZ, H. (1991): *Abriß der Ingenieurgeologie*. Enke Verlag, Stuttgart, 2. Auflage, 466 S
- QUEVAUVILLER, PH., URE, A., MUNTAU, H., GRIEPINK, B. (1993a): Improvement of analytical measurements within the BCR-Programme: single and sequential extraction procedures applied to soil and sediment analysis. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 51, S. 129-134
- QUEVAUVILLER, PH., RAURET, G., GRIEPINK, B. (1993b): Single and sequential extraction in sediments and soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 51, S. 231-235
- QUEVAUVILLER, PH., VAN DER SLOOT, H.A., URE, A., MUNTAU, H., GOMEZ, A., RAURET, G. (1996): Conclusions of the workshop: harmonization of leaching / extraction tests for environmental risk assessment. *The Science of the Total Environment*, 178, S. 133-139
- RASSINEUX, F., PETIT, J.C., MEUNIER, A. (1989): Ancient Analogues of Modern Cement: Calcium Hydrosilicates in Mortars and Concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France. *Journal of the American Ceramic Society*, 72, S. 1026-1032
- RAL-RG 501/1 (1999): *Recycling-Baustoffe für den Straßenbau - Gütesicherung RCL-RG 501/1*. Ausgabe August 1999, Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Beuth-Verlag, Berlin, 18 S.
- RAVEN, K.P., JAIN, A., LOEPPERT, R.H. (1998): Arsenite and Arsenate Adsorption on Ferrihydrite: Kinetics, Equilibrium, and Adsorption Envelopes. *Environmental Science & Technology*, 32, S. 344-349

- RECHENBERG, W., SPRUNG, S., SYLLA, H.M. (1991): A Test method for the determination of the leachability of trace elements from wastes bound with cement. in: GOUMANS, J.J.J.R., VAN DER SLOOT, H.A., AALBERS, T.G. (Hrsg.): Waste Materials in Construction, Elsevier, Amsterdam, 904 S.
- REICH, T. (2002): Spektroskopische Speziation von Actiniden mittels Synchrotronstrahlung. Vortrag anlässlich des Wissenschaftlichen Symposiums der GDCh-Fachgruppe Nuklearchemie, 22. Februar 2002, Mainz
- REVERTEGAT, E., RICHET, C., GEGOUT, P. (1992): Effect of pH on the durability of cement pastes. Cement and Concrete Research, 22, S.259 - 272
- RG MIN-STB 93 (1993): Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, Ausgabe 1993. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, 24 S.
- SAVAGE, D., BATEMAN, K., HILL, P., HUGHES, C., MILODOWSKI, A., PEARCE, J., RAE, E., ROCHELLE, C. (1992): Rate and mechanism of the reaction of silicates with cement pore fluids. Applied Clay Science, 7, S. 33-45
- SAVRIC, I. (2001): Einflussfaktoren auf die Bindung und Mobilität organischer und anorganischer Stoffe in kontaminierten Rieselfeldböden. Dissertation, Fakultät für Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, 171 S.
- SCHÄFER, I. (2002): Vergleichende Beurteilung des Elutionsverhaltens von Recycling-Baustoffen im Rahmen der Sickerwasserprognose. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Mainz, 97 S.
- SCHMID, Th. (2001): Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen – Hessische Richtlinie zur Beurteilung des Pfades Boden – Grundwasser. in: Sickerwasserprognose / Natural Attenuation, Fachgespräch am 20. November 2001, Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht Oppenheim & Ministerium für Umwelt und Forsten Mainz, S. 1-15
- SCHMIDT-DÖHL, F. (1996): Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 125, 246 S.
- SCHOER, J., FÖRSTNER, U. (1987): Abschätzung der Langzeitbelastung von Grundwasser durch die Ablagerung metallhaltiger Feststoffe. Vom Wasser, 69, S. 23-32
- SCHREURS, J.P.G.M., VAN DER SLOOT, H.A., HENDRIKS, Ch. (2000): Verification of laboratory-field leaching behavior of coal fly ash and MSWI bottom ash as a road base material. Waste Management, 20, S. 193-201
- SCHRÖCKE, H., WEINER, K.L. (1981): Mineralogie – ein Lehrbuch auf systematischer Grundlage. Berlin, de Gruyter-Verlag, 952 S.
- SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung: anwendungsorientierte Messverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer-Verlag, Heidelberg, 186 S.
- SCHUWIRTH, N. (2002): Das Elutionsverhalten von Recyclingbaustoffen – eine Untersuchung mittels Säulenversuchen im Rahmen der Sickerwasserprognose. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Mainz, 89 S.
- SCHWEDT, G. (1996): Taschenatlas der Analytik. G. Thieme Verlag, Stuttgart, 241 S.
- SELIM, H.M., SPARKS, D.L. (2001): Heavy Metals Release in Soils. Lewis Publishers, Boca Raton, 249 S.
- SPARKS, D.L. (1998): Soil physical chemistry (2<sup>nd</sup> edition). Lewis Publishers, London, 409 S.

- SPEISER, C., BAUMANN, T., NIESSNER, R. (2000): Morphological and Chemical Characterization of Calcium-Hydrate Phases Formed in Alteration Processes of Deposited Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. *Environmental Science & Technology*, 34, S. 5030-5037
- SPOSITO, G. (1998): *Bodenchemie*. Enke Verlag, Stuttgart, 230 S.
- SPRINGENSCHMID, R., FLEISCHER, W., REIMER, B. (1993): Zemente für Fahrbahndecken aus Beton. *Straße und Autobahn*, 7, S. 415-421
- SPRUNG, S., RECHENBERG, W. (1994): Schwermetallgehalte im Klinker und im Zement. *Zement-Kalk-Gips*, Nr. 5/1994, S. 258-263
- SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2000): *Umweltgutachten 2000*. Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 685 S.
- STARK, J., WICHT, B. (2000): *Zement und Kalk – der Baustoff als Werkstoff*. Birkhäuser Verlag, Basel, 376 S.
- STRUNZ, H. (1982): *Mineralogische Tabellen – eine Klassifizierung der Mineralien auf kristall-chemischer Grundlage*. 8. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 621 S.
- TA SIEDLUNGSABFALL (Technische Anleitung Siedlungsabfall) (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz vom 14. Mai 1993 – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Beil. BAnz. Nr. 99
- TAYLOR, H.F.W. (1997): *Cement chemistry*. Thomas Telford Publishing, London, 459 S.
- TIRUTA-BARNA, L., BARNA, R., MOSZOWICZ, P. (2001): Modeling of Solid/Liquid/Gas Mass Transfer for Environmental Evaluation of Cement-Based Solidified Waste. *Environmental Science & Technology*, 35, S. 149-156
- TL RC-TOB 95 (1995): *Technische Lieferbedingungen für Recycling-Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel*, Ausgabe 1995. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, 10 S.
- TOSSAVAINEN, M., FORSSBERG, E. (1999): The potential leachability from natural road construction materials. *The Science of the Total Environment*, 239, S. 31-47
- TRABER, D., JACOBS, F., MÄDER, U., EGGENBERGER, U. (2000): Einsatz von Sekundärstoffen im Beton: technische und ökologische Anforderungen. *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, Vol. 66, 11, S. 76-84
- TRETNER, A. (2003): Bedeutung und Verhalten von Arsen in der Hydrosphäre. *Grundwasser*, 1/2003, S. 3-12
- TURNER, R.R. (1981): Oxidation State of Arsenic in Coal Ash Leachate. *Environmental Science & Technology*, 15, S. 1062-1066
- UBA (Umweltbundesamt) (1999): Validierung von Boden-Eluatgehalten zur Prognose von Inhaltsstoffen des Boden-Sickerwassers für das untergesetzliche Regelwerk/BBodSchV. *Forschungsbericht 297 73 00 8/02*, UBA-FB 99-104, Texte 86/99, 55 S.
- VAN DER SLOOT, H.A. (1991): Systematic leaching behaviour of trace elements from construction materials and waste materials. in: GOUMANS, J.J.J.R., VAN DER SLOOT, H.A., AALBERS, T.G. (Hrsg.): *Waste Materials in Construction*, Elsevier, Amsterdam, 904 S.

- VAN DER SLOOT, H.A. (1998): Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. *Trends in Analytical Chemistry*, 17/5, S. 298-309
- VAN DER SLOOT, H.A. (2000): Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research*, 30, S. 1079-1096
- VAN DER SLOOT, H.A. (2002): Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment. *Waste Management*, 22, S. 181-186
- VAN DER SLOOT, H.A., DE GROOT, G.J. (1990): Characterization of municipal solid waste incinerator residues for utilization: leaching properties. Bericht, Netherlands Energy Research Foundation, Petten, 20 S.
- VAN DER SLOOT, H.A., HEASMAN, L., QUEVAUVILLER, Ph. (1998): Harmonization of Leaching / Extraction tests – Studies in Environmental Science 70. Elsevier, Amsterdam, 281 S.
- VAN DE SAND, M., FISCHER, W.R. (1994): Quantifizierung der wichtigsten Mechanismen zur Säurepufferung carbonatfreier Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 157, S. 369-373
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) (2000): Zement – Taschenbuch 2000. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 49. Ausgabe, 779 S.
- VENHUIS, M.A., REARDON, E.J. (2001): Vacuum Method for Carbonation of Cementitious Wasteforms. *Environmental Science & Technology*, 35, S. 4120-4125
- VOIGT, H.J. (1990): Hydrogeochemie – eine Einführung in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers. Springer-Verlag, Berlin, 310 S.
- VOIGT, H.J., WIPPERMANN, TH. (1998): Geochemie (Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 6). Springer-Verlag, Heidelberg, 491 S.
- WAGEMANN, R. (1978): Some theoretical aspects of stability and solubility of inorganic arsenic in the freshwater environment. *Water Research*, 12, S. 139-145
- WALTON, J.C., BIN SHAFIQUE, S., SMITH, R.W., GUTIERREZ, N., TARQUIN, A. (1997): Role of Carbonation in Transient Leaching of Cementitious Wasteforms. *Environmental Science & Technology*, 31, S. 2345-2349
- WIENBERG, R. (1998): Eine wissenschaftliche Polemik aus Anlaß des Artikels von H. Wächter über die Ehrenrettung des Elutionstests DEV S4. *Altlasten Spektrum*, 7, S. 150-152
- WÖRNER, Th., LÖCHERER, L., WESTINER, E. (2001): Untersuchungen über das Verhalten von Recycling-Baustoffen in Tragschichten ohne Bindemittel unter längerer Verkehrsbeanspruchung. in: KRASS, K. (Hrsg.): Tagungsband zum Verbundvorhaben "Reststoffverwertung im Straßenbau" vom 27.09. 2001, Bochum, S. 161-192
- ZEIEN, H., BRÜMMER, G.W. (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 59/I, S. 505-510

## I Anhang

### I.1. Abkürzungsverzeichnis

A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
AF <sub>m</sub>	Aluminat Ferrit mono
AF <sub>t</sub>	Aluminat Ferrit tri
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BET	Brunauer, Emmet, Teller (Verfahren zur Oberflächenmessung)
C	CaO
CSH	Calciumsilicathydrat
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
FNU	Formacin Nephelometric Units (Einheit der Trübung)
H	H <sub>2</sub> O
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
ICP-MS	Induktiv gekoppeltes Plasma – Massen-Spektrometrie
ICP-OES	Induktiv gekoppeltes Plasma – Optische Atom-Emissions-Spektrometrie
KAK	Kationenaustauschkapazität
M	MgO
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
RCL	Recycling
RFA	Röntgen-Fluoreszenz-Analyse
ROS	Refraktäre organische Säuren (refractory organic substances)
S	SiO <sub>2</sub>
$\bar{S}$	SO <sub>3</sub>
SEC	Size exclusion chromatography
SNK	Säureneutralisationskapazität
XRD	Röntgen-Diffraktometrie (X-ray diffraction)

**I.2. Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Abhängigkeit der Carbonatisierungsrate von der Wassersättigung der porösen Matrix (nach VAN DER SLOOT et al. (1998)).....	11
Abbildung 2: a), b) auftretende Prozesse bei der Stofffreisetzung; c) Überlagerung von Prozessen (a) nach VAN DER SLOOT & DE GROOT (1990); b), c) nach VAN DER SLOOT et al. (1998)).....	17
Abbildung 3: Löslichkeit von Schwermetallen in Bezug auf pH- und Eh-Werte (ohne Berücksichtigung gelöster und fester organischer Substanz): a) die Löslichkeit kontrollierende wichtigste Minerale; b) tendenziell zunehmende Löslichkeit (nach FÖRSTNER (1987) in BOURG (1995)).....	19
Abbildung 4: Aufsicht der Testfelder.....	25
Abbildung 5: Querschnitt durch ein Testfeld.....	25
Abbildung 6: links: Messung von pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit und Sickerwassertemperatur; rechts: Automatische Entnahme von Wasserproben.....	26
Abbildung 7: Aufbau der Klimastation zwischen beiden Testfeldern.....	26
Abbildung 8: Aufgenommene Bilder während und nach Abschluss des Baus der Testfelder (oben links: Installation des Sammelschachtes; oben rechts: Verlegung der HDPE-Folie; unten links: Einbau der Kies-Schicht (0-32 mm $\emptyset$ ); unten rechts: Zustand der Testfelder nach Abschluss der Bauarbeiten).....	27
Abbildung 9: Schematischer Aufbau der Säulenversuchsanlage (SCHUWIRTH 2002) ....	29
Abbildung 10: Kornsummenkurven der Recycling-Baustoffe mit Körnungen 0 - 32 mm.....	35
Abbildung 11: Kornsummenkurven der Recycling-Baustoffe mit Körnungen 0 - 45 mm und 0 - 60 mm (By).....	36
Abbildung 12: Prozentuale Anteile der einzelnen Stoffgruppen in den Recycling-Baustoffen: a) optische Untersuchung nach SCHÄFER (2002), b) Zusammensetzung nach Prüfberichten.....	37
Abbildung 13: Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für die 19 Recycling-Materialien.....	38
Abbildung 14: Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für identifizierte Einzelkomponenten aus Material RCL 1.....	39
Abbildung 15: Ausgewählte Elementgehalte aus den Königswasser-Aufschlüssen für alle 19 Recycling-Materialien.....	40
Abbildung 16: Ergebnisse für pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Hauptelemente aus den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und RCL 2.....	45
Abbildung 17: Relativer Anteil an den Gesamtgehalten der jeweiligen Anionen und Kationen in [%] nach Umrechnung der Konzentrationen in [meq/l] für die Materialien RCL 1 und 2.....	47
Abbildung 18: Ergebnisse für Haupt- und Spurenelemente aus den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und RCL 2.....	48

Abbildung 19: Ergebnisse für Sickerwasserproben aus drei Zeiträumen (April/Mai, Juni und Juli 2002) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2; bei der Probenaufbereitung wurde hinsichtlich Filtration (0,45 µm) sowie Ansäuern mit HNO <sub>3</sub> unterschiedlich vorgegangen (siehe Legende) .....	52
Abbildung 20: Ergebnisse für aufgeschlossene Filtrerrückstände von Sickerwasserproben aus dem Zeitraum April/Mai 2002 aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2; nach Ansäuern ausgefallene huminstoffähnliche Substanzen aus Becken RCL 2 wurden ebenfalls aufgeschlossen.....	53
Abbildung 21: Ermittelte Korrelation und daraus abgeleitete Trübungswerte für die Sickerwässer aus den Testfeldern RCL 1 und 2 .....	54
Abbildung 22: Elementgehalte aus den Ammoniumnitrat-Extrakten für alle 19 Recycling-Materialien .....	55
Abbildung 23: Gegenüberstellung von Elementgehalten aus dem S4-Test (jeweils linke Säule) und dem Modifizierten S4-Test (jeweils rechte Säule) für alle 19 Recycling-Materialien (Materialien hier nicht genauer bezeichnet) .....	56
Abbildung 24: Chrom- und Molybdängehalte aus den Langzeitversuchen nach dem S4- (linke Hälfte) und Modifizierten S4-Verfahren (rechte Hälfte) mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2.....	57
Abbildung 25: Ausgewählte Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 mit den 19 Recycling-Materialien .....	58
Abbildung 26: Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und RCL 2.....	60
Abbildung 27: Säureneutralisationskapazität (SNK) aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den beiden Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 .....	61
Abbildung 28: Ausgewählte Ergebnisse aus den Säulenversuchen mit Testfeld-Material RCL 1 mit Darstellung gegen die Zeit (linke Hälfte) und Darstellung gegen die Abflusssumme (rechte Hälfte).....	62
Abbildung 29: Ergebnisse für Konzentrationen (linke Hälfte) und Massenanteile (rechte Hälfte) aus dem Langzeit-Standtest (Originalkorngröße) und Schüttelversuchen (fein gemahlen) bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 .....	65
Abbildung 30: Ermittelte Massenanteile aus Schüttelversuchen mit den fein gemahlene Einzelkomponenten aus Material RCL 1 .....	66
Abbildung 31: Ermittelte Massenanteile aus Schüttelversuchen nach dem S4-Verfahren mit jeweils zwei unterschiedlichen Probechargen bei Material RCL 1 und 2 zur Untersuchung der Materialheterogenität .....	67
Abbildung 32: Korrelation ermittelter Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen der 19 Recycling-Materialien .....	68
Abbildung 33: Korrelation ermittelter Elementgehalte aus Röntgen-Fluoreszenz-Analysen für identifizierte Einzelkomponenten aus Material RCL 1 .....	69
Abbildung 34: Ergebnisse aus den pH-stat Versuchen bei pH 2, 4, 6, 8 mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2.....	70

Abbildung 35: Verhältnis der aus Schüttelversuchen mit identifizierten Einzelkomponenten von Material RCL 1 und mit Material RCL 1 ermittelten Stoffgehalte zu den mit Röntgen-Fluoreszenz-Analysen ermittelten jeweiligen Gesamtgehalten.....	73
Abbildung 36: Korrelation zwischen ermittelten Mangangehalten aus dem pH-stat Versuch bei pH 4 und Gesamtgehalten aus der RFA für die 19 Recycling-Materialien (ohne Berücksichtigung von Probe BW2).....	74
Abbildung 37: Jeweiliger Anteil [%] der aus S4-Test, Ammoniumnitrat-Extrakt und pH-stat Versuch bei pH 4 ermittelten Stoffgehalte für die 19 Recycling-Materialien im Verhältnis zum Gesamtgehalt bestimmt mit der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse .....	76
Abbildung 38: Ermittelte Massenanteile aus den Schüttelversuchen mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 in unterschiedlichen Korngrößen (Wasser/Feststoff-Verhältnis 10:1, Laufzeit 192 Stunden) .....	80
Abbildung 39: Kornsummenkurven vor und nach Schüttelversuchen analog zum S4-Test mit Material RCL 1 für Versuchslaufzeiten von 48 bzw. 192 Stunden.....	81
Abbildung 40: Berechnete Oberflächen für bestimmte mittlere Korndurchmesser vor und nach Schüttelversuchen analog zum S4-Test über einen Zeitraum von 192 Stunden mit den Materialien RCL 1 und 2.....	82
Abbildung 41: Ermittelte Gehalte aus Schüttelversuchen mit den fein gemahlene Einzelkomponenten aus Material RCL 1 für die drei identifizierten Betonarten mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen .....	85
Abbildung 42: Gemessene pH-Werte beim S4-Test, Modifizierten S4-Test und Langzeit-Standtest mit den Testfeld-Materialien RCL 1 und 2.....	87
Abbildung 43: Sulfatkonzentration (linke y-Achse) und Wassertemperatur (rechte y-Achse) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 (linke Hälfte) und RCL 2 (rechte Hälfte) .....	91
Abbildung 44: Ermittelte Freisetzungsraten [mg/kg•d] aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Hauptelemente.....	93
Abbildung 45: Modellierung mit PhreeqC (PARKHURST & APPELO 2002): Vorherrschende Arsenspezies in den Sickerwässern von Becken RCL 1 und 2 bei den ermittelten Messbereichen von pH- und pE-Wert (Konzentrationswerte für die Modellierung entsprechen den Werten vom 16.01.02 für Becken RCL 1 und 2).....	94
Abbildung 46: Korrelation zwischen ermittelten Arsenkonzentrationen und pH-Werten bei den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 .....	95
Abbildung 47: Für den Konzentrationsverlauf von Arsen in Becken RCL 2 verantwortliche Prozesse .....	96
Abbildung 48: Ermittelte Freisetzungsraten [µg/kg•d] aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Arsen.....	96
Abbildung 49: Elementkonzentrationen (linke y-Achse), Wassertemperatur bzw. pH-Wert (rechte y-Achse) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 (linke Hälfte) und RCL 2 (rechte Hälfte) .....	98

---

Abbildung 50: Ermittelte Freisetzungsraten ([mg/kg•d] bzw. [µg/kg•d]) aus den Säulenversuchen mit Material RCL 1 für Spurenelemente.....	101
Abbildung 51: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen bei den Feldversuchen und Konzentrationen aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt für die Materialien RCL 1 und 2 .....	105
Abbildung 52: Vergleich aufsummierter Massenanteile aus den Feldversuchen und Massenanteilen aus der Ammoniumnitrat-Extraktion mit den Materialien RCL 1 und 2 .....	106
Abbildung 53: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen zwischen den Feldversuchen und der Kombination Langzeit-Standtest und Schüttelversuche bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen für die Materialien RCL 1 und 2 .....	107
Abbildung 54: Vergleich aufsummierter Massenanteile aus den Feldversuchen und maximal auftretender Massenanteile aus der Kombination Langzeit-Standtest und Schüttelversuche bei unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnissen für die Materialien RCL 1 und 2 .....	108
Abbildung 55: Vergleich maximal auftretender Konzentrationen zwischen dem Feldversuch und dem Säulenversuch mit Material RCL 1 (Säule 1: natürliche Beregnungsrate, 0-45 mm ø) bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,63 .....	109
Abbildung 56: Anteil an Gesamtgehalten der jeweiligen Anionen und Kationen in [%] nach Umrechnung der Konzentrationen in [meq/l] aus dem Feld- und Säulenversuch (Säule 1: natürliche Beregnungsrate, Material ungebrochen) mit Material RCL 1 .....	110
Abbildung 57: Aufsummierte Massenanteile für den Feldversuch (Becken RCL 1) sowie Säule 1 (natürliche Beregnungsrate, Originalkorngröße) und Säule 3 (erhöhte Beregnungsrate, Originalkorngröße) bezogen auf das Wasser/Feststoff-Verhältnis .....	112

### I.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische und chemische Einflussfaktoren auf das Elutionsverhalten (nach GDCH 1996, VAN DER SLOOT et al. 1998).....	5
Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Schüttel- und Säulentests (nach GDCH, 1996).....	7
Tabelle 3: Definition, Zusammensetzung und Herkunft von Bauabfällen (nach SRU 2000, TA SIEDLUNGSABFALL 1993) .....	7
Tabelle 4: Verwertung und Deponierung von Baureststoffen Anfang der 90er Jahre (nach GSF 1997).....	8
Tabelle 5: In der Zementchemie gebräuchliche Abkürzungen (TAYLOR 1997).....	9
Tabelle 6: Hauptklinkerphasen (nach STARK & WICHT 2000) .....	9
Tabelle 7: Zusammensetzung einiger Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen) (nach HENNING & KNÖFEL 1997).....	10
Tabelle 8: Salze in Mauerwerken (nach ARNOLD 1981) .....	13
Tabelle 9: Kationenaustauschkapazität (KAK) einiger Substanzen bei pH 7 und deren pH-Abhängigkeit (nach MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002).....	15
Tabelle 10: Substitutionsmöglichkeiten für Ionen in Ettringit als Mineral und synthetischer Stoff (nach GOUGAR et al. 1996).....	18
Tabelle 11: Spezies, die nachweislich durch CSH-Phasen immobilisiert werden können (nach GOUGAR et al. 1996).....	18
Tabelle 12: Spezies, in denen Arsenit und Arsenat unter anderem auftreten können (nach MATERA & LE HECHO 2001).....	20
Tabelle 13: Auftreten vorherrschender gelöster Arsenspezies bei verschiedenen pH-Werten (nach JAIN & LOEPPERT 2000).....	20
Tabelle 14: Die 19 untersuchten RCL-Baustoff-Proben.....	23
Tabelle 15: Daten zu den Säulenversuchen mit Material RCL 1 .....	30
Tabelle 16: Analysenverfahren zur Bestimmung der Hauptelemente bei Feld- und Laborversuchen .....	32
Tabelle 17: Analysenverfahren zur Bestimmung der Spurenelemente bei Feld- und Laborversuchen .....	33
Tabelle 18: Gemessene Oberflächen der 19 RCL-Materialien .....	41
Tabelle 19: Messung der Versickerungsintensität auf den Testfeldern RCL 1 und 2 ....	42
Tabelle 20: Ermittelte Werte für den werksgemischten Kiessand (0-32 mm $\varnothing$ ) nach Durchführung eines Schüttelversuches in Anlehnung an den S4-Versuch mit einer Korngröße < 2 mm .....	44
Tabelle 21: Ermittelte Konzentrationen für Schwer- und Halbmetalle aus der Niederschlagswasserprobe März 2002; die Konzentrationen der restlichen untersuchten Schwer-, Leicht- und Halbmetalle waren kleiner Bestimmungsgrenze .....	50
Tabelle 22: Kationenaustauschkapazität für die fein gemahlene Testfeld-Materialien RCL 1 und 2.....	56

---

Tabelle 23: Aus den pH-stat Versuchen bei pH 4 ermittelte Säureneutralisationskapazität (SNK) nach 4 Wochen Versuchslaufzeit für alle 19 Recycling-Materialien .....	59
Tabelle 24: Aus pH-stat Versuchen mit den fein gemahlten Testfeld-Materialien berechnete Zeitdauern, bis sich bei einem pH-Wert des Niederschlages von 5 bzw. 4 bei den Feldversuchen derselbe pH-Wert für RCL 1 und 2 einstellt ....	72
Tabelle 25: Bestimmte Kationenaustauschkapazität (nach KRAUSE et al. 1993) und addierte Gehalte an Na, K, Ca, Ba aus dem Ammoniumnitrat-Extrakt für die Testfeld-Materialien RCL 1 und 2.....	78
Tabelle 26: Zunahme aufsummierter Massenanteile beim Feldversuch mit Material RCL 1 vom Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,63 bis 1,17 .....	114

## I.4. Daten

## Charakterisierung der Recycling-Materialien: Siebanalysen (SCHÄFER 2002)

Probe:	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP
Durchmesser [mm]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]
100,00							
63,00	100,0	100,0			100,0	100,0	100,0
31,50	76,0	89,5	100,0	100,0	97,8	79,8	82,1
16,00	54,8	68,6	73,8	75,1	68,6	54,3	58,1
8,00	37,0	49,1	53,3	55,7	46,0	31,2	41,1
4,00	27,6	34,7	44,5	40,1	34,3	22,3	30,1
2,00	22,1	26,3	38,6	32,0	28,2	18,1	23,3
1,00	17,6	20,2	32,7	24,6	23,2	14,8	17,8
0,50	11,3	13,2	23,4	15,1	15,8	10,5	11,7
0,25	5,8	6,6	12,0	6,8	7,5	5,9	6,0
0,125	3,6	3,7	5,7	3,3	3,3	2,6	3,0
0,063	2,3	2,1	3,3	1,7	1,6	1,4	1,7
<0,063	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Probe:	SI	BW 1	BW 2	BI 1	Bb 1	Bb 2	BI 2
Durchmesser [mm]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]
100,00							
63,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,50	89,5	86,4	82,0	94,2	65,8	87,5	86,5
16,00	57,1	52,0	49,9	75,3	45,1	55,8	70,8
8,00	43,7	20,2	26,2	59,8	32,2	36,2	54,6
4,00	32,2	10,9	16,3	50,0	26,4	24,7	42,3
2,00	24,4	8,4	11,0	43,1	20,7	18,9	33,3
1,00	18,8	6,7	7,5	37,1	15,6	14,9	26,1
0,50	13,1	4,6	4,5	29,5	9,7	10,7	18,5
0,25	6,8	2,5	2,4	18,2	4,3	6,5	10,5
0,125	3,2	1,2	1,3	5,9	1,7	3,5	4,7
0,063	1,6	0,6	0,6	2,5	0,7	1,7	1,9
<0,063	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0
Probe:	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By		
Durchmesser [mm]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]	Summe d. Massenanteile [%]		
100,00					100,0		
63,00	100,0	100,0	100,0	100,0	95,3		
31,50	96,2	99,2	82,6	89,6	74,0		
16,00	77,7	90,4	55,9	68,4	43,6		
8,00	51,5	76,1	37,0	47,5	25,8		
4,00	34,0	61,1	25,6	32,8	18,1		
2,00	23,4	47,1	20,4	23,8	14,6		
1,00	15,6	34,2	16,1	17,3	11,6		
0,50	8,4	19,6	11,1	10,8	7,9		
0,25	4,6	8,7	5,7	5,7	4,3		
0,125	2,8	4,0	3,5	3,3	2,5		
0,063	1,9	1,8	1,3	1,9	1,6		
<0,063	0,7	0,1	0,0	0,0	0,3		

**Charakterisierung der Recycling-Materialien: Stoffliche Zusammensetzung**

- = nicht nachweisbar; k.A. = keine Angabe

Probe	Stoffliche Zusammensetzung [Massen-%] nach SCHÄFER (2002)							
	Betonbruch	Asphalt	Schlacke	Naturstein	Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	Kalksandstein, weich gebrannte Ziegel, Putze u.ä. Stoffe	Min. Leicht- und Dämm- baustoffe	sonstige Stoffe (Holz, Kunststoffe, Papier etc.)
RCL 1	59,3	6,1	0,2	22,0	7,0	4,5	0,6	0,3
RCL 2	74,3	0,9	-	16,1	5,7	2,3	0,6	0,2
SH	67,2	-	2,5	27,0	0,7	1,6	1,1	0,0
HH 1	92,7	-	-	5,3	-	1,2		0,2
HH 2	33,0	-	-	59,7	2,3	4,7	0,1	0,1
NW 1	67,0	1,5	1,5	20,8	6,0	2,6	0,5	0,2
RP	74,6	9,5	-	12,6	1,6	1,3	0,3	0,1
SI	80,7	3,8	-	8,4	1,1	5,9	-	-
BW 1	72,5	-	-	27,3	0,2	-	-	0,0
BW 2	10,6	4,0	-	6,8	51,3	26,9	0,2	0,1
Bb 1	58,0	0,4	-	36,0	-	5,0	0,7	0,0
Bb 2	19,4	-	0,1	1,7	36,7	41,7	0,1	0,3
BI 1	64,5	2,0	2,2	18,7	5,4	4,2	2,7	0,1
BI 2	72,9	1,1	0,9	17,7	0,5	5,7	1,1	-
SA 1	79,1	1,1	0,3	12,6	1,3	2,8	2,7	-
SA 2	88,7	0,4	-	10,3	0,6	-	-	-
Hs	68,7	0,9	-	20,4	-	3,9	5,9	0,0
Sa	88,9	-	0,8	7,9	-	2,3	-	0,0
By	60,6	1,6	-	18,5	9,9	2,0	7,3	-

Probe	Stoffliche Zusammensetzung [Massen-%] nach Prüfberichten (BERNSEE (2003))							
	Betonbruch	Asphalt	Schlacke	Naturstein	Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	Kalksandstein, weich gebrannte Ziegel, Putze u.ä. Stoffe	Min. Leicht- und Dämm- baustoffe	sonstige Stoffe (Holz, Kunststoffe, Papier etc.)
RCL 1	38,4	9,0	0,2	44,2	3,8	2,9	1,4	0,1
RCL 2	40,1	11,7	0,9	38,3	5,0	3,2	n.n	0,8
SH	58,5	14,6	0,2	25,2	0,0	1,5	0,0	0,0
HH 1	81,7	0,5		16,3	1,4	0,0	0,0	0,1
HH 2	25,4	13,7		3,8	1,2	55,8		0,1
NW 1	56,1	6,1	0,5	33,0	2,1	1,7	0,4	0,1
RP	45,5	20,6	0,0	26,0	4,2	3,1	0,4	0,2
SI	84,7	0,1	0,2	11,5	2,3	0,9	0,2	0,1
BW 1	63,9	k.A.	28,6	7,4	0,1	k.A.	k.A.	k.A.
BW 2	60,6	4,3	k.A.	5,7	24,5	4,9	k.A.	k.A.
Bb 1	58,2	0,0	k.A.	17,0	k.A.	20,0	4,8	0,0
Bb 2	k.A.	k.A.	k.A.	6,6	k.A.	93,4	k.A.	k.A.
BI 1	67,3	4,7	0,2	15,0	12,8	k.A.	k.A.	0,0
BI 2	64,7	2,9	k.A.	25,1	2,3	4,8	0,0	0,2
SA 1	86,0	0,1	k.A.	5,5	6,9	1,5	k.A.	0,0
SA 2	90,8	0,9	k.A.	5,6	1,4	1,3	k.A.	0,0
Hs	36,2	34,5	k.A.	25,7	2,4	1,1	0,0	0,1
Sa	92,5	0,0	0,0	7,3	0,2	0,0	0,0	0,0
By	61,0	k.A.	k.A.	24,5	7,1	k.A.	k.A.	k.A.

**Charakterisierung der Recycling-Materialien: Röntgen-Fluoreszenz-Analysen**

Probe	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2
Si [g/kg]	339,0	330,9	346,8	333,3	361,5	302,1	297,0	283,1	338,0	222,4
Al [g/kg]	16,2	16,4	17,4	13,4	17,4	16,6	18,3	22,5	12,4	27,1
Fe [g/kg]	10,2	10,4	7,8	5,4	7,5	11,3	10,6	7,7	3,9	7,3
Mn [g/kg]	0,7	0,7	0,4	0,3	0,3	0,7	0,5	2,1	0,2	3,1
Mg [g/kg]	9,1	8,1	3,2	3,8	4,0	6,6	11,8	11,2	3,3	8,6
Ca [g/kg]	55,7	61,4	47,9	80,7	34,7	86,5	81,7	112,4	79,6	155,7
Na [g/kg]	2,7	2,5	5,2	3,1	4,2	1,6	4,1	3,2	2,9	2,0
K [g/kg]	5,2	5,2	6,8	5,4	8,0	5,4	6,4	6,7	6,6	4,9
Ba [mg/kg]	331,0	359,0	422,5	323,5	460,5	273,0	360,0	425,0	214,0	340,0
Zn [mg/kg]	73,5	131,5	62,0	117,5	93,5	115,0	53,0	70,0	22,0	115,0
Co [mg/kg]	148,0	115,5	125,0	86,0	189,5	116,5	109,0	78,5	69,5	44,5
Cr [mg/kg]	85,0	85,0	20,5	38,5	26,5	77,0	72,5	75,0	19,5	62,0
Pb [mg/kg]	24,0	28,5	22,0	23,3	41,0	40,0	28,8	17,3	12,0	28,0
Ni [mg/kg]	35,0	34,5	10,5	12,0	12,0	36,0	37,5	16,0	11,5	17,5
Cu [mg/kg]	16,5	15,5	41,5	18,5	26,5	14,0	12,0	0,0	8,5	33,0
As [mg/kg]	5,0	5,5	2,0	2,0	4,0	6,0	7,0	7,0	5,0	19,0
Sn [mg/kg]	3,5	4,0	21,5	3,5	6,5	4,5	2,5	3,0	3,0	7,0
Cd [mg/kg]	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0
Sb [mg/kg]	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Probe	Bb 1	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
Si [g/kg]	350,2	361,0	317,5	305,1	356,7	351,5	320,1	341,8	211,8
Al [g/kg]	16,6	22,5	17,6	17,6	13,3	12,4	17,0	15,1	9,9
Fe [g/kg]	6,8	9,4	9,3	8,7	5,2	4,7	12,5	7,1	5,8
Mn [g/kg]	0,4	0,3	0,6	0,5	0,5	0,3	0,5	0,9	0,4
Mg [g/kg]	5,2	4,7	7,5	7,4	4,3	3,0	11,7	8,6	19,5
Ca [g/kg]	52,3	31,5	80,4	86,7	60,8	70,5	68,3	64,4	170,1
Na [g/kg]	3,9	1,3	3,1	4,2	2,1	2,7	3,6	2,7	1,2
K [g/kg]	6,4	7,2	6,9	7,1	6,1	6,7	6,1	6,2	3,6
Ba [mg/kg]	572,0	377,5	463,5	485,5	378,0	323,0	366,5	556,5	189,5
Zn [mg/kg]	2146,0	51,0	148,5	71,5	36,0	53,5	53,0	68,5	57,5
Co [mg/kg]	81,5	162,0	66,0	76,0	86,5	98,5	116,5	106,0	34,5
Cr [mg/kg]	33,5	59,5	64,0	46,0	26,5	28,5	83,5	57,0	39,5
Pb [mg/kg]	36,0	129,3	368,0	22,8	11,8	12,0	15,8	33,5	25,3
Ni [mg/kg]	13,0	21,5	23,5	23,5	11,0	9,0	45,0	25,0	16,5
Cu [mg/kg]	40,5	12,0	18,0	13,0	12,0	24,5	14,0	14,0	8,5
As [mg/kg]	7,0	7,0	13,5	9,5	4,0	4,0	6,0	6,0	3,0
Sn [mg/kg]	5,0	4,5	62,5	4,5	4,0	5,0	2,5	3,5	3,0
Cd [mg/kg]	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5	0,5
Sb [mg/kg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

**Charakterisierung der Recycling-Materialien: Königswasser-Aufschluss (SCHÄFER 2002)**

n.n. = nicht nachweisbar

Probe	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
Sn [mg/kg]	n.n.	1,0	12,3	n.n.	1,3	n.n.	n.n.	n.n.	1,0	3,0	n.n.
As [mg/kg]	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	3,7	14,3	4,6
Se [mg/kg]	3,0	3,0	2,3	4,0	n.n.	n.n.	3,0	0,7	0,3	n.n.	1,3
Mo [mg/kg]	0,3	1,0	2,0	0,7	3,0	n.n.	0,7	0,3	n.n.	n.n.	n.n.
Sb [mg/kg]	n.n.	1,3	0,7	n.n.	2,0	n.n.	1,3	n.n.	1,0	n.n.	n.n.
Zn [mg/kg]	50,8	96,0	45,2	151,1	30,5	76,5	38,3	52,3	16,6	74,1	2227,3
Pb [mg/kg]	9,6	11,3	11,6	9,3	14,6	22,2	14,5	2,0	1,3	6,0	15,8
Co [mg/kg]	119,5	94,7	98,1	71,2	158,9	95,0	88,1	64,2	55,2	32,2	65,9
Ni [mg/kg]	26,6	21,9	7,0	7,3	4,6	26,8	27,7	6,0	7,7	8,0	8,6
Si [mg/kg]	233,0	180,4	198,8	198,1	91,0	220,1	165,3	257,8	148,4	189,7	227,7
Mn [mg/kg]	534,4	458,4	235,3	232,7	199,3	529,6	326,0	1965,6	172,0	2930,2	359,1
Fe [mg/kg]	16664	16276	12731	8688	11420	19133	16232	12872	6789	11163	12224
Cr [mg/kg]	28,9	28,2	11,0	18,0	8,6	25,8	31,0	44,7	10,6	29,2	16,5
Cu [mg/kg]	14,3	12,0	33,6	15,6	21,2	9,3	11,5	6,6	6,3	57,5	29,3
Al [mg/kg]	14241	11759	6980	8821	8606	14730	14516	22535	9817	19369	17463

Probe	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
Sn [mg/kg]	1,7	1,7	1,3	n.n.	1,7	n.n.	n.n.	n.n.
As [mg/kg]	0,7	6,0	6,6	1,7	2,3	n.n.	n.n.	1,3
Se [mg/kg]	n.n.	1,0	1,3	1,3	1,0	1,3	3,0	1,0
Mo [mg/kg]	n.n.	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	0,7	n.n.	n.n.
Sb [mg/kg]	n.n.	0,7	n.n.	4,7	3,6	n.n.	1,7	2,6
Zn [mg/kg]	24,5	132,0	54,7	24,3	38,9	54,9	54,7	39,5
Pb [mg/kg]	93,6	66,0	7,0	n.n.	n.n.	4,3	17,3	10,1
Co [mg/kg]	128,6	53,4	62,7	65,3	77,2	93,3	85,0	26,9
Ni [mg/kg]	7,3	15,6	15,9	5,0	5,6	31,8	17,7	10,0
Si [mg/kg]	166,6	192,0	192,4	203,3	180,2	196,2	221,0	324,8
Mn [mg/kg]	182,1	530,0	453,4	383,0	210,6	341,7	599,9	281,2
Fe [mg/kg]	9455	15522	15456	8700	8185	20476	12665	8480
Cr [mg/kg]	15,9	26,2	22,9	12,7	14,9	38,0	27,0	16,3
Cu [mg/kg]	5,0	14,9	13,6	5,7	20,1	12,9	11,7	18,6
Al [mg/kg]	14843	21360	20564	13067	12013	14853	11931	10552

**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
11.10.00	100,9			06.12.00	109,7	4399,4	0,13
12.10.00	55,8	156,7	0,00	07.12.00	138,5	4537,9	0,13
13.10.00	41,7	198,4	0,01	08.12.00	112	4649,9	0,13
14.10.00	32,9	231,3	0,01	09.12.00	73,9	4723,8	0,13
15.10.00	27	258,3	0,01	10.12.00	54,3	4778,1	0,14
16.10.00	22,7	281	0,01	11.12.00	48,7	4826,8	0,14
17.10.00	19,6	300,6	0,01	12.12.00	39,3	4866,1	0,14
18.10.00	58,9	359,5	0,01	13.12.00		4866,1	0,14
19.10.00	63,1	422,6	0,01	14.12.00		4866,1	0,14
20.10.00	51,3	473,9	0,01	15.12.00		4866,1	0,14
21.10.00	43,7	517,6	0,01	16.12.00		4866,1	0,14
22.10.00	37,5	555,1	0,02	17.12.00		4866,1	0,14
23.10.00	57,9	613	0,02	18.12.00	19,2	4885,3	0,14
24.10.00	49,9	662,9	0,02	19.12.00	38,4	4923,7	0,14
25.10.00	51,5	714,4	0,02	20.12.00	32,2	4955,9	0,14
26.10.00	78,7	793,1	0,02	21.12.00	27,7	4983,6	0,14
27.10.00	301,1	1094,2	0,03	22.12.00	24,5	5008,1	0,14
28.10.00	355,2	1449,4	0,04	23.12.00	21,7	5029,8	0,14
29.10.00	330,8	1780,2	0,05	24.12.00	19,7	5049,5	0,14
30.10.00	167,1	1947,3	0,06	25.12.00	18,1	5067,6	0,14
31.10.00	68,9	2016,2	0,06	26.12.00	16,7	5084,3	0,14
01.11.00	127,5	2143,7	0,06	27.12.00	16,4	5100,7	0,15
02.11.00	97,3	2241	0,06	28.12.00	20,9	5121,6	0,15
03.11.00	97,3	2338,3	0,07	29.12.00	26,1	5147,7	0,15
04.11.00	135,9	2474,2	0,07	30.12.00	27	5174,7	0,15
05.11.00	97,4	2571,6	0,07	31.12.00	25,9	5200,6	0,15
06.11.00	70,1	2641,7	0,08	01.01.01	48,1	5248,7	0,15
07.11.00	77,9	2719,6	0,08	02.01.01	92,3	5341	0,15
08.11.00	68,7	2788,3	0,08	03.01.01	74,2	5415,2	0,15
09.11.00	40,5	2828,8	0,08	04.01.01	235,8	5651	0,16
10.11.00	42	2870,8	0,08	05.01.01	465,3	6116,3	0,17
11.11.00	61,1	2931,9	0,08	06.01.01	391	6507,3	0,19
12.11.00	35,8	2967,7	0,08	07.01.01	83	6590,3	0,19
13.11.00	31,5	2999,2	0,09	08.01.01	54,4	6644,7	0,19
14.11.00	28,9	3028,1	0,09	09.01.01	42	6686,7	0,19
15.11.00	28,2	3056,3	0,09	10.01.01	89,4	6776,1	0,19
16.11.00	27,8	3084,1	0,09	11.01.01	153,4	6929,5	0,20
17.11.00	26,8	3110,9	0,09	12.01.01	70,4	6999,9	0,20
18.11.00	25,7	3136,6	0,09	13.01.01	55,2	7055,1	0,20
19.11.00	24,6	3161,2	0,09	14.01.01	36,4	7091,5	0,20
20.11.00	24,6	3185,8	0,09	15.01.01	35,6	7127,1	0,20
21.11.00	25,1	3210,9	0,09	16.01.01	23	7150,1	0,20
22.11.00	84,9	3295,8	0,09	17.01.01	21,2	7171,3	0,20
23.11.00	146,6	3442,4	0,10	18.01.01	19,3	7190,6	0,21
24.11.00	118,5	3560,9	0,10	19.01.01	17,9	7208,5	0,21
25.11.00	74,9	3635,8	0,10	20.01.01	15,2	7223,7	0,21
26.11.00	56,9	3692,7	0,11	21.01.01	81,4	7305,1	0,21
27.11.00	69,8	3762,5	0,11	22.01.01	278,8	7583,9	0,22
28.11.00	160,3	3922,8	0,11	23.01.01	188,2	7772,1	0,22
29.11.00	89,9	4012,7	0,11	24.01.01	132,6	7904,7	0,23
30.11.00	61,6	4074,3	0,12	25.01.01	93	7997,7	0,23
01.12.00	47,5	4121,8	0,12	26.01.01	145	8142,7	0,23
02.12.00	44,6	4166,4	0,12	27.01.01	283,6	8426,3	0,24
03.12.00	45,5	4211,9	0,12	28.01.01	106,6	8532,9	0,24
04.12.00	42	4253,9	0,12	29.01.01	60,4	8593,3	0,25
05.12.00	35,8	4289,7	0,12	30.01.01	52,4	8645,7	0,25

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
31.01.01	35,1	8680,8	0,25	29.03.01	33,6	13287	0,38
01.02.01	29,3	8710,1	0,25	30.03.01	27,8	13314,8	0,38
02.02.01	24,4	8734,5	0,25	31.03.01	24	13338,8	0,38
03.02.01	295,8	9030,3	0,26	01.04.01	21,9	13360,7	0,38
04.02.01	343,7	9374	0,27	02.04.01	19,9	13380,6	0,38
05.02.01	273,6	9647,6	0,28	03.04.01	19	13399,6	0,38
06.02.01	100,1	9747,7	0,28	04.04.01	17,9	13417,5	0,38
07.02.01	121	9868,7	0,28	05.04.01	16,5	13434	0,38
08.02.01	135,3	10004	0,29	06.04.01	15,4	13449,4	0,38
09.02.01	69,7	10073,7	0,29	07.04.01	14,5	13463,9	0,38
10.02.01	46,1	10119,8	0,29	08.04.01	14	13477,9	0,38
11.02.01	31,8	10151,6	0,29	09.04.01	14,1	13492	0,38
12.02.01	36,1	10187,7	0,29	10.04.01	16,8	13508,8	0,39
13.02.01	68,9	10256,6	0,29	11.04.01	26,6	13535,4	0,39
14.02.01	64,1	10320,7	0,29	12.04.01	32,5	13567,9	0,39
15.02.01	49,2	10369,9	0,30	13.04.01	30,4	13598,3	0,39
16.02.01	35,1	10405	0,30	14.04.01	172,6	13770,9	0,39
17.02.01	42,3	10447,3	0,30	15.04.01	219,9	13990,8	0,40
18.02.01	50,8	10498,1	0,30	16.04.01	112,1	14102,9	0,40
19.02.01	43,3	10541,4	0,30	17.04.01	70,8	14173,7	0,40
20.02.01	38	10579,4	0,30	18.04.01	68	14241,7	0,41
21.02.01	35,9	10615,3	0,30	19.04.01	96,9	14338,6	0,41
22.02.01	73	10688,3	0,30	20.04.01	92,4	14431	0,41
23.02.01	81,6	10769,9	0,31	21.04.01	63,1	14494,1	0,41
24.02.01	77	10846,9	0,31	22.04.01	46,1	14540,2	0,41
25.02.01	70,5	10917,4	0,31	23.04.01	36,1	14576,3	0,42
26.02.01	73,9	10991,3	0,31	24.04.01	30,8	14607,1	0,42
27.02.01	69,9	11061,2	0,32	25.04.01	75	14682,1	0,42
28.02.01	54,1	11115,3	0,32	26.04.01	80,6	14762,7	0,42
01.03.01	40,7	11156	0,32	27.04.01	214,9	14977,6	0,43
02.03.01	34,5	11190,5	0,32	28.04.01	154,4	15132	0,43
03.03.01	28,9	11219,4	0,32	29.04.01	79,8	15211,8	0,43
04.03.01	24,4	11243,8	0,32	30.04.01	66	15277,8	0,44
05.03.01	21,5	11265,3	0,32	01.05.01	56,8	15334,6	0,44
06.03.01	25,2	11290,5	0,32	02.05.01	46,3	15380,9	0,44
07.03.01	18,5	11309	0,32	03.05.01	38,1	15419	0,44
08.03.01	17,3	11326,3	0,32	04.05.01	31,6	15450,6	0,44
09.03.01	15,9	11342,2	0,32	05.05.01	26,3	15476,9	0,44
10.03.01	14,5	11356,7	0,32	06.05.01	19,5	15496,4	0,44
11.03.01	34	11390,7	0,32	07.05.01	16,8	15513,2	0,44
12.03.01	80	11470,7	0,33	08.05.01	18,2	15531,4	0,44
13.03.01	65	11535,7	0,33	09.05.01	17,1	15548,5	0,44
14.03.01	50,1	11585,8	0,33	10.05.01	16,4	15564,9	0,44
15.03.01	42,9	11628,7	0,33	11.05.01	15,7	15580,6	0,44
16.03.01	41,6	11670,3	0,33	12.05.01	15,4	15596	0,44
17.03.01	40,6	11710,9	0,33	13.05.01	15	15611	0,45
18.03.01	44,7	11755,6	0,34	14.05.01	14,4	15625,4	0,45
19.03.01	78,4	11834	0,34	15.05.01	13,8	15639,2	0,45
20.03.01	67,7	11901,7	0,34	16.05.01	13,6	15652,8	0,45
21.03.01	183,8	12085,5	0,34	17.05.01	15,1	15667,9	0,45
22.03.01	161,1	12246,6	0,35	18.05.01	16,1	15684	0,45
23.03.01	111,3	12357,9	0,35	19.05.01	16,4	15700,4	0,45
24.03.01	402,4	12760,3	0,36	20.05.01	16,2	15716,6	0,45
25.03.01	299,9	13060,2	0,37	21.05.01	16,2	15732,8	0,45
26.03.01	91,9	13152,1	0,38	22.05.01	15,9	15748,7	0,45
27.03.01	58,3	13210,4	0,38	23.05.01	15,5	15764,2	0,45
28.03.01	43	13253,4	0,38	24.05.01	15,1	15779,3	0,45

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
25.05.01	14,9	15794,2	0,45	20.07.01	82	18342,3	0,52
26.05.01	14,8	15809	0,45	21.07.01	61,8	18404,1	0,52
27.05.01	14,6	15823,6	0,45	22.07.01	46,4	18450,5	0,53
28.05.01	14,2	15837,8	0,45	23.07.01	38,1	18488,6	0,53
29.05.01	13,9	15851,7	0,45	24.07.01	32,9	18521,5	0,53
30.05.01	13,6	15865,3	0,45	25.07.01	29,6	18551,1	0,53
31.05.01	13,3	15878,6	0,45	26.07.01	26,9	18578	0,53
01.06.01	12,7	15891,3	0,45	27.07.01	24,7	18602,7	0,53
02.06.01	12,4	15903,7	0,45	28.07.01	22,6	18625,3	0,53
03.06.01	14,8	15918,5	0,45	29.07.01	20,8	18646,1	0,53
04.06.01	17,8	15936,3	0,45	30.07.01	19,3	18665,4	0,53
05.06.01	20,9	15957,2	0,45	31.07.01	18,1	18683,5	0,53
06.06.01	18,6	15975,8	0,46	01.08.01	17,2	18700,7	0,53
07.06.01	18,6	15994,4	0,46	02.08.01	16,3	18717	0,53
08.06.01	17,7	16012,1	0,46	03.08.01	15,2	18732,2	0,53
09.06.01	16,7	16028,8	0,46	04.08.01	14,2	18746,4	0,53
10.06.01	30	16058,8	0,46	05.08.01	13,2	18759,6	0,53
11.06.01	99,1	16157,9	0,46	06.08.01	12,2	18771,8	0,54
12.06.01	59,1	16217	0,46	07.08.01	12	18783,8	0,54
13.06.01	41,9	16258,9	0,46	08.08.01	20	18803,8	0,54
14.06.01	33,9	16292,8	0,46	09.08.01	23,3	18827,1	0,54
15.06.01	29,6	16322,4	0,47	10.08.01	23,4	18850,5	0,54
16.06.01	26,5	16348,9	0,47	11.08.01	21,9	18872,4	0,54
17.06.01	80,6	16429,5	0,47	12.08.01	20,5	18892,9	0,54
18.06.01	203,3	16632,8	0,47	13.08.01	18,9	18911,8	0,54
19.06.01	73,9	16706,7	0,48	14.08.01	17,5	18929,3	0,54
20.06.01	48,8	16755,5	0,48	15.08.01	16,7	18946	0,54
21.06.01	38,3	16793,8	0,48	16.08.01	15,5	18961,5	0,54
22.06.01	31,9	16825,7	0,48	17.08.01	14,3	18975,8	0,54
23.06.01	27,9	16853,6	0,48	18.08.01	13,3	18989,1	0,54
24.06.01	25,5	16879,1	0,48	19.08.01	12,5	19001,6	0,54
25.06.01	23,9	16903	0,48	20.08.01	11,9	19013,5	0,54
26.06.01	24,7	16927,7	0,48	21.08.01	11,4	19024,9	0,54
27.06.01	140,9	17068,6	0,49	22.08.01	11,2	19036,1	0,54
28.06.01	73,4	17142	0,49	23.08.01	10,8	19046,9	0,54
29.06.01	70,1	17212,1	0,49	24.08.01	10,5	19057,4	0,54
30.06.01	228,1	17440,2	0,50	25.08.01	10,3	19067,7	0,54
01.07.01	83,9	17524,1	0,50	26.08.01	10,2	19077,9	0,54
02.07.01	53,5	17577,6	0,50	27.08.01	9,6	19087,5	0,54
03.07.01	41,1	17618,7	0,50	28.08.01	8,8	19096,3	0,54
04.07.01	28,5	17647,2	0,50	29.08.01	8,2	19104,5	0,54
05.07.01	30,4	17677,6	0,50	30.08.01	7,6	19112,1	0,54
06.07.01	27,8	17705,4	0,50	31.08.01	7,1	19119,2	0,55
07.07.01	25,3	17730,7	0,51	01.09.01	6,6	19125,8	0,55
08.07.01	22,6	17753,3	0,51	02.09.01	10,7	19136,5	0,55
09.07.01	20,1	17773,4	0,51	03.09.01	391,2	19527,7	0,56
10.07.01	18,3	17791,7	0,51	04.09.01	172,7	19700,4	0,56
11.07.01	16,8	17808,5	0,51	05.09.01	143,1	19843,5	0,57
12.07.01	15,6	17824,1	0,51	06.09.01	148,6	19992,1	0,57
13.07.01	42,6	17866,7	0,51	07.09.01	99,2	20091,3	0,57
14.07.01	98,2	17964,9	0,51	08.09.01	118,8	20210,1	0,58
15.07.01	75,2	18040,1	0,51	09.09.01	63,3	20273,4	0,58
16.07.01	51,8	18091,9	0,52	10.09.01	43,8	20317,2	0,58
17.07.01	43,8	18135,7	0,52	11.09.01	334,8	20652	0,59
18.07.01	38,1	18173,8	0,52	12.09.01	175,8	20827,8	0,59
19.07.01	86,5	18260,3	0,52	13.09.01	202	21029,8	0,60

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
14.09.01	109,6	21139,4	0,60	09.11.01	86,5	24588,1	0,70
15.09.01	85,6	21225	0,61	10.11.01	48,2	24636,3	0,70
16.09.01	112,9	21337,9	0,61	11.11.01	33,5	24669,8	0,70
17.09.01	73,7	21411,6	0,61	12.11.01	28,4	24698,2	0,70
18.09.01	61,2	21472,8	0,61	13.11.01	44,3	24742,5	0,71
19.09.01	392,7	21865,5	0,62	14.11.01	42,5	24785	0,71
20.09.01	257,7	22123,2	0,63	15.11.01	32	24817	0,71
21.09.01	85,2	22208,4	0,63	16.11.01	25,2	24842,2	0,71
22.09.01	58,9	22267,3	0,63	17.11.01	21,2	24863,4	0,71
23.09.01	55,3	22322,6	0,64	18.11.01	18,2	24881,6	0,71
24.09.01	45,9	22368,5	0,64	19.11.01	15,7	24897,3	0,71
25.09.01	35,7	22404,2	0,64	20.11.01	14	24911,3	0,71
26.09.01	31	22435,2	0,64	21.11.01	20,7	24932	0,71
27.09.01	31	22466,2	0,64	22.11.01	105,9	25037,9	0,71
28.09.01	35,5	22501,7	0,64	23.11.01	67,1	25105	0,72
29.09.01	32,8	22534,5	0,64	24.11.01	87,8	25192,8	0,72
30.09.01	74,1	22608,6	0,64	25.11.01	353,4	25546,2	0,73
01.10.01	150,3	22758,9	0,65	26.11.01	180,8	25727	0,73
02.10.01	128,7	22887,6	0,65	27.11.01	147,7	25874,7	0,74
03.10.01	123	23010,6	0,66	28.11.01	193,8	26068,5	0,74
04.10.01	59,4	23070	0,66	29.11.01	960,8	27029,3	0,77
05.10.01	39,7	23109,7	0,66	30.11.01	605,3	27634,6	0,79
06.10.01	31,2	23140,9	0,66	01.12.01	211,7	27846,3	0,79
07.10.01	25,3	23166,2	0,66	02.12.01	90,1	27936,4	0,80
08.10.01	21,6	23187,8	0,66	03.12.01	52,5	27988,9	0,80
09.10.01	17,2	23205	0,66	04.12.01	40	28028,9	0,80
10.10.01	16,8	23221,8	0,66	05.12.01	40,1	28069	0,80
11.10.01	15,2	23237	0,66	06.12.01	38,6	28107,6	0,80
12.10.01	14,1	23251,1	0,66	07.12.01	33,9	28141,5	0,80
13.10.01	13	23264,1	0,66	08.12.01	27,3	28168,8	0,80
14.10.01	12,2	23276,3	0,66	09.12.01	22,1	28190,9	0,80
15.10.01	11,5	23287,8	0,66	10.12.01	18,4	28209,3	0,80
16.10.01	10,8	23298,6	0,66	11.12.01	15,7	28225	0,80
17.10.01	10,2	23308,8	0,66	12.12.01	13,7	28238,7	0,81
18.10.01	9,7	23318,5	0,66	13.12.01	12,1	28250,8	0,81
19.10.01	9,3	23327,8	0,67	14.12.01	10,8	28261,6	0,81
20.10.01	8,8	23336,6	0,67	15.12.01	9,5	28271,1	0,81
21.10.01	8,4	23345	0,67	16.12.01	8	28279,1	0,81
22.10.01	8,6	23353,6	0,67	17.12.01	7,6	28286,7	0,81
23.10.01	10,7	23364,3	0,67	18.12.01	7,4	28294,1	0,81
24.10.01	17,7	23382	0,67	19.12.01	7	28301,1	0,81
25.10.01	39,2	23421,2	0,67	20.12.01	7	28308,1	0,81
26.10.01	40,9	23462,1	0,67	21.12.01	161,5	28469,6	0,81
27.10.01	189,9	23652	0,67	22.12.01	102,6	28572,2	0,81
28.10.01	156,4	23808,4	0,68	23.12.01	58,9	28631,1	0,82
29.10.01	60,5	23868,9	0,68	24.12.01	162,7	28793,8	0,82
30.10.01	40,1	23909	0,68	25.12.01	214,2	29008	0,83
31.10.01	30,3	23939,3	0,68	26.12.01	102,4	29110,4	0,83
01.11.01	24,4	23963,7	0,68	27.12.01	129	29239,4	0,83
02.11.01	20,5	23984,2	0,68	28.12.01	138	29377,4	0,84
03.11.01	17,7	24001,9	0,68	29.12.01	79,9	29457,3	0,84
04.11.01	15,3	24017,2	0,68	30.12.01	61,5	29518,8	0,84
05.11.01	13,9	24031,1	0,69	31.12.01	42,5	29561,3	0,84
06.11.01	13,1	24044,2	0,69	01.01.02	31,8	29593,1	0,84
07.11.01	238,1	24282,3	0,69	02.01.02	24,8	29617,9	0,84
08.11.01	219,3	24501,6	0,70	03.01.02	20,2	29638,1	0,85

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
04.01.02	16,9	29655	0,85	01.03.02	35,6	34877,1	0,99
05.01.02	14,6	29669,6	0,85	02.03.02	28,9	34906	1,00
06.01.02	13	29682,6	0,85	03.03.02	25,3	34931,3	1,00
07.01.02	11,7	29694,3	0,85	04.03.02	22,6	34953,9	1,00
08.01.02	10,2	29704,5	0,85	05.03.02	20,5	34974,4	1,00
09.01.02	9,2	29713,7	0,85	06.03.02	18,2	34992,6	1,00
10.01.02	8,4	29722,1	0,85	07.03.02	15,7	35008,3	1,00
11.01.02	8,5	29730,6	0,85	08.03.02	14,7	35023	1,00
12.01.02	8	29738,6	0,85	09.03.02	13,1	35036,1	1,00
13.01.02	8,6	29747,2	0,85	10.03.02	11,8	35047,9	1,00
14.01.02	9,2	29756,4	0,85	11.03.02	10,6	35058,5	1,00
15.01.02	9,3	29765,7	0,85	12.03.02	10,8	35069,3	1,00
16.01.02	9,9	29775,6	0,85	13.03.02	13,2	35082,5	1,00
17.01.02	11,7	29787,3	0,85	14.03.02	70,9	35153,4	1,00
18.01.02	26,6	29813,9	0,85	15.03.02	80,9	35234,3	1,00
19.01.02	51,7	29865,6	0,85	16.03.02	48,6	35282,9	1,01
20.01.02	106,7	29972,3	0,85	17.03.02	34,1	35317	1,01
21.01.02	69,8	30042,1	0,86	18.03.02	38,7	35355,7	1,01
22.01.02	63	30105,1	0,86	19.03.02	122,8	35478,5	1,01
23.01.02	91,9	30197	0,86	20.03.02	369,9	35848,4	1,02
24.01.02	70,6	30267,6	0,86	21.03.02	117,6	35966	1,03
25.01.02	47,3	30314,9	0,86	22.03.02	90,4	36056,4	1,03
26.01.02	328,9	30643,8	0,87	23.03.02	60	36116,4	1,03
27.01.02	274,2	30918	0,88	24.03.02	32,8	36149,2	1,03
28.01.02	129,8	31047,8	0,89	25.03.02	27,8	36177	1,03
29.01.02	65	31112,8	0,89	26.03.02	21,9	36198,9	1,03
30.01.02	41,2	31154	0,89	27.03.02	18,6	36217,5	1,03
31.01.02	30,1	31184,1	0,89	28.03.02	16,3	36233,8	1,03
01.02.02	23,8	31207,9	0,89	29.03.02	14,6	36248,4	1,03
02.02.02	20,1	31228	0,89	30.03.02	13,1	36261,5	1,03
03.02.02	17,3	31245,3	0,89	31.03.02	12	36273,5	1,03
04.02.02	16,6	31261,9	0,89	01.04.02	10,9	36284,4	1,03
05.02.02	16,3	31278,2	0,89	02.04.02	10,4	36294,8	1,03
06.02.02	13,3	31291,5	0,89	03.04.02	9,7	36304,5	1,04
07.02.02	52,5	31344	0,89	04.04.02	9,1	36313,6	1,04
08.02.02	89	31433	0,90	05.04.02	8,3	36321,9	1,04
09.02.02	190,4	31623,4	0,90	06.04.02	7,6	36329,5	1,04
10.02.02	89,4	31712,8	0,90	07.04.02	7	36336,5	1,04
11.02.02	54	31766,8	0,91	08.04.02	6,6	36343,1	1,04
12.02.02	400,7	32167,5	0,92	09.04.02	6,2	36349,3	1,04
13.02.02	205,7	32373,2	0,92	10.04.02	6,1	36355,4	1,04
14.02.02	70,7	32443,9	0,93	11.04.02	5,7	36361,1	1,04
15.02.02	41	32484,9	0,93	12.04.02	5,2	36366,3	1,04
16.02.02	29,2	32514,1	0,93	13.04.02	4,9	36371,2	1,04
17.02.02	23,4	32537,5	0,93	14.04.02	4,5	36375,7	1,04
18.02.02	20	32557,5	0,93	15.04.02	4,3	36380	1,04
19.02.02	351,3	32908,8	0,94	16.04.02	125,4	36505,4	1,04
20.02.02	227,3	33136,1	0,94	17.04.02	286,3	36791,7	1,05
21.02.02	121,3	33257,4	0,95	18.04.02	342,8	37134,5	1,06
22.02.02	344,8	33602,2	0,96	19.04.02	160,2	37294,7	1,06
23.02.02	227,8	33830	0,96	20.04.02	78	37372,7	1,07
24.02.02	394,1	34224,1	0,98	21.04.02	42,9	37415,6	1,07
25.02.02	188,9	34413	0,98	22.04.02	31	37446,6	1,07
26.02.02	250,6	34663,6	0,99	23.04.02	24,1	37470,7	1,07
27.02.02	121,6	34785,2	0,99	24.04.02	20,1	37490,8	1,07
28.02.02	56,3	34841,5	0,99	25.04.02	17,5	37508,3	1,07

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Beckenabfluss aufsummiert (Becken RCL 2)**

<b>Becken RCL 2</b>							
Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis	Datum	Tages- summe Abfluss [Liter]	Auf- summierter Abfluss [Liter]	Aufsummierter Abfluss/ RC-Masse Becken RCL 2 Wasser/Feststoff- Verhältnis
26.04.02	15,1	37523,4	1,07	21.06.02	42	40098,9	1,14
27.04.02	12,8	37536,2	1,07	22.06.02	33	40131,9	1,14
28.04.02	19,3	37555,5	1,07	23.06.02	26,6	40158,5	1,15
29.04.02	192,2	37747,7	1,08	24.06.02	22,1	40180,6	1,15
30.04.02	71,1	37818,8	1,08	25.06.02	19	40199,6	1,15
01.05.02	41,3	37860,1	1,08	26.06.02	17	40216,6	1,15
02.05.02	29,4	37889,5	1,08	27.06.02	15	40231,6	1,15
03.05.02	23,2	37912,7	1,08	28.06.02	13,1	40244,7	1,15
04.05.02	597,8	38510,5	1,10	29.06.02	11,7	40256,4	1,15
05.05.02	134,8	38645,3	1,10	30.06.02	10	40266,4	1,15
06.05.02	57,5	38702,8	1,10	01.07.02	9,7	40276,1	1,15
07.05.02	39,2	38742	1,10	02.07.02	11	40287,1	1,15
08.05.02	30,9	38772,9	1,11	03.07.02	125,1	40412,2	1,15
09.05.02	25,3	38798,2	1,11	04.07.02	82	40494,2	1,15
10.05.02	21,3	38819,5	1,11	05.07.02	46,1	40540,3	1,16
11.05.02	17,8	38837,3	1,11	06.07.02	32,3	40572,6	1,16
12.05.02	15,3	38852,6	1,11	07.07.02	25,3	40597,9	1,16
13.05.02	13,5	38866,1	1,11	08.07.02	21,3	40619,2	1,16
14.05.02	12,2	38878,3	1,11	09.07.02	156,6	40775,8	1,16
15.05.02	11,1	38889,4	1,11	10.07.02	185	40960,8	1,17
16.05.02	10,3	38899,7	1,11	11.07.02	60	41020,8	1,17
17.05.02	10	38909,7	1,11	12.07.02	39	41059,8	1,17
18.05.02	9,3	38919	1,11	13.07.02	34,8	41094,6	1,17
19.05.02	8,7	38927,7	1,11	14.07.02	35,3	41129,9	1,17
20.05.02	8,1	38935,8	1,11	15.07.02	32,4	41162,3	1,17
21.05.02	7,8	38943,6	1,11	16.07.02	16,4	41178,7	1,17
22.05.02	7,6	38951,2	1,11				
23.05.02	7	38958,2	1,11				
24.05.02	6,4	38964,6	1,11				
25.05.02	5,8	38970,4	1,11				
26.05.02	2,7	38973,1	1,11				
27.05.02	3,3	38976,4	1,11				
28.05.02	4,9	38981,3	1,11				
29.05.02	4,6	38985,9	1,11				
30.05.02	4,4	38990,3	1,11				
31.05.02	4,1	38994,4	1,11				
01.06.02	4,1	38998,5	1,11				
02.06.02	4,2	39002,7	1,11				
03.06.02	4,1	39006,8	1,11				
04.06.02	4,1	39010,9	1,11				
05.06.02	3,9	39014,8	1,11				
06.06.02	3,7	39018,5	1,11				
07.06.02	3,5	39022	1,11				
08.06.02	3,2	39025,2	1,11				
09.06.02	3,3	39028,5	1,11				
10.06.02	3,1	39031,6	1,11				
11.06.02	2,8	39034,4	1,11				
12.06.02	2,7	39037,1	1,11				
13.06.02	3,7	39040,8	1,11				
14.06.02	723,4	39764,2	1,13				
15.06.02	108,1	39872,3	1,14				
16.06.02	53,1	39925,4	1,14				
17.06.02	36,3	39961,7	1,14				
18.06.02	28,5	39990,2	1,14				
19.06.02	24,8	40015	1,14				
20.06.02	41,9	40056,9	1,14				

**Feldversuch mit Material RCL 1: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [μS/cm]	Leitfähigkeit [μS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
11.10.00	0,00		7,7		616	14,5	1,8	0,0
12.10.00	0,00		7,6		655	14,4	1,8	0,0
13.10.00	0,01		7,6		674	14,3	1,8	0,0
14.10.00	0,01		7,6		686	14,3	1,8	0,0
15.10.00	0,01	7,3	7,6	776	689	14,3	1,8	0,0
16.10.00	0,01	7,3	7,6	756	693	14,4	0,5	0,0
17.10.00	0,01	7,1	7,6	760	697	14,3	0,4	0,0
18.10.00	0,01	7,3	8,9	793	637	14,2	0,4	0,0
19.10.00	0,01	7,3	8,5	810	635	14,1	0,5	0,0
20.10.00	0,01	7,5	8,0	789	647	14,1	0,9	0,0
21.10.00	0,01	7,7	7,8	840	654	14,1	1,0	0,0
22.10.00	0,02	7,8	7,8	785	662	14,1	1,0	0,0
23.10.00	0,02	8,0	8,7	682	676	14,4	1,4	0,0
24.10.00	0,02	8,0	7,2	733	778	14,0	1,2	0,0
25.10.00	0,02	7,9	7,2	712	772	13,8	1,5	0,0
26.10.00	0,02	8,0	7,2	716	778	13,8	3,9	0,0
27.10.00	0,03	7,9	7,1	740	713	13,6	3,7	0,0
28.10.00	0,04	7,9	7,0	782	797	13,5	3,5	0,0
29.10.00	0,05		7,1		860	13,4	3,5	0,0
30.10.00	0,06		7,2		887	13,3	3,5	0,0
31.10.00	0,06		7,2		889	13,1	3,5	0,0
01.11.00	0,06		7,2		873	12,9	3,5	0,0
02.11.00	0,06		7,2		873	12,7	3,5	0,0
03.11.00	0,07		7,2		875	12,5	3,5	0,0
04.11.00	0,07		7,2		841	12,3	0,6	0,0
05.11.00	0,07		7,2		868	12,1	0,6	0,0
06.11.00	0,08		7,2		885	11,9	0,6	0,0
07.11.00	0,08		7,2		892	11,8	0,6	0,0
08.11.00	0,08		7,2		910	11,7	0,6	0,0
09.11.00	0,08		7,2		913	11,5	0,6	0,0
10.11.00	0,08	7,6	7,2	893	928	11,3	0,6	0,0
11.11.00	0,08	7,6	7,2	917	943	11,1	0,9	0,0
12.11.00	0,08	7,7	7,2	919	948	11,1	0,6	0,0
13.11.00	0,09	7,6	7,2	928	956	11,0	0,9	0,0
14.11.00	0,09	7,6	7,2	940	968	10,8	0,8	0,0
15.11.00	0,09	7,6	7,2	947	978	10,7	0,4	0,0
16.11.00	0,09	7,6	7,2	813	986	10,4	0,5	0,0
17.11.00	0,09	7,6	7,2	977	989	10,0	1,1	0,0
18.11.00	0,09	7,6	7,2	979	1001	10,2	0,6	0,0
19.11.00	0,09	7,6	7,2	977	1013	10,2	0,9	0,0
20.11.00	0,09	7,6	7,2	979	1015	9,8	0,6	0,0
21.11.00	0,09	7,6	7,2	984	1027	9,9	0,6	0,0
22.11.00	0,09	7,6	7,2	1007	1034	9,9	0,9	0,0
23.11.00	0,10	7,6	7,2	1025	1042	9,9	0,4	0,0
24.11.00	0,10	7,6	7,2	911	1041	9,8	0,7	0,0
25.11.00	0,10	7,5	7,1	1030	1055	9,7	0,3	0,0
26.11.00	0,11	7,5	7,2	1050	1072	9,6	0,5	0,0
27.11.00	0,11	7,5	7,2	1060	1086	9,5	0,8	0,0
28.11.00	0,11	7,6	7,1	1060	1085	9,5	1,0	0,0
29.11.00	0,11	7,5	7,1	1069	1102	9,6	0,4	0,0
30.11.00	0,12	7,4	7,1	1088	1115	9,7	0,6	0,0
01.12.00	0,12	7,4	7,1	1102	1130	9,8	0,4	0,0
02.12.00	0,12	7,4	7,1	1115	1143	9,9	0,7	0,0
03.12.00	0,12	7,3	7,1	1122	1153	9,8	1,1	0,0
04.12.00	0,12	7,5	7,1	1126	1158	9,8	0,9	0,0
05.12.00	0,12	7,4	7,2	1130	1168	10,0	0,5	0,0
06.12.00	0,13	7,6	7,3	1142	1162	9,9	1,7	0,0

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
07.12.00	0,13	7,7	7,2	1135	1153	9,8	1,3	0,0
08.12.00	0,13	7,7	7,2	1113	1126	9,8	0,6	0,0
09.12.00	0,13	7,7	7,2	1103	1130	9,9	0,5	0,0
10.12.00	0,14	7,7	7,3	1108	1138	9,9	0,4	0,0
11.12.00	0,14	7,8	7,2	1112	1142	10,1	0,3	0,0
12.12.00	0,14	7,7	7,2	1115	1143	10,3	0,6	0,0
13.12.00	0,14	7,5	7,1	1120	1146	10,2	0,5	0,0
14.12.00	0,14	7,6	7,1	1111	1116	10,0	0,5	0,0
15.12.00	0,14		7,1		1090	9,8	0,5	0,0
16.12.00	0,14		7,1		1073	8,6	0,4	0,0
17.12.00	0,14		6,9		1076	6,9	0,3	0,0
18.12.00	0,14		6,6		1073	7,3	0,4	0,0
19.12.00	0,14		7,0		1082	7,0	1,1	0,0
20.12.00	0,14		7,0		1087	8,1	1,8	0,0
21.12.00	0,14		6,8		1086	8,7	1,8	0,0
22.12.00	0,14		6,8		1086	8,3	1,8	0,0
23.12.00	0,14		6,7		1087	8,0	1,8	0,0
24.12.00	0,14		6,7		1087	8,0	1,8	0,0
25.12.00	0,14		6,7		1086	7,9	1,8	0,0
26.12.00	0,14		6,7		1086	8,1	1,8	0,0
27.12.00	0,15		6,8		1086	8,1	1,8	0,0
28.12.00	0,15		6,8		1085	8,0	0,8	0,0
29.12.00	0,15		6,8		1084	8,1	0,8	0,0
30.12.00	0,15		6,8		1083	8,1	0,8	0,0
31.12.00	0,15		6,8		1082	8,0	0,8	0,0
01.01.01	0,15		6,8		1082	8,5	0,8	0,0
02.-05.01.01	0,16		7,0		1143	8,5	0,6	0,0
06.-09.01.01	0,19		7,1		1054	8,1	0,4	0,0
10.-13.01.01	0,20	7,8	6,9	995	1018	11,6	0,7	0,0
14.-17.01.01	0,20	7,7	7,0	989	1007	13,1	0,3	0,0
18.-21.01.01	0,21	7,7	7,0	970	981	11,6	1,1	0,0
22.-25.01.01	0,22	7,8	7,0	934	943	9,3	0,3	0,0
26.-30.01.01	0,24	7,8	7,0	852	834	10,7	0,4	0,0
31.1.-3.2.01	0,25	8,1	7,4	605	586	9,1	0,5	0,0
08.-11.02.01	0,29	8,1	7,3	592	598	9,1	0,6	0,0
12.-15.02.01	0,29		7,3		555	8,2	0,6	0,0
16.-19.02.01	0,30	8,1	7,4	508	515	9,2	2,3	0,0
20.-23.02.01	0,30		7,3		530	9,2	0,7	0,0
24.-26.02.01	0,31	8,0	7,3	527	531	9,7	0,4	0,0
27.2.-1.3.01	0,32		7,3		532	9,2	0,5	0,0
6.-9.3.01	0,32	7,8	7,6	515	505	7,6	0,4	0,0
10.-13.3.01	0,32		7,6		509	9,3	0,4	0,0
14.-17.03.01	0,33	8,1	7,6	520	515	9,3	0,4	0,0
18.-21.03.01	0,34		7,6		524	9,0	0,4	0,0
22.-25.03.01	0,35	8,2	7,5	541	538	8,1	0,4	0,0
26.-29.03.01	0,38		7,5		516	8,9	0,3	0,0
30.3.-3.4.01	0,38	8,2	7,4	535	532	9,9	0,4	0,0
04.-11.04.01	0,38	8,2	7,4	509	394	11,2	1,1	0,0
11.-18.04.01	0,39		7,5		524	9,7	1,6	0,0
18.-25.04.01	0,41	8,1	7,5	497	499	9,3	3,9	0,0
25.04.-02.05.01	0,43		7,4		503	10,7	7,5	0,0
02.-07.05.01	0,44	8,3	7,4	513	519	13,0	5,4	0,0
07.-14.05.01	0,44	8,0	7,5		530	15,6	1,8	0,0
14.-21.05.01	0,45		7,4		542	15,9	4,1	0,0
21.-28.05.01	0,45	8,2	7,3		541	17,9	2,5	0,0
28.05.-04.06.01	0,45		7,2		546	18,1	9,9	0,0
06.-13.06.01	0,46		7,2	537	554	17,5	5,9	0,0

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [μS/cm]	Leitfähigkeit [μS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
13.-20.06.01	0,47		7,3	556	571	18,8	9,0	0,0
20.-27.06.01	0,48		7,2	604	618	18,6	6,2	0,0
27.06.-05.07.01	0,50		7,1	647	663	20,5	5,6	0,0
05.-12.07.01	0,51		7,2		699	21,9	0,9	0,0
12.-19.07.01	0,51		7,2		717	20,7	1,0	0,0
19.-26.07.01	0,53		7,2		729	20,8	0,6	0,0
26.07.-02.08.01	0,53		7,1		756	23,5	4,6	0,0
02.-08.08.01	0,53		7,0		767	22,5	3,5	0,0
08.-15.08.01	0,54	8,3	7,1	761	777	21,7	4,1	0,0
15.-22.08.01	0,54		7,0		778	23,1	3,6	0,0
22.-29.08.01	0,54	8,3	7,1	767	776	24,2	2,4	0,0
29.08.-04.09.01	0,55		7,1		782	22,0	5,5	0,0
04.-11.09.01	0,57	8,1	7,2	787	816	18,8	5,8	0,0
11.-18.09.01	0,60		7,1		830	18,9	3,5	0,0
18.-25.09.01	0,63	8,1	7,2	788	784	17,3	4,6	0,0
25.09.-02.10.01	0,64		7,2		781	16,6	5,5	0,0
02.-10.10.01	0,66	8,0	7,2	735	743	17,1	6,9	0,0
10.-17.10.01	0,66	8,0	7,3	737	748	17,2	5,9	0,0
17.-24.10.01	0,67		7,4		746	16,4	3,2	0,0
24.-31.10.01	0,67	7,9	7,3	717	742	15,5	3,7	0,0
31.10.-07.11.01	0,68		7,4		709	13,8	4,4	0,0
07.-14.11.01	0,70	7,8	7,5	647	659	11,0	3,9	0,0
14.-21.11.01	0,71		7,4		650	11,1	4,4	0,0
21.-28.11.01	0,73	7,6	7,4	619	632	10,5	4,7	0,0
28.11.-05.12.01	0,80		7,6		447	10,3	33,1	10,3
05.-17.12.01	0,80	7,7		410			94,1	52,4
17.-24.12.01	0,81	8,2	7,6	435	445	12,9	35,5	12,0
24.-31.12.01	0,83		7,7		413	10,3	53,7	24,5
31.12.01-7.1.02	0,85	8,1	7,5	410	406	15,1	66,6	33,4
07.-14.01.02	0,85		7,3		406	12,6	25,5	5,1
14.-22.01.02	0,85	8,1	7,7	394	416	13,0	21,9	2,6
22.-29.01.02	0,86		7,3		394	9,8	29,7	8,0
29.01.-05.02.02	0,89	7,9	7,3	382	390	10,1	25,4	5,0
05.-12.02.02	0,90		7,3		395	10,0	28,5	7,2
12.-19.02.02	0,93	7,9	7,0	381	382	9,7	87,8	48,0
19.-26.02.02	0,96		7,6		364	7,8	105,1	60,0
26.02.-05.03.02	0,99	8,0	7,9	331	335	8,7	314,0	204,0
05.-12.03.02	1,00	8,0	7,5	333	341	10,0	314,0	204,0
12.-19.03.02	1,00	8,0	7,4	342	341	10,2	281,0	181,2
19.-23.03.02	1,03	8,1	7,6	351	349	9,2	306,0	198,5
23.-30.03.02	1,03	7,7	7,8	341	345	10,1	332,0	216,4
30.03.-06.04.02	1,03	8,0	7,5	345	349	11,5	293,0	189,5
06.-13.04.02	1,04	8,0	7,2	350	351	11,4	117,6	68,6
13.-20.04.02	1,04	8,0	7,2	356	352	11,1	48,3	20,8
20.-27.04.02	1,07	7,57	7,9	365	369	12,4	221,0	139,9
27.04.-04.05.02	1,08	7,16	7,8	374	394	12,2	126,4	74,7
04.-11.05.02	1,10	7,10	7,8	393	398	12,4	135,6	81,0
11.-21.05.02	1,11	7,19	7,6	403	430	16,7	110,9	64,0
14.-18.06.02	1,14	7,96	7,1	423	433	19,0	391,0	257,1
21.-28.06.02	1,15	7,93	7,3	447	477	20,1	63,9	31,6
28.06.-05.07.02	1,15	7,94	7,4	480	467	18,8	62,6	30,6
05.-12.07.02	1,16	7,60	7,1	477	489	20,0	18,2	0,0
12.-16.07.02	1,17	7,69	7,3	490	506	20,4	16,4	0,0

**Feldversuch mit Material RCL 2: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
11.10.00	0,00		7,5		662	14,7	0,9	0,0
12.10.00	0,00	7,4	7,5	621	662	14,7	0,9	0,0
13.10.00	0,01	6,9	7,4	655	661	14,6	0,4	0,0
14.10.00	0,01	7,3	7,2	674	713	14,7	0,4	0,0
15.10.00	0,01	7,3	7,3	685	761	14,9	1,1	0,0
16.10.00	0,01	7,3	7,3	689	771	15,0	0,4	0,0
17.10.00	0,01	6,7	7,3	733	813	14,7	0,5	0,0
18.10.00	0,01	7,3	7,2	695	825	14,7	0,6	0,0
19.10.00	0,01	7,2	7,3	794	835	14,6	2,5	0,0
20.10.00	0,01	7,3	7,3	642	850	14,4	1,9	0,0
21.10.00	0,01	7,3	7,2	648	790	14,1	0,6	0,0
22.10.00	0,02	7,4	7,2	654	758	14,1	0,6	0,0
23.10.00	0,02	8,3	8,2	666	716	14,1	1,0	0,0
24.10.00	0,02	9,0	8,3	630	652	13,9	3,3	0,0
25.10.00	0,02	8,7	8,4	560	643	13,8	2,6	0,0
26.10.00	0,02	7,9	9,1	651	630	13,6	1,5	0,0
27.10.00	0,03	8,6	10,8	634	767	13,4	1,4	0,0
28.10.00	0,04	8,0	8,9	668	619	13,2	26,0	5,4
29.10.00	0,05		8,6		643	13,2	26,0	5,4
30.10.00	0,06		8,9		682	13,1	26,0	5,4
31.10.00	0,06		10,0		719	13,0	26,0	5,4
01.11.00	0,06		9,3		692	12,7	26,0	5,4
02.11.00	0,06		9,0		696	12,6	26,0	5,4
03.11.00	0,07		9,8		700	12,4	26,0	5,4
04.11.00	0,07		9,1		674	12,2	26,0	5,4
05.11.00	0,07		9,0		685	12,0	5,5	0,0
06.11.00	0,08		9,1		695	11,9	5,5	0,0
07.11.00	0,08		9,6		694	11,7	5,5	0,0
08.11.00	0,08		9,1		699	11,6	5,5	0,0
09.11.00	0,08		8,9		703	11,2	5,5	0,0
10.11.00	0,08	7,8	9,0	709	704	11,0	5,5	0,0
11.11.00	0,08	7,8	9,0	712	706	11,2	1,5	0,0
12.11.00	0,08	7,9	8,9	714	720	11,2	3,3	0,0
13.11.00	0,09	7,8	8,9	727	732	11,0	1,8	0,0
14.11.00	0,09	7,8	8,8	736	743	10,8	1,1	0,0
15.11.00	0,09	7,7	8,8	746	752	10,7	0,9	0,0
16.11.00	0,09	7,8	8,7	651	761	10,5	2,1	0,0
17.11.00	0,09	7,7	8,7	772	770	10,4	2,4	0,0
18.11.00	0,09	7,8	8,6	776	776	10,3	1,6	0,0
19.11.00	0,09	7,7	8,6	783	782	10,2	1,7	0,0
20.11.00	0,09	7,7	8,6	701	787	9,9	1,2	0,0
21.11.00	0,09	7,8	8,5	675	792	10,0	1,2	0,0
22.11.00	0,09	7,8	8,5	793	785	10,0	1,5	0,0
23.11.00	0,10	7,7	8,3	783	805	10,0	0,8	0,0
24.11.00	0,10	7,6	8,3	807	822	9,9	0,6	0,0
25.11.00	0,10	7,6	8,4	820	831	9,8	0,6	0,0
26.11.00	0,11	7,7	8,4	828	835	9,6	0,8	0,0
27.11.00	0,11	7,7	8,4	828	833	9,6	0,7	0,0
28.11.00	0,11	7,7	8,3	820	838	9,6	0,9	0,0
29.11.00	0,11	7,7	8,4	835	847	9,7	0,5	0,0
30.11.00	0,12	7,5	8,4	831	845	9,7	0,7	0,0
01.12.00	0,12	7,6	8,4	835	848	9,8	0,8	0,0
02.12.00	0,12	7,6	8,4	836	844	9,9	0,8	0,0
03.12.00	0,12	7,6	8,3	833	843	9,8	0,8	0,0
04.12.00	0,12	7,6	8,3	803	843	9,8	1,2	0,0
05.12.00	0,12	7,6	8,4	831	847	9,9	1,0	0,0

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 2: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
06.12.00	0,13	7,8	8,6	828	823	9,7	1,2	0,0
07.12.00	0,13	7,8	8,6	820	821	9,7	0,8	0,0
08.12.00	0,13	7,9	8,7	818	816	9,7	2,2	0,0
09.12.00	0,13	7,8	8,7	811	813	9,8	0,5	0,0
10.12.00	0,14	7,9	8,7	810	814	9,8	0,9	0,0
11.12.00	0,14	7,9	8,7	809	811	9,9	0,9	0,0
12.12.00	0,14	7,9	8,6	803	798	10,0	1,2	0,0
13.12.00	0,14	7,7	8,6	787	779	9,9	1,4	0,0
14.12.00	0,14	7,8	8,6	771	771	9,8	1,1	0,0
15.12.00	0,14		8,5		768	9,7	0,6	0,0
16.12.00	0,14		8,6		776	9,4	0,2	0,0
17.12.00	0,14		8,6		781	9,1	0,8	0,0
18.12.00	0,14		8,6		784	8,8	1,2	0,0
19.12.00	0,14		8,6		787	8,5	2,2	0,0
20.12.00	0,14		8,6		781	8,4	0,7	0,0
19.-20.12.2000	0,14		8,7		784	8,3	0,6	0,0
21.-24.12.00	0,14		8,7		785	8,1	1,3	0,0
25.-28.12.00	0,14		8,6		785	7,4	1,4	0,0
29.12.00-01.01.01	0,15		8,5		770	7,1	1,1	0,0
02.-05.01.01	0,16		8,7		705	6,6	1,4	0,0
06.-09.01.01	0,19		8,8		657	6,8	5,3	0,0
10.-13.01.01	0,20	8,3	8,7	610	605	6,9	17,3	0,0
14.-17.01.01	0,20	8,1	8,7	605	608	7,8	9,8	0,0
18.-21.01.01	0,21	8,1	8,8	615	614	8,2	4,0	0,0
22.-25.01.01	0,22	8,9	9,2	538	513	5,1	19,2	0,7
26.-30.01.01	0,24	8,3	8,9	502	487	5,4	65,7	32,8
31.1.-3.2.01	0,25	8,3	9,3	517	523	6,4	51,1	22,7
04.-07.02.01	0,28		9,2		459	5,6	108,0	62,0
08.-11.02.01	0,29	8,3	9,3	459	463	6,6	176,4	109,1
12.-15.02.01	0,29		9,2		462	7,0	205,4	129,1
16.-19.02.01	0,30	8,3	9,1	471	467	7,0	192,3	120,1
20.-23.02.01	0,30		9,2		460	6,8	174,7	108,0
24.-26.02.01	0,31	8,2	9,2	460	455	6,9	163,0	99,9
27.2.-1.3.01	0,32		9,1		467	6,6	146,8	88,7
6.-9.3.01	0,32	8,2	8,6	503	498	7,5	91,9	50,9
10.-13.3.01	0,33		8,8		486	7,1	142,5	85,8
14.-17.3.01	0,33	8,0	9,0	506	498	7,8	155,2	94,5
18.-21.03.01	0,34		8,9		504	7,7	157,7	96,2
22.-25.03.01	0,36	8,2	9,2	493	474	7,3	293,0	189,5
26.-29.03.01	0,38		9,5		493	7,8	425,0	280,5
30.3.-3.4.01	0,38	8,5	9,5	534	520	8,5	404,0	266,0
04.-11.04.01	0,38	8,4	9,5	528	541	10,6	377,0	247,4
11.-18.04.01	0,39		9,3		509	9,4	377,0	247,4
18.-25.04.01	0,41	8,4	9,5	523	535	9,6	383,0	251,6
25.04.-02.05.01	0,44		9,4		520	11,9	473,0	313,6
02.-07.05.01	0,44	8,6	9,4	549	564	13,7	589,0	393,6
07.-14.05.01	0,44	8,3	9,1		563	15,8	610,0	408,0
14.-21.05.01	0,45		8,5		550	16,2	666,0	446,7
21.-28.05.01	0,45	8,3	8,5		555	17,3	577,0	385,3
28.05.-04.06.01	0,45		8,4		599	17,1	455,0	301,2
06.-10.06.01	0,46		8,6		629	17,5	451,0	298,4
10.-13.06.01	0,46		8,5		613	17,4	393,0	258,4
13.-20.06.01	0,47		8,6		696	18,0	347,0	226,7
20.-27.06.01	0,48		8,6		741	18,3	166,0	102,0
27.06.-05.07.01	0,50		8,5		719	20,2	192,0	119,9

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 2: pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Wassertemp., Trübung**

Labor = Labormessungen; Feld = Feldmessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	pH	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Wasser- temp. [°C]	Trübung [FNU]	Trübung [mg/l]
		Labor	Feld	Labor	Feld	Feld	Labor	Labor
05.-12.07.01	0,51		8,4		754	21,9	194,3	121,5
12.-19.07.01	0,51		9,1		760	20,6	206,6	129,9
19.-26.07.01	0,53		8,8		797	20,2	301,0	195,0
26.07.-02.08.01	0,53		8,5		797	22,8	309,0	200,5
02.-08.08.01	0,53		8,3		806	22,8	341,0	222,6
08.-15.08.01	0,54		8,5	814	809	21,5	314,0	204,0
15.-22.08.01	0,54		8,3		819	22,8	302,0	195,7
22.-29.08.01	0,54	8,4	8,1	821	832	24,5	221,0	139,9
29.08.-04.09.01	0,55		8,0		830	21,8	214,0	135,0
04.-11.09.01	0,57	8,1	8,2	783	792	20,7	143,0	86,1
11.-18.09.01	0,60		8,6		693	18,8	209,0	131,6
18.-25.09.01	0,63	8,4	8,8	642	637	17,4	481,0	319,1
25.09.-02.10.01	0,64		8,8		661	16,6	642,0	430,1
02.-10.10.01	0,66	8,9	8,8	627	654	16,7	582,0	388,7
10.-17.10.01	0,66	8,0	8,8	640	673	16,8	691,0	463,9
17.-24.10.01	0,67		8,4		651	16,3	701,0	470,8
24.-31.10.01	0,67	8,0	9,2	621	645	15,6	645,0	432,2
31.10.-07.11.01	0,68		8,8		667	13,5	404,0	266,0
07.-14.11.01	0,70	8,2	8,9	574	614	11,7	284,0	183,3
14.-21.11.01	0,71		9,8		623	11,1	316,0	205,4
21.-28.11.01	0,72	8,1	9,8	538	577	10,7	314,0	204,0
28.11.-05.12.01	0,80		11,0		601	10,2	494,0	328,1
05.-17.12.01	0,80	10,0		574			494,0	328,1
17.-24.12.01	0,81	8,8	10,8	613	575	8,0	304,0	197,1
24.-31.12.01	0,83	8,9	10,7	440	522	7,2	347,0	226,7
31.12.01-7.1.02	0,85	9,1	10,9	475	598	9,1	205,1	128,9
07.-14.01.02	0,85		10,8		601	10,5	158,8	97,0
14.-22.01.02	0,85	9,2	10,9	486	626	8,5	129,4	76,7
22.-29.01.02	0,86		11,1		567	6,9	113,8	66,0
29.01.-05.02.02	0,89	10,1	11,3	499	664	8,5	139,1	83,4
05.-12.02.02	0,90		11,1		586	7,9	169,6	104,4
12.-19.02.02	0,93	10,5	11,4	523	673	8,4	167,4	102,9
19.-26.02.02	0,96		11,4		679	6,7	184,3	114,6
26.02.-05.03.02	0,99	10,4	11,8	534	823	7,6	173,3	107,0
05.-12.03.02	1,00	10,6	11,6	568	802	8,4	132,0	78,5
12.-19.03.02	1,00	10,7	11,4	578	696	7,9	112,8	65,3
19.-23.03.02	1,03	10,8	11,4	550	689	8,5	165,7	101,7
23.-30.03.02	1,03	10,0	11,5	542	760	9,2	134,8	80,4
30.03.-06.04.02	1,03	10,2	11,4	585	774	10,4	115,2	66,9
06.-13.04.02	1,04	10,3	11,2	635	747	10,9	121,0	70,9
13.-20.04.02	1,04	10,4	11,0	622	716	10,7	131,6	78,2
20.-27.04.02	1,07	8,39	11,4	497	739	11,7	145,0	87,5
27.04.-04.05.02	1,08	7,96	11,1		675	12,0	156,1	95,1
04.-11.05.02	1,10	9,26	11,2	513	752	12,1	151,4	91,9
11.-18.05.02	1,11	9,42	10,9		752	14,5	121,4	71,2
18.-28.05.02	1,11	9,40	10,5	622	723	16,4	139,4	83,6
28.05.-04.06.02	1,11	9,49	10,4	652	730	17,4	170,1	104,8
04.-11.06.02	1,11	9,42	10,3	667	736	18,5	163,4	100,2
11.-18.06.02	1,14	9,70	10,8	644	689	18,3	356,0	232,9
18.-28.06.02	1,15	9,94	10,5	652	737	19,8	165,3	101,5
28.06.-05.07.02	1,15	9,50	10,2	659	742	19,2	159,0	97,1
05.-12.07.02	1,16	9,70	10,4	640	724	19,9	125,0	73,7
12.-16.07.02	1,17	9,87	10,4	640	709	20,1	104,8	59,7

**Feldversuch mit Material RCL 1: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
11.10.00	0,00										
12.10.00	0,00										
13.10.00	0,01										
14.10.00	0,01										
15.10.00	0,01			138,1	65,5	3,8	158,0	42,0	4,1	102,9	9,8
16.10.00	0,01			139,1	55,1	35,4	141,8	33,4	6,7	99,3	10,9
17.10.00	0,01			147,1	54,3	31,1	146,1	33,7	6,9	97,9	11,0
18.10.00	0,01			158,3	58,7	35,3	149,7	34,6	6,2	106,3	11,9
19.10.00	0,01			151,5	66,1	38,1	145,7	34,3	6,1	104,7	11,8
20.10.00	0,01			149,7	65,0	35,9	148,2	35,1	5,9	109,9	11,9
21.10.00	0,01			141,1	70,6	39,7	146,1	35,7	5,2	111,9	12,4
22.10.00	0,02			149,4	57,2	29,3	151,5	33,2	4,4	106,3	11,9
23.10.00	0,02			142,6	49,5	25,7	151,3	31,9	4,4	104,0	11,4
24.10.00	0,02			123,9	52,0	31,7	160,9	31,1	4,0	101,3	10,0
25.10.00	0,02			141,2	52,9	28,4	156,9	31,9	4,0	97,4	10,8
26.10.00	0,02			136,4	52,6	17,6	156,9	31,8	4,3	102,4	10,8
27.10.00	0,03			140,5	52,4	16,1	157,8	32,2	5,1	103,0	10,9
28.10.00	0,04			181,2	69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
29.10.00	0,05				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
30.10.00	0,06				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
31.10.00	0,06				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
01.11.00	0,06				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
02.11.00	0,06				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
03.11.00	0,07				69,1	17,2	150,9	41,3	4,3	98,3	10,8
04.11.00	0,07				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
05.11.00	0,07				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
06.11.00	0,08				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
07.11.00	0,08				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
08.11.00	0,08				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
09.11.00	0,08				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
10.11.00	0,08				89,0	75,0	158,4	45,2	3,7	109,5	12,0
11.11.00	0,08				93,3	78,3	160,4	45,8	3,7	115,3	12,5
12.11.00	0,08				96,1	83,4	163,8	45,5	3,8	116,9	12,0
13.11.00	0,09			93,8	94,6	81,4	157,1	45,5	3,7	120,3	12,9
14.11.00	0,09				97,2	85,8	165,9	44,9	3,6	120,1	12,8
15.11.00	0,09				96,2	82,4	162,7	45,2	3,7	121,9	13,0
16.11.00	0,09				118,9	86,7	167,9	43,4	3,7	122,1	13,2
17.11.00	0,09				121,2	88,8	170,9	43,4	3,7	124,4	13,0
18.11.00	0,09				123,0	88,7	171,7	43,2	3,7	125,6	13,5
19.11.00	0,09				128,1	92,0	173,1	43,5	4,0	128,9	13,9
20.11.00	0,09				128,1	93,5	181,8	41,4	3,8	131,8	13,5
21.11.00	0,09				129,3	95,2	176,4	41,4	3,7	131,7	14,1
22.11.00	0,09			86,3	128,8	94,5	172,9	40,5	3,8	131,6	14,3
23.11.00	0,10				134,7	94,0	175,0	40,2	4,0	136,0	14,6
24.11.00	0,10				138,3	103,3	171,1	40,3	4,2	136,8	14,5
25.11.00	0,10			80,9	139,3	102,3	169,0	38,0	3,9	138,6	14,8
26.11.00	0,11				147,7	107,1	173,4	39,1	4,0	141,7	14,6
27.11.00	0,11				148,1	107,4	178,5	39,8	3,8	144,0	15,3
28.11.00	0,11				122,0	110,8	161,6	41,5	4,8	144,7	15,4
29.11.00	0,11				126,0	114,5	168,4	42,2	4,4	144,7	15,3
30.11.00	0,12				163,4	118,5	172,9	42,4	4,8	146,9	15,4
01.12.00	0,12				162,9	122,1	173,4	43,1	4,3	147,3	15,9
02.12.00	0,12				163,6	123,1	174,8	43,4	3,9	149,2	15,8
03.12.00	0,12				167,9	127,7	179,2	45,4	3,7	155,2	15,9
04.12.00	0,12				131,2	129,0	170,7	45,8	3,9	151,9	16,2
05.12.00	0,12				128,9	124,9	164,4	45,5	3,7	151,9	16,1
06.12.00	0,13			76,8	165,4	137,7	187,0	45,6	3,6	151,3	16,5

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
07.12.00	0,13				165,6	138,8	184,1	45,7	3,7	149,0	16,0
08.12.00	0,13				163,3	134,8	175,7	46,1	3,9	145,3	15,7
09.12.00	0,13			80,3	163,1	143,7	175,6	47,3	3,9	146,3	17,2
10.12.00	0,14				162,2	136,8	175,6	48,1	3,6	147,1	16,5
11.12.00	0,14				129,5	128,0	180,9	48,7	3,7	147,9	16,3
12.12.00	0,14				161,8	136,6	179,1	49,2	3,6	145,5	16,1
13.12.00	0,14				164,3	139,0	183,5	50,1	3,7	148,8	15,4
14.12.00	0,14				162,8	135,5	179,4	50,9	4,5	145,9	15,1
15.12.00	0,14			94,0	157,5	141,5	171,2	50,4	3,7	139,4	17,9
16.12.00	0,14				153,8	127,0	165,9	50,7	3,7	134,9	14,1
17.12.00	0,14				152,9	124,9	164,1	51,4	3,9	133,9	14,2
18.12.00	0,14				153,5	124,5	157,4	51,3	3,6	135,8	15,5
19.12.00	0,14				124,3	119,7	169,8	51,3	4,2	134,1	14,4
20.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
21.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
22.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
23.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
24.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
25.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
26.12.00	0,14				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
27.12.00	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
28.12.00	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
29.12.00	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
30.12.00	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
31.12.00	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
01.01.01	0,15				125,8	119,1	167,2	50,6	3,8	132,3	16,8
02.-05.01.01	0,16				135,9	122,5	178,9	49,3	5,0	145,1	18,1
06.-09.01.01	0,19				126,8	118,7	177,3	43,5	3,8	142,5	18,4
10.-13.01.01	0,20			75,6	116,5	104,7	107,6	38,8	3,5	130,4	16,7
14.-17.01.01	0,20			76,7	113,9	103,6	156,4	39,2	3,5	128,3	18,0
18.-21.01.01	0,21			81,5	110,0	100,4	149,9	40,1	3,6	125,0	15,7
22.-25.01.01	0,22			83,9	102,6	97,0	141,6	42,7	3,4	117,0	15,1
26.-30.01.01	0,24			89,9	89,4	83,0	126,2	49,1	3,2	98,3	12,5
31.1.-3.2.01	0,25			104,1	50,0	43,9	92,6	55,4	2,6	57,2	7,3
08.-11.02.01	0,29			103,3	47,0	39,4	94,1	54,6	2,8	56,3	7,0
12.-15.02.01	0,29			103,3	40,1	33,3	82,4	56,3	2,5	48,1	6,0
16.-19.02.01	0,30			109,5	35,3	29,4	73,9	59,3	2,4	40,5	4,9
20.-23.02.01	0,30			109,5	36,2	29,8	76,5	57,7	2,7	43,2	5,2
24.-26.02.01	0,31			120,8	36,1	29,6	77,2	56,9	2,8	45,3	5,5
27.2.-1.3.01	0,32			120,8	35,7	29,3	77,4	56,5	2,8	46,2	5,6
6.-9.3.01	0,32			118,9	30,1	27,4	74,7	60,3	2,2	38,8	4,3
10.-13.3.01	0,32				30,1	27,4	74,7	62,2	2,3	37,7	4,1
14.-17.03.01	0,33			120,7	30,6	27,6	76,2	63,9	2,4	38,0	4,1
18.-21.03.01	0,34				30,9	28,1	79,1	63,7	2,5	39,7	4,3
22.-25.03.01	0,35			125,8	29,8	28,4	82,3	61,3	2,5	43,3	4,7
26.-29.03.01	0,38				28,6	28,2	76,5	60,6	2,4	40,7	4,3
30.3.-3.4.01	0,38			122,0	29,6	30,1	81,1	59,3	2,6	43,8	4,8
04.-11.04.01	0,38			147,8	31,3	28,5	69,5	68,7	2,4	36,4	4,3
11.-18.04.01	0,39			147,8	30,4	27,4	69,4	71,2	2,4	36,2	4,1
18.-25.04.01	0,41			147,2	26,9	25,3	69,9	74,6	2,1	30,3	3,4
25.04.-02.05.01	0,43			147,2	25,9	27,7	72,3	79,6	2,1	27,5	3,1
02.-07.05.01	0,44			156,8	26,5	25,6	74,7	81,9	2,3	28,5	3,2
07.-14.05.01	0,44			161,0	26,8	17,9	77,8	77,6	2,1	28,5	2,8
14.-21.05.01	0,45			161,0	26,4	17,8	80,2	79,5	2,2	28,3	2,8
21.-28.05.01	0,45			169,8	26,2	15,1	81,8	82,3	2,3	29,3	2,8
28.05.-04.06.01	0,45			169,8	25,8	15,0	85,4	81,8	2,4	28,9	2,8
06.-13.06.01	0,46			149,8	25,4	19,7	86,6	81,0	2,5	28,4	2,8

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 1: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 01.01.01 Tageswerte; 02.01.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1	RCL 1
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
13.-20.06.01	0,47			144,1	25,6	20,9	96,7	82,8	2,5	29,4	2,9
20.-27.06.01	0,48			142,0	25,9	23,7	114,8	90,3	2,7	32,3	3,2
27.06.-05.07.01	0,50			150,9	27,0	28,2	125,5	97,1	3,0	35,3	3,4
05.-12.07.01	0,51			140,9	28,5	32,3	133,1	97,6	2,9	34,8	3,6
12.-19.07.01	0,51			153,1	29,0	30,8	142,2	98,7	2,9	37,1	3,8
19.-26.07.01	0,53			147,6	30,4	33,3	148,0	100,1	2,8	37,1	3,8
26.07.-02.08.01	0,53			144,0	31,4	34,4	157,5	99,5	2,9	38,0	3,8
02.-08.08.01	0,53			140,3	31,3	40,1	163,9	110,4	3,2	44,1	3,9
08.-15.08.01	0,54			134,3	31,5	42,7	164,6	111,2	3,0	47,0	4,2
15.-22.08.01	0,54			134,3	31,1	41,5	170,3	114,6	3,1	47,1	4,2
22.-29.08.01	0,54			125,8	30,6	45,5	171,4	114,3	3,1	46,7	4,1
29.08.-04.09.01	0,55			125,8	31,0	45,4	179,6	117,4	3,3	48,0	4,0
04.-11.09.01	0,57			106,9	31,1	53,5	188,4	120,1	3,3	48,4	4,2
11.-18.09.01	0,60			106,9	31,5	53,2	195,7	125,9	3,1	48,0	4,1
18.-25.09.01	0,63			111,2	29,0	45,6	188,4	126,8	3,0	42,2	3,6
25.09.-02.10.01	0,64			111,2	27,2	40,9	185,8	129,8	2,7	38,9	3,3
02.-10.10.01	0,66			121,4	24,6	36,4	175,3	126,0	2,6	35,5	3,1
10.-17.10.01	0,66			110,9	26,8	35,7	190,2	112,7	2,3	35,4	3,2
17.-24.10.01	0,67			110,9	25,7	33,0	186,8	113,7	2,4	35,9	3,2
24.-31.10.01	0,67			124,9	25,2	34,4	181,9	110,4	2,2	35,5	3,2
31.10.-07.11.01	0,68			124,9	24,1	33,6	180,0	109,4	2,1	32,8	2,9
07.-14.11.01	0,70			125,5	21,9	35,3	157,1	102,8	2,0	31,0	2,9
14.-21.11.01	0,71			125,5	20,5	32,3	149,8	101,4	1,8	28,2	2,7
21.-28.11.01	0,73			120,7	20,0	23,4	141,8	97,2	1,8	27,9	2,7
28.11.-05.12.01	0,80			120,7	13,7	12,6	102,0	78,5	1,5	19,5	2,0
05.-17.12.01	0,80			113,0	9,5	6,3	91,0	74,0	1,4	15,3	1,6
17.-24.12.01	0,81			109,0	10,0	8,0	91,5	71,6	1,7	14,7	1,7
24.-31.12.01	0,83			98,2	9,3	7,6	87,6	59,3	1,7	14,3	2,1
31.12.01-7.1.02	0,85			93,6	8,5	6,8	85,2	63,0	1,4	17,1	1,9
07.-14.01.02	0,85			98,3	9,2	6,2	84,2	71,7	1,6	18,2	1,8
14.-22.01.02	0,85			97,6	8,7	6,3	82,2	64,6	1,5	15,2	1,8
22.-29.01.02	0,86			114,3	9,1	9,7	78,7	75,2	1,5	17,8	1,7
29.01.-05.02.02	0,89			93,8	8,4	6,8	77,5	60,6	1,4	15,0	1,8
05.-12.02.02	0,90			93,8	9,8	6,8	76,8	68,1	1,6	16,1	1,7
12.-19.02.02	0,93			103,4	10,3	7,3	72,3	61,5	1,8	12,5	1,9
19.-26.02.02	0,96			103,4	8,2	7,8	69,8	70,9	1,4	13,9	1,5
26.02.-05.03.02	0,99			82,6	6,3	5,9	73,9	55,4	1,2	9,3	1,5
05.-12.03.02	1,00			114,8	6,4	5,2	75,2	56,5	1,3	8,8	1,5
12.-19.03.02	1,00			88,2	6,5	3,8	77,1	58,0	1,1	9,1	1,5
19.-23.03.02	1,03			92,8	6,2	5,5	74,9	59,0	1,2	10,0	1,5
23.-30.03.02	1,03			95,5	5,4	5,1	71,5	57,3	1,3	10,8	1,2
30.03.-06.04.02	1,03			94,3	5,6	5,9	70,1	58,0	1,2	10,3	1,2
06.-13.04.02	1,04			98,0	6,1	4,7	70,5	60,3	1,5	10,3	1,2
13.-20.04.02	1,04			99,5	6,0	5,2	71,6	60,7	1,3	10,6	1,2
20.-27.04.02	1,07			102,9	4,7	4,5	63,8	54,2	1,0	8,6	1,2
27.04.-04.05.02	1,08			80,8	6,6	5,4	81,9	59,7	1,2	9,7	1,1
04.-11.05.02	1,10			109,7	6,9	5,4	80,6	61,3	1,2	10,2	1,2
11.-21.05.02	1,11			110,4	8,2	3,7	85,0	54,3	1,1	8,9	1,4
14.-18.06.02	1,14			110,4	7,8	6,0	90,7	55,1	2,7	13,4	1,5
21.-28.06.02	1,15			124,3	7,4	8,0	88,1	59,1	2,6	14,6	1,4
28.06.-05.07.02	1,15			149,3	6,4	7,3	88,9	61,1	2,3	14,1	1,4
05.-12.07.02	1,16			121,0	7,5	7,3	93,5	60,9	2,7	15,5	1,4
12.-16.07.02	1,17			117,1	8,1	7,3	104,3	60,9	2,3	18,0	1,4

**Feldversuch mit Material RCL 2: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
11.10.00	0,00										
12.10.00	0,00			141,5	60,2	21,4	81,9	39,7	7,1	67,5	7,1
13.10.00	0,01			140,0	64,8	24,9	87,2	41,0	7,0	73,2	6,8
14.10.00	0,01			140,0	67,9	24,7	90,7	41,2	6,8	75,3	8,2
15.10.00	0,01			152,7	63,3	20,9	94,5	69,3	14,1	48,7	7,6
16.10.00	0,01			150,3	63,1	21,6	97,0	43,5	6,5	78,2	8,8
17.10.00	0,01			148,8	61,7	23,1	98,7	43,5	6,5	79,2	8,6
18.10.00	0,01			150,6	67,2	25,9	96,5	44,5	6,6	76,0	8,9
19.10.00	0,01			151,7	54,8	21,0	84,5	46,5	8,7	70,2	7,3
20.10.00	0,01			137,1	60,5	20,3	79,0	46,3	8,1	69,4	7,3
21.10.00	0,01			143,7	64,8	23,4	86,1	46,1	7,4	71,0	7,4
22.10.00	0,02			142,1	59,7	21,3	89,6	46,5	7,0	71,1	7,4
23.10.00	0,02			147,4	63,1	22,0	91,3	47,8	6,9	72,5	7,0
24.10.00	0,02			152,0	63,1	22,0	91,3	51,2	8,9	69,9	7,2
25.10.00	0,02			148,1	59,5	23,7	87,6	49,8	8,1	64,2	7,3
26.10.00	0,02			151,5	60,7	35,9	145,7	34,9	6,0	108,5	4,8
27.10.00	0,03			172,0	56,8	20,9	84,5	50,5	8,1	64,2	9,9
28.10.00	0,04			125,8	73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
29.10.00	0,05				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
30.10.00	0,06				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
31.10.00	0,06				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
01.11.00	0,06				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
02.11.00	0,06				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
03.11.00	0,07				73,2	37,7	77,5	43,4	6,9	76,5	6,3
04.11.00	0,07				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
05.11.00	0,07				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
06.11.00	0,08				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
07.11.00	0,08				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
08.11.00	0,08				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
09.11.00	0,08				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
10.11.00	0,08				79,9	44,3	83,1	68,5	15,2	56,6	6,3
11.11.00	0,08				79,3	44,0	79,2	67,1	14,8	57,5	5,9
12.11.00	0,08				79,6	44,9	83,2	70,2	13,1	57,3	3,9
13.11.00	0,09			126,7	80,7	41,2	77,1	71,1	13,6	58,3	6,0
14.11.00	0,09				93,2	48,2	77,9	72,9	13,9	59,7	6,1
15.11.00	0,09				83,5	49,5	75,1	73,1	14,0	60,2	6,1
16.11.00	0,09				99,9	51,4	80,3	72,7	14,1	61,1	6,3
17.11.00	0,09				103,0	52,9	81,3	72,8	14,2	62,7	6,4
18.11.00	0,09				104,7	53,6	81,5	72,8	13,8	63,9	6,5
19.11.00	0,09			127,4	107,2	54,7	82,1	72,7	13,7	65,1	6,7
20.11.00	0,09				109,2	55,9	79,8	72,7	13,7	65,9	6,8
21.11.00	0,09				110,7	56,3	83,3	72,5	13,2	67,1	7,0
22.11.00	0,09			127,2	110,6	56,6	83,7	71,8	12,7	68,2	7,0
23.11.00	0,10				114,3	56,6	82,3	62,8	9,1	73,5	8,3
24.11.00	0,10				100,7	58,6	94,7	61,8	8,6	77,0	8,7
25.11.00	0,10			98,3	125,2	61,8	90,1	61,9	9,4	80,1	8,9
26.11.00	0,11				121,9	62,9	90,0	62,3	10,0	78,8	8,8
27.11.00	0,11				125,3	63,9	88,9	64,3	10,9	78,4	8,9
28.11.00	0,11				109,5	65,7	78,1	61,4	9,4	80,6	9,1
29.11.00	0,11				115,2	70,0	81,8	64,7	10,2	80,8	9,2
30.11.00	0,12				89,4	126,3	91,0	64,0	10,1	80,6	9,3
01.12.00	0,12			103,6	106,6	63,6	75,6	65,2	10,1	80,7	9,1
02.12.00	0,12				136,0	66,5	78,9	66,4	11,5	77,6	8,8
03.12.00	0,12				136,3	68,4	79,8	67,7	10,8	79,3	8,9
04.12.00	0,12				110,7	69,5	77,1	66,6	10,4	78,1	9,0
05.12.00	0,12				104,0	67,1	70,9	67,8	10,4	77,3	8,9

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 2: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
06.12.00	0,13			101,8	139,4	71,7	76,5	67,4	10,1	75,2	8,9
07.12.00	0,13				140,1	74,6	72,4	63,2	7,8	76,7	9,4
08.12.00	0,13				141,3	71,9	69,9	64,5	8,0	76,1	9,5
09.12.00	0,13				139,2	69,7	71,2	64,9	8,6	75,7	9,6
10.12.00	0,14				138,2	69,3	72,2	66,9	9,5	75,3	9,0
11.12.00	0,14				136,2	70,6	76,9	68,2	9,9	73,6	8,7
12.12.00	0,14				134,2	68,6	69,9	68,1	9,9	72,5	8,6
13.12.00	0,14				133,7	72,1	65,7	67,7	9,5	70,8	8,7
14.12.00	0,14				129,6	67,0	61,0	68,3	8,9	69,1	8,4
15.12.00	0,14				102,6	65,8	60,5	67,8	8,6	66,7	5,9
16.12.00	0,14				130,4	70,5	59,3	69,3	9,3	69,3	8,0
17.12.00	0,14				127,5	66,1	60,6	70,0	8,9	68,4	7,6
18.12.00	0,14				128,6	67,2	62,1	72,5	9,8	68,0	7,8
19.12.00	0,14				125,0	67,0	62,6	73,5	10,2	67,2	7,7
20.12.00	0,14				102,1	64,8	64,6	72,7	10,2	66,6	7,5
19.-20.12.2000	0,14				102,1	64,8	64,6	72,7	10,2	66,6	8,7
21.-24.12.00	0,14				99,0	65,2	63,2	75,4	10,5	62,9	8,3
25.-28.12.00	0,14				97,0	65,0	61,2	77,9	10,7	60,1	8,0
29.12.00-01.01.01	0,15				96,2	63,6	57,9	75,2	9,8	59,8	7,9
02.-05.01.01	0,16				90,7	58,8	53,6	68,8	7,0	59,7	8,0
06.-09.01.01	0,19				77,9	47,6	40,6	73,3	6,9	49,9	6,6
10.-13.01.01	0,20			150,1	68,6	37,2	32,4	75,8	6,6	39,3	5,3
14.-17.01.01	0,20			148,8	68,1	34,8	34,3	78,0	7,7	37,8	5,3
18.-21.01.01	0,21			146,1	69,8	36,5	36,5	77,6	8,3	38,4	5,1
22.-25.01.01	0,22			158,9	54,7	26,1	27,7	73,7	10,7	29,5	3,5
26.-30.01.01	0,24			139,8	51,7	23,2	27,5	73,5	6,7	26,8	3,8
31.1.-3.2.01	0,25			149,7	52,3	24,5	33,1	77,7	8,8	26,8	3,3
04.-07.02.01	0,28			149,7	48,9	20,0	28,1	69,6	5,1	21,8	2,9
08.-11.02.01	0,29			144,7	46,1	18,8	25,1	75,5	6,6	19,1	2,4
12.-15.02.01	0,29			144,7	45,5	19,1	26,0	78,0	8,2	17,6	2,2
16.-19.02.01	0,30			147,2	45,4	19,4	26,5	79,4	8,4	17,4	2,2
20.-23.02.01	0,30			147,2	43,9	19,2	27,5	79,0	8,0	18,1	2,2
24.-26.02.01	0,31			142,4	43,5	19,4	27,7	78,8	6,6	16,1	2,0
27.2.-1.3.01	0,32			142,4	43,8	19,9	29,2	80,8	6,6	16,0	2,0
6.-9.3.01	0,32			140,6	45,0	24,1	34,7	82,2	8,7	18,7	2,1
10.-13.3.01	0,33			140,6	44,9	23,8	32,2	83,5	8,5	18,3	2,0
14.-17.3.01	0,33			149,0	45,0	25,0	31,2	86,7	6,7	17,2	1,9
18.-21.03.01	0,34			149,0	45,0	27,8	31,1	88,5	6,2	17,2	1,9
22.-25.03.01	0,36			143,3	44,9	27,3	28,6	85,4	4,9	16,2	1,8
26.-29.03.01	0,38			143,3	43,3	25,2	25,9	88,8	6,7	13,3	1,4
30.3.-3.4.01	0,38			172,5	44,4	26,9	28,1	94,8	9,7	14,0	1,3
04.-11.04.01	0,38			185,8	45,9	26,2	30,7	95,7	11,4	14,7	1,6
11.-18.04.01	0,39			185,8	42,4	27,9	29,0	95,4	9,4	14,1	1,6
18.-25.04.01	0,41			186,6	42,0	30,8	30,2	100,8	7,5	12,5	1,4
25.04.-02.05.01	0,44			186,6	42,2	26,7	30,0	103,4	7,2	11,3	1,3
02.-07.05.01	0,44			200,6	43,0	26,9	32,0	111,2	9,9	10,9	1,1
07.-14.05.01	0,44			205,8	44,9	21,4	37,7	106,0	11,3	12,5	1,2
14.-21.05.01	0,45			205,8	43,8	19,4	38,6	102,3	11,8	13,4	1,3
21.-28.05.01	0,45			204,4	42,8	19,5	38,8	102,6	10,8	13,6	1,3
28.05.-04.06.01	0,45			204,4	41,6	21,3	40,4	112,0	11,0	14,9	1,3
06.-10.06.01	0,46			215,5	40,6	29,6	42,6	115,3	11,1	14,1	1,4
10.-13.06.01	0,46			215,5	40,6	29,6	42,6	115,3	11,1	14,1	1,4
13.-20.06.01	0,47				43,2	31,8	49,3	129,5	10,0	14,9	1,5
20.-27.06.01	0,48			248,1	47,6	33,0	54,4	138,3	12,0	14,7	1,4
27.06.-05.07.01	0,50			244,7	51,8	31,6	49,8	140,5	11,7	13,8	1,3
05.-12.07.01	0,51			252,3	52,5	25,7	54,0	136,2	13,8	12,9	1,4
12.-19.07.01	0,51			260,5	51,4	26,8	57,0	135,2	18,4	14,2	1,2

**Fortsetzung Feldversuch mit Material RCL 2: Hauptelemente – Anionen und Kationen**

Labor = Labormessungen; bis 20.12.01 Tageswerte; 21.12.01-16.07.02 Mischproben

Datum	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2	RCL 2
	Wasser / Feststoff- Verhältnis	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
		Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor	Labor
19.-26.07.01	0,53			245,9	54,7	36,4	54,8	141,7	15,4	12,6	1,2
26.07.-02.08.01	0,53			259,5	54,1	60,9	60,2	156,3	19,0	13,0	1,1
02.-08.08.01	0,53			262,7	54,7	35,2	61,8	153,8	20,9	12,1	1,3
08.-15.08.01	0,54			261,8	52,7	40,2	58,5	162,5	20,0	13,8	1,2
15.-22.08.01	0,54			261,8	53,9	41,2	59,5	161,5	19,2	13,8	1,2
22.-29.08.01	0,54			256,8	53,9	39,3	62,7	164,8	19,5	14,1	1,2
29.08.-04.09.01	0,55			256,8	53,1	42,0	64,0	163,8	19,7	13,9	1,2
04.-11.09.01	0,57			221,8	53,6	43,9	67,6	156,0	11,9	16,3	1,6
11.-18.09.01	0,60			221,8	45,2	35,7	60,2	143,2	12,0	12,5	1,2
18.-25.09.01	0,63			205,6	38,3	28,8	53,3	131,3	14,4	9,6	0,8
25.09.-02.10.01	0,64			205,6	35,5	26,2	54,0	134,0	17,3	8,8	0,8
02.-10.10.01	0,66			220,0	32,6	25,0	51,7	129,2	17,0	8,1	0,7
10.-17.10.01	0,66			288,7	40,0	24,7	63,7	125,5	18,5	8,2	0,7
17.-24.10.01	0,67			241,5	39,0	23,2	68,9	120,1	17,8	8,4	0,8
24.-31.10.01	0,67			241,5	36,1	23,4	56,3	119,8	16,9	9,7	0,7
31.10.-07.11.01	0,68			241,5	38,9	25,2	59,1	126,7	17,4	8,5	0,7
07.-14.11.01	0,70			220,8	35,6	20,9	38,2	112,2	15,1	7,6	0,6
14.-21.11.01	0,71			220,8	34,4	21,5	43,9	112,8	15,8	6,9	0,5
21.-28.11.01	0,72			195,3	31,3	11,3	40,4	105,2	15,1	6,7	0,5
28.11.-05.12.01	0,80			195,3	17,6	2,3	27,9	91,2	17,1	2,2	0,1
05.-17.12.01	0,80			313,2	14,6	3,2	29,2	102,4	26,3	2,4	0,1
17.-24.12.01	0,81		5,2	175,5	14,7	9,9	30,4	102,5	26,1	4,2	0,1
24.-31.12.01	0,83		5,2	175,5	13,9	7,4	26,1	83,7	17,6	2,8	0,0
31.12.01-7.1.02	0,85		16,0	182,8	15,9	7,5	23,9	88,4	24,0	1,8	0,0
07.-14.01.02	0,85		16,0	182,8	15,8	8,7	24,3	89,7	26,9	2,8	0,0
14.-22.01.02	0,85		19,1	182,0	15,9	9,5	25,3	87,9	26,4	2,9	0,0
22.-29.01.02	0,86		72,5	78,0	16,1	9,2	23,5	82,6	20,1	2,1	0,0
29.01.-05.02.02	0,89		72,5	78,0	17,3	8,7	20,2	87,3	27,7	1,0	0,0
05.-12.02.02	0,90		72,5	78,0	16,6	8,4	21,0	88,3	28,0	1,7	0,0
12.-19.02.02	0,93		96,1	34,3	17,8	8,1	19,3	86,9	29,3	1,2	0,0
19.-26.02.02	0,96		96,1	34,3	14,9	7,2	18,8	79,1	27,9	1,2	0,0
26.02.-05.03.02	0,99		106,1	23,3	11,2	7,2	18,3	80,5	39,4	1,0	0,0
05.-12.03.02	1,00		110,8	35,7	11,6	8,2	19,2	80,1	41,1	1,2	0,0
12.-19.03.02	1,00	6,7	112,7		10,2	7,9	21,1	75,6	39,0	2,5	0,0
19.-23.03.02	1,03	1,7	105,8		10,2	7,9	21,1	67,2	28,3	1,8	0,0
23.-30.03.02	1,03		104,0	20,8	12,2	7,6	22,1	80,3	42,5	1,7	0,0
30.03.-06.04.02	1,03		105,7	56,7	12,7	8,8	22,8	87,1	49,8	2,2	0,0
06.-13.04.02	1,04		120,2	42,8	12,8	10,1	24,9	93,5	51,3	2,8	0,0
13.-20.04.02	1,04		113,3	50,0	12,9	10,5	26,2	96,5	48,8	3,1	0,0
20.-27.04.02	1,07		2,0	237,0	13,4	4,5	22,9	64,5	32,6	1,2	0,0
27.04.-04.05.02	1,08			264,0	13,4	2,9	24,1	76,8	42,5	1,4	0,0
04.-11.05.02	1,10		39,9	156,3	13,7	2,5	25,2	70,7	39,3	1,0	0,0
11.-18.05.02	1,11		44,8	139,2	14,6	10,6	28,1	70,5	42,2	1,6	0,0
18.-28.05.02	1,11		44,8	139,2	18,5	5,3	32,0	80,9	46,1	2,6	0,0
28.05.-04.06.02	1,11		45,9	256,9	13,1	2,7	30,6	101,1	60,2	5,2	0,1
04.-11.06.02	1,11		46,2	239,0	13,7	10,1	34,4	102,1	60,1	6,2	0,1
11.-18.06.02	1,14		63,1	196,4	15,0	9,5	36,2	98,8	58,6	5,0	0,1
18.-28.06.02	1,15		55,1	114,9	20,9	10,6	46,9	95,8	63,1	3,8	0,1
28.06.-05.07.02	1,15		56,8	173,4	16,8	10,6	46,2	97,4	60,4	4,4	0,1
05.-12.07.02	1,16		36,7	201,4	16,7	3,3	40,9	93,3	56,5	3,7	0,1
12.-16.07.02	1,17		64,6	158,3	24,7	3,3	46,0	94,5	56,0	3,8	0,1

## Feldversuch mit Material RCL 1 und RCL 2: Fehler Ionenbilanz

Datum	RCL 1	Datum	RCL 1	Datum	RCL 2	Datum	RCL 2
	Fehler Ionenbilanz [%]		Fehler Ionenbilanz [%]		Fehler Ionenbilanz [%]		Fehler Ionenbilanz [%]
15.10.00	-5,3	05.-12.07.01	3,5	12.10.00	3,5	27.06.-05.07.01	-2,7
16.10.00	5,4	12.-19.07.01	6,5	13.10.00	2,6	05.-12.07.01	1,7
17.10.00	7,8	19.-26.07.01	7,2	14.10.00	1,5	12.-19.07.01	2,5
18.10.00	7,1	26.07.-02.08.01	9,5	15.10.00	2,5	19.-26.07.01	0,2
19.10.00	9,2	02.-08.08.01	0,2	16.10.00	-1,1	26.07.-02.08.01	-0,2
20.10.00	4,7	08.-15.08.01	-2,8	17.10.00	-1,7	02.-08.08.01	-3,0
21.10.00	3,5	15.-22.08.01	-3,6	18.10.00	2,4	08.-15.08.01	-8,2
22.10.00	5,4	22.-29.08.01	-4,1	19.10.00	-3,5	15.-22.08.01	-6,8
23.10.00	2,8	29.08.-04.09.01	-4,3	20.10.00	-5,9	22.-29.08.01	-9,3
24.10.00	6,9	04.-11.09.01	-6,0	21.10.00	0,1	29.08.-04.09.01	-7,2
25.10.00	11,1	11.-18.09.01	-6,7	22.10.00	-2,2	04.-11.09.01	-9,2
26.10.00	3,9	18.-25.09.01	-7,0	23.10.00	0,0	11.-18.09.01	-6,7
27.10.00	3,7	25.09.-02.10.01	-8,8	25.10.00	2,2	18.-25.09.01	-8,4
28.10.00	11,5	02.-10.10.01	-7,1	26.10.00	4,3	25.09.-02.10.01	-12,4
13.11.00	2,9	10.-17.10.01	3,8	27.10.00	1,5	02.-10.10.01	-7,0
22.11.00	12,9	17.-24.10.01	0,7	28.10.00	-0,8	10.-17.10.01	16,9
25.11.00	12,5	24.-31.10.01	5,1	13.11.00	-3,3	17.-24.10.01	10,8
06.12.00	16,4	31.10.-07.11.01	6,8	19.11.00	5,2	24.-31.10.01	5,4
09.12.00	16,5	07.-14.11.01	5,4	22.11.00	5,6	31.10.-07.11.01	3,9
15.12.00	17,9	14.-21.11.01	5,2	25.11.00	4,5	07.-14.11.01	1,1
10.-13.01.01	-5,0	21.-28.11.01	1,9	01.12.00	-7,4	14.-21.11.01	2,7
14.-17.01.01	6,1	28.11.-05.12.01	4,2	06.12.00	8,4	21.-28.11.01	-4,4
18.-21.01.01	6,1	05.-17.12.01	1,0	10.-13.01.01	-3,4	28.11.-05.12.01	-4,7
22.-25.01.01	5,4	17.-24.12.01	3,8	14.-17.01.01	-4,8	05.-17.12.01	16,6
26.-30.01.01	5,1	24.-31.12.01	11,2	18.-21.01.01	-3,6	17.-24.12.01	-22,6
31.1.-3.2.01	2,9	31.12.01-7.1.02	-1,1	22.-25.01.01	-1,8	24.-31.12.01	-3,1
04.-07.02.01	2,3	07.-14.01.02	-10,4	26.-30.01.01	-6,7	31.12.01-7.1.02	1,0
08.-11.02.01	1,9	14.-22.01.02	-0,3	31.1.-3.2.01	-3,8	07.-14.01.02	-2,3
12.-15.02.01	-1,0	22.-29.01.02	-5,3	04.-07.02.01	5,6	14.-22.01.02	2,2
16.-19.02.01	-0,8	29.01.-05.02.02	0,4	08.-11.02.01	-2,3	22.-29.01.02	10,1
20.-23.02.01	-0,6	05.-12.02.02	-9,2	12.-15.02.01	-3,4	29.01.-05.02.02	4,0
24.-26.02.01	1,6	12.-19.02.02	5,6	16.-19.02.01	-3,4	05.-12.02.02	1,9
27.2.-1.3.01	0,7	19.-26.02.02	-9,8	20.-23.02.01	-4,1	12.-19.02.02	4,5
6.-9.3.01	2,6	26.02.-05.03.02	8,7	24.-26.02.01	-2,6	19.-26.02.02	5,8
10.-13.3.01	0,0	05.-12.03.02	23,5	27.2.-1.3.01	-3,3	26.02.-05.03.02	3,7
14.-17.03.01	-0,2	12.-19.03.02	9,2	6.-9.3.01	-4,6	05.-12.03.02	11,1
18.-21.03.01	-0,4	19.-23.03.02	7,7	10.-13.3.01	-6,3	12.-19.03.02	12,6
22.-25.03.01	0,3	23.-30.03.02	7,0	14.-17.3.01	-4,0	19.-23.03.02	-2,9
26.-29.03.01	0,6	30.03.-06.04.02	6,0	18.-21.03.01	-4,4	23.-30.03.02	1,5
30.3.-3.4.01	0,1	06.-13.04.02	4,5	22.-25.03.01	-3,2	30.03.-06.04.02	4,8
04.-11.04.01	3,8	13.-20.04.02	5,2	26.-29.03.01	-6,4	06.-13.04.02	4,1
11.-18.04.01	1,0	20.-27.04.02	12,0	30.3.-3.4.01	-1,6	13.-20.04.02	1,3
18.-25.04.01	2,0	27.04.-04.05.02	4,7	04.-11.04.01	1,5	20.-27.04.02	27,6
25.04.-02.05.01	1,9	04.-11.05.02	14,5	11.-18.04.01	1,4	27.04.-04.05.02	15,5
02.-07.05.01	2,5	11.-21.05.02	29,2	18.-25.04.01	1,0	04.-11.05.02	15,9
07.-14.05.01	6,9	14.-18.06.02	23,1	25.04.-02.05.01	-0,9	11.-18.05.02	15,6
14.-21.05.01	6,0	18.-21.06.02	21,9	02.-07.05.01	-2,2	18.-28.05.02	4,5
21.-28.05.01	5,1	21.-28.06.02	21,0	07.-14.05.01	2,6	28.05.-04.06.02	9,1
28.05.-04.06.01	6,9	28.06.-05.07.02	29,3	14.-21.05.01	3,5	04.-11.06.02	6,6
04.-06.06.01	5,1	05.-12.07.02	17,0	21.-28.05.01	2,7	11.-18.06.02	9,4
06.-13.06.01	3,6	12.-16.07.02	18,0	28.05.-04.06.01	0,9	18.-28.06.02	-10,6
13.-20.06.01	3,7			04.-06.06.01	-1,1	28.06.-05.07.02	2,8
20.-27.06.01	1,9			06.-13.06.01	-1,3	05.-12.07.02	2,8
27.06.-05.07.01	1,9			13.-20.06.01	-7,1	12.-16.07.02	11,9
				20.-27.06.01	-1,4		

**Feldversuch mit Material RCL 1: Spurenelemente - Schwer-, Leicht- und Halbmetalle**

leere Felder = kleiner Bestimmungsgrenze; Mischproben

RCL 1 - Datum	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]
11.10.-20.10.00			1,2			5,3		1,6
21.10.-24.10.00	0,08		1,7	1,7		5,6	0,09	1,5
25.10.-03.11.00			1,1	0,9		19,2	0,04	2,4
04.11.-19.11.00			0,9			7,8		3,1
20.11.-30.11.00			0,9			6,7		3,9
01.12.-09.12.00			1,0	1,3		8,3		4,4
10.12.00-05.01.01			1,8	0,6		12,8		5,4
06.01.-30.01.01			1,0	3,0		15,2		4,3
31.01.-09.03.01			0,9	0,9		28,9		2,4
10.03.-03.04.01			1,0	1,0		35,1		2,5
04.04.-01.05.01	0,10	0,7	1,7	5,1		32,3	0,05	2,6
02.05.-03.06.01		0,6	1,8	0,6		36,4		2,5
04.06.-07.08.01	0,23	0,9	3,2	0,8		20,9	0,07	2,0
08.08.-28.08.01			1,3			9,4		2,7
29.08.-01.10.01			1,5			28,1		3,8
02.10.-30.10.01			1,7			38,6		3,8
31.10.-16.12.01	0,05		1,4			29,6	0,05	3,1
17.12.-30.12.01	0,70		2,0	1,3		21,0	0,55	1,7
31.12.01-28.01.02	0,23		1,7			17,7	0,16	1,4
29.01.-25.02.02	0,26		1,9			18,0	0,19	1,2
26.02.-23.03.02	0,16		3,1	0,7		17,8	0,10	1,0
24.03.-06.04.02	0,18	0,7	3,4	1,4		35,0	0,06	1,2
07.04.-20.04.02	0,17	0,6	3,4	0,8		16,5	0,06	1,0
21.04.-04.05.02	0,16	0,7	3,5	0,9		20,5	0,07	1,1
05.05.-02.06.02		0,7	2,9			20,3		1,2
03.06.-18.06.02	0,28	0,8	3,5	0,7		15,8	0,17	1,4
19.06.-28.06.02	0,14	0,8	3,1	0,5		13,4	0,11	1,4
29.06.-09.07.02	0,12	0,9	2,7	0,7		11,2	0,05	1,3
10.07.-16.07.02	0,19	0,9	2,4	0,7		13,2	0,05	1,4
RCL 1 - Datum	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
11.10.-20.10.00	3		1,5	3		1,9	0,05	0,7
21.10.-24.10.00	4	0,6	2,2	3		2,3	0,06	0,7
25.10.-03.11.00	9	4,8	1,6	20		2,3	0,05	
04.11.-19.11.00	6		1,5	4		1,3		
20.11.-30.11.00	6	1,8	1,4	5		1,9		
01.12.-09.12.00	5		1,2	4		1,4		
10.12.00-05.01.01	7	1,3	1,3	8		0,8	0,09	
06.01.-30.01.01	25	0,8	1,1	33		3,1	0,28	
31.01.-09.03.01	20	0,6	2,0	20		2,5	0,24	
10.03.-03.04.01	11	1,1	3,3	8		3,1		
04.04.-01.05.01	10	0,9	6,2	3		3,4		0,6
02.05.-03.06.01	7	0,6	9,2	8		3,3		
04.06.-07.08.01	4	1,0	8,7	3		4,1		
08.08.-28.08.01	4		7,3	2		4,2		
29.08.-01.10.01	5		8,9	3		3,9		
02.10.-30.10.01	6		12,2	2		3,5		
31.10.-16.12.01	4		11,4	6		3,2		1,1
17.12.-30.12.01	6	15,1	15,6	8		3,6		1,7
31.12.01-28.01.02	5	3,8	13,8	2		2,6		0,9
29.01.-25.02.02	5	6,3	12,8	2		2,9		0,7
26.02.-23.03.02	6	3,5	13,7	1		2,8		
24.03.-06.04.02	5	3,9	14,6			3,1		0,8
07.04.-20.04.02	4	3,0	14,0			2,9		0,8
21.04.-04.05.02	5	2,8	14,7			2,7		1,3
05.05.-02.06.02	4	1,3	13,4	5		2,8		1,3
03.06.-18.06.02	7	11,5	12,6			3,7		1,2
19.06.-28.06.02	4	4,7	13,8			3,6		4,0
29.06.-09.07.02	7	2,6	13,4			3,7		1,4
10.07.-16.07.02	4	2,1	11,5			3,9		4,3

**Feldversuch mit Material RCL 2: Spurenelemente - Schwer-, Leicht- und Halbmetalle**

leere Felder = kleiner Bestimmungsgrenze; Mischproben

RCL 2 - Datum	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]
11.10.-18.10.00			1,7	0,7		7,6		2,0
19.10.-24.10.00	0,08		2,5	1,6		10,4		2,5
25.10.-03.11.00	0,26		2,4			11,2	0,06	2,4
04.11.-20.11.00	0,08		2,3			11,7		3,3
21.11.-30.11.00	0,04		2,0			11,9	0,03	4,4
01.12.-11.12.00	0,08		2,2			16,4		5,3
12.12.00-05.01.01	0,10		2,2			27,7		5,0
06.01.-30.01.01	0,14		2,1			10,9		1,7
31.01.-09.03.01	0,09		8,3			19,0		2,8
10.03.-03.04.01	0,20	0,6	17,5			27,9	0,07	3,4
04.04.-01.05.01	0,24	1,2	21,7	0,6		25,6	0,12	3,2
02.05.-03.06.01	0,56	0,9	31,9			26,2	0,27	3,8
04.06.-07.08.01	0,35	1,4	18,0			24,1	0,21	3,3
08.08.-28.08.01	0,20	1,2	20,8	1,0		44,4	0,12	7,3
29.08.-01.10.01	0,09	1,2	51,9			55,9	0,03	7,9
02.10.-30.10.01	0,21	1,3	92,7			52,7		6,4
31.10.-27.11.01	0,79	1,1	57,6			53,2	0,51	6,3
28.11.-30.12.01	3,16	0,9	112,0			27,3	0,16	3,0
31.12.01-28.01.02	2,91	0,8	103,0			24,2	0,04	2,8
29.01.-25.02.02	6,43	0,7	95,0			21,3	0,08	2,9
26.02.-23.03.02	7,58	0,6	82,3			20,5	0,20	2,3
24.03.-06.04.02	7,04	1,0	91,7	0,9		22,6		2,7
07.04.-20.04.02	6,03	1,2	83,8	1,0		24,8		2,9
21.04.-04.05.02	6,36	1,1	87,9	0,8		32,2		3,1
05.05.-18.05.02	7,80	1,1	79,9	2,3		31,5	0,56	3,6
19.05.-28.05.02	5,51	1,3	67,9	0,7		33,2		3,1
29.05.-11.06.02	2,83	1,3	57,5	1,8		33,4	0,17	3,0
12.06.-28.06.02	4,41	1,4	66,4	0,9		42,4	0,12	4,1
29.06.-09.07.02	3,87	1,5	64,0	1,4		48,6	0,06	4,5
10.07.-16.07.02	4,71	1,4	62,8	1,8		50,7	0,30	5,5
RCL 2 - Datum	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
11.10.-18.10.00	6		5,0	4		1,2	0,05	0,7
19.10.-24.10.00	9	0,9	6,0	4		1,6	0,03	0,6
25.10.-03.11.00	6	4,5	5,7	4		2,0	0,03	
04.11.-20.11.00	5		6,8	3		1,3		
21.11.-30.11.00	4		6,4	4		1,4		
01.12.-11.12.00	6	0,6	6,6	5		1,2		
12.12.00-05.01.01	5		6,6	4		1,0		
06.01.-30.01.01	6		6,0	2		1,1		
31.01.-09.03.01	7		20,1	4		2,1		
10.03.-03.04.01	8	3,1	29,0	4		2,9		
04.04.-01.05.01	8	3,5	28,5	9		3,7		
02.05.-03.06.01	10	6,8	29,7	7		3,6		
04.06.-07.08.01	11	6,3	37,1	3		4,3		
08.08.-28.08.01	9	1,8	34,7	3		4,4		
29.08.-01.10.01	13		30,2	4		3,5		
02.10.-30.10.01	13		27,2	3	5	2,7		
31.10.-27.11.01	16	8,1	27,0	4		3,4		
28.11.-30.12.01	16	4,9	15,9	4		3,5		1,1
31.12.01-28.01.02	14	1,7	14,1	3		3,2		0,8
29.01.-25.02.02	16	4,8	10,7	5		5,6		0,7
26.02.-23.03.02	14	13,3	11,0	4		6,5		0,6
24.03.-06.04.02	14	4,4	11,6	2	7	5,7		
07.04.-20.04.02	26	11,7	15,2	1	8	5,3		0,5
21.04.-04.05.02	16	2,6	15,3	2	7	5,1		1,3
05.05.-18.05.02	17	34,0	13,0	3	6	6,6		1,3
19.05.-28.05.02	15	3,7	18,3	1	6	4,6		1,5
29.05.-11.06.02	17	7,6	20,5		6	2,9		1,0
12.06.-28.06.02	19	7,2	21,8	2	7	3,9		1,6
29.06.-09.07.02	18	4,7	24,0	2	7	3,7		2,5
10.07.-16.07.02	19	18,8	20,4	4	7	4,7		2,6

**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Aufsummierte Massenanteile, die sich bis zur Einstellung der Feldversuche bei einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 1,17 (Becken RCL 2) ergeben haben**

<b>Material RCL 1</b>									
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]
1,17	44,3	40,5	136,5	83,5	3,0	55,1	6,1	0,1	0,2
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>
Wasser/Feststoff-Verhältnis	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]	Mo [µg/kg]
1,17	2,1	1,0	0,0	26,1	0,1	3,0	9,3	2,8	9,7
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>	<b>RCL 1</b>				
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]				
1,17	8,3	0,0	3,5	0,0	0,6				

<b>Material RCL 2</b>									
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]
1,17	48,4	27,5	48,5	109,6	22,4	22,3	2,4	2,4	0,9
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>
Wasser/Feststoff-Verhältnis	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]	Mo [µg/kg]
1,17	57,5	0,2	0,0	33,4	0,1	4,5	13,9	4,8	22,1
<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>	<b>RCL 2</b>				
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]				
1,17	4,4	1,2	4,0	0,0	0,5				

**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Regenwasser**

leere Felder = nicht bestimmt

Regenwasser												Fehler Ionenbilanz [%]
Datum	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]		
31.01-14.02.01	4,7	20,5	1,3	1,1	2,4	3,2	0,9	0,1	0,6			14,6
14.02.-06.03.01	4,3	52,3	1,9	1,2	2,1	3,3	2,4	0,2	1,0	0,2		55,2
06.03.-04.04.01	4,7	19,7	0,2	2,4	2,5	3,1	0,5	0,1	0,5	0,1		78,9
05.04.-07.05.01				1,1	2,2	3,1	0,9	0,1	0,6	0,2		
07.05.-06.06.01				0,8	4,4	4,2	1,0	0,2	1,3	0,2		
06.06.-05.07.01		24	2,3	2,2	3,0	2,8	0,5	0,0	0,7	0,2		4,0
05.07.-08.08.01	5,1	17		0,7	0,7	3,2	0,7	0,0	1,1	0,2		
08.08.-10.10.01	4,6	22	1,1	0,8	1,6	2,5	0,8		0,8	0,2		52,6
10.10.-17.12.01	5,0	6	8,0	0,3	0,6	1,5	0,2	0,1	0,2	0,0		68,1
17.12.01-26.2.02				2,0	0,9	2,6	1,8	0,1	0,7	0,1		
26.02.-23.04.02	5,2	26		0,9	4,9	3,5	0,6	0,1	0,9			

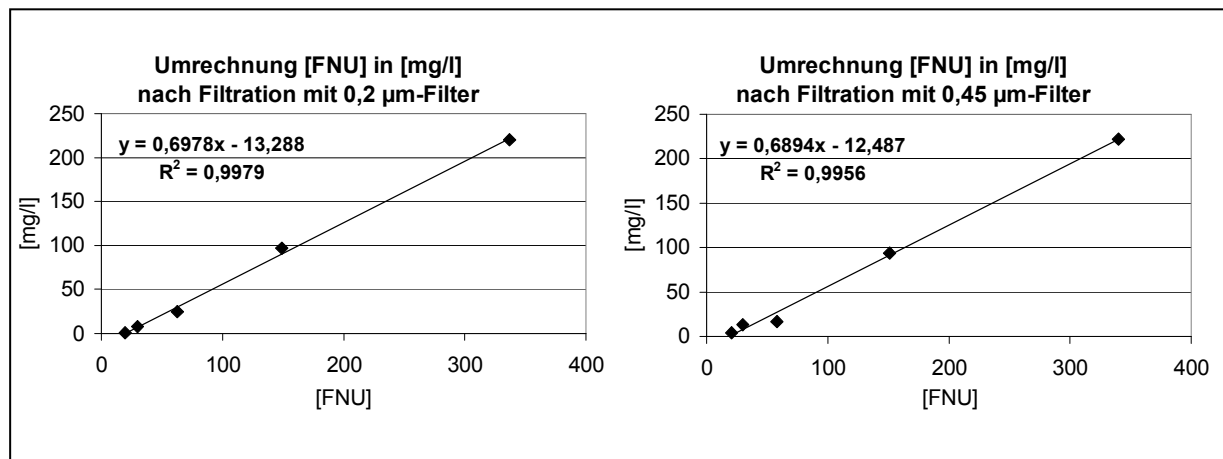
Regenwasser	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]
Datum									
26.02.-23.04.02	<0,04	0,6	0,8	2,2	<0,5	<1,5	<0,03	<0,5	3,6

Regenwasser	Mn [µg/l]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]	Ba [µg/l]
Datum								
26.02.-23.04.02	9,0	0,9	< 1,0	<5,0	0,10	<0,03	<0,5	< 0,5

**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Umrechnung Trübungswerte in Partikelkonzentration**

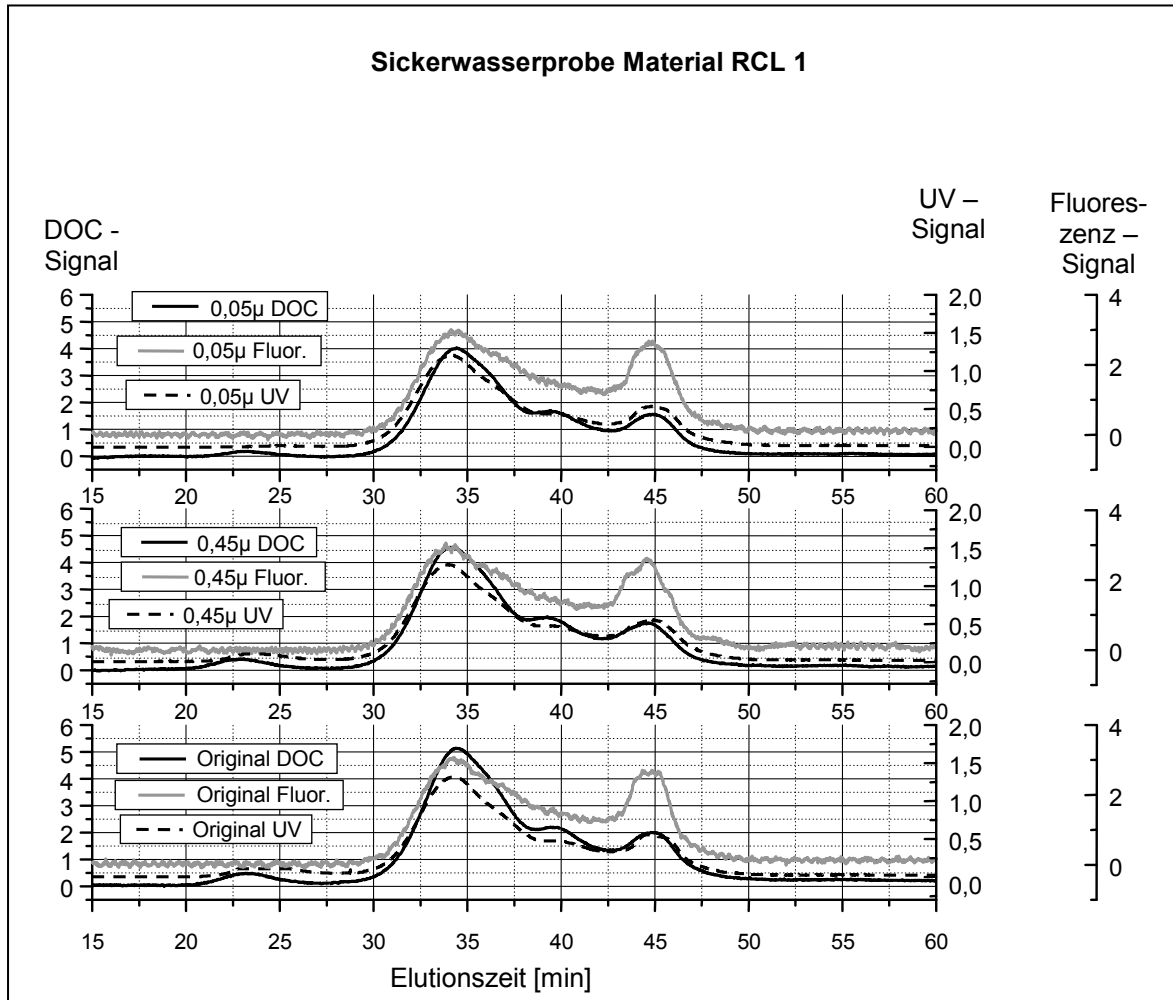
Filtration mit 0,2 µm-Filter		Filtration mit 0,45 µm-Filter	
Durchschnittlicher Trübungswert aus 3 Messungen [FNU]	Gewicht der filtrierten Partikel > 0,2 µm [mg/l]	Durchschnittlicher Trübungswert aus 3 Messungen [FNU]	Gewicht der filtrierten Partikel > 0,45 µm [mg/l]
337	220	340	222
149	97	151	94
62,5	25	57,9	17
29,7	8	29,6	13
19,3	0,5	20,5	4,5



**Untersuchungen von Sickerwasserproben aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 zur Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen aus den Recycling-Materialien** (SEC (size exclusion chromatography)-Messungen wurden freundlicherweise durchgeführt von Dr. Ch. Specht, Dipl. Ing. G. Metreveli, Dr. G. Abbt-Braun (Engler-Bunte Institut, Universität Karlsruhe))

0,05 $\mu$  = Ergebnis nach Filtration 0,05  $\mu$ m  
 0,45 $\mu$  = Ergebnis nach Filtration 0,45  $\mu$ m  
 Original = Ergebnis ohne Filtration

DOC = DOC-Messwert  
 Fluor. = Fluoreszenz-Messwert  
 UV = UV-Messwert



**Untersuchungen von Sickerwasserproben aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 zur Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen aus den Recycling-Materialien** (SEC (size exclusion chromatography)-Messungen wurden freundlicherweise durchgeführt von Dr. Ch. Specht, Dipl. Ing. G. Metreveli, Dr. G. Abbt-Braun (Engler-Bunte Institut, Universität Karlsruhe))

0,05 $\mu$  = Ergebnis nach Filtration 0,05  $\mu$ m

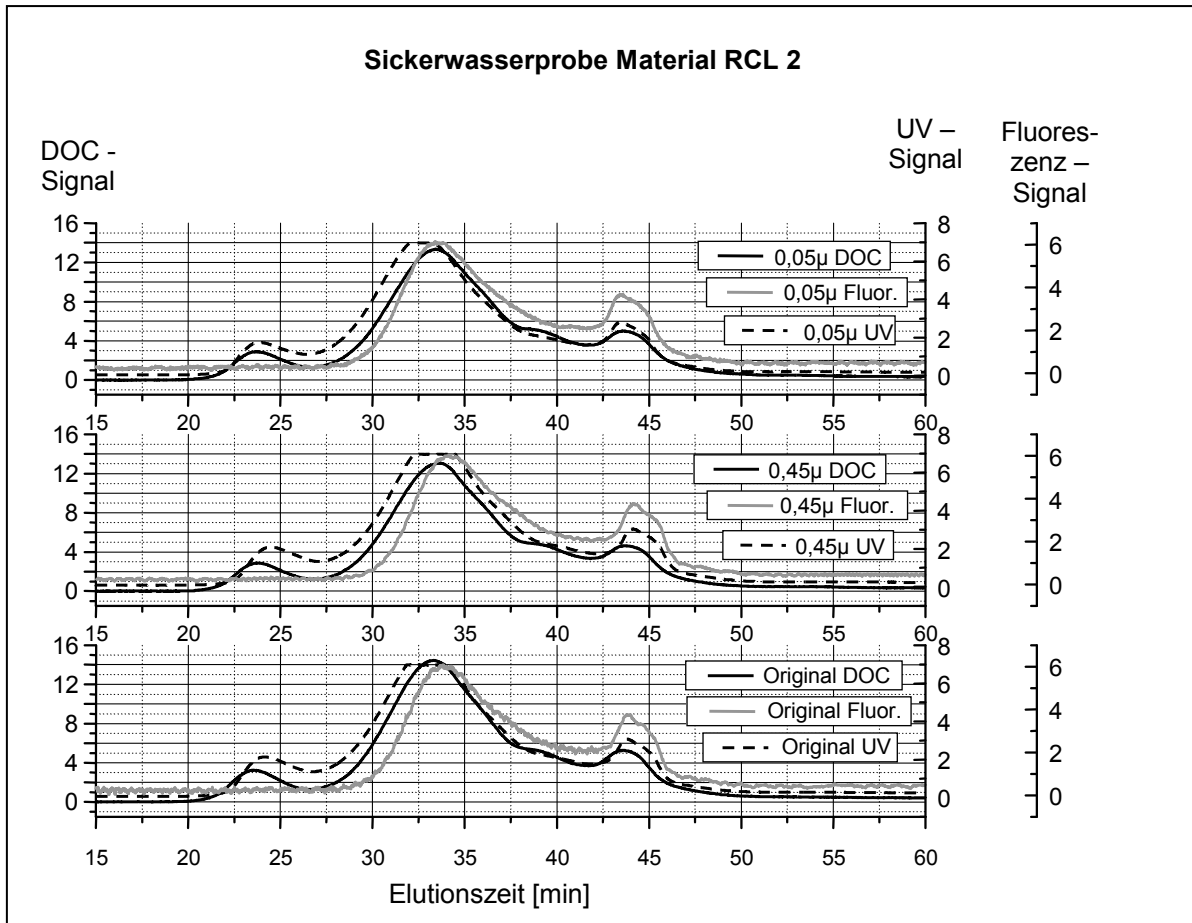
0,45 $\mu$  = Ergebnis nach Filtration 0,45  $\mu$ m

Original = Ergebnis ohne Filtration

DOC = DOC-Messwert

Fluor. = Fluoreszenz-Messwert

UV = UV-Messwert

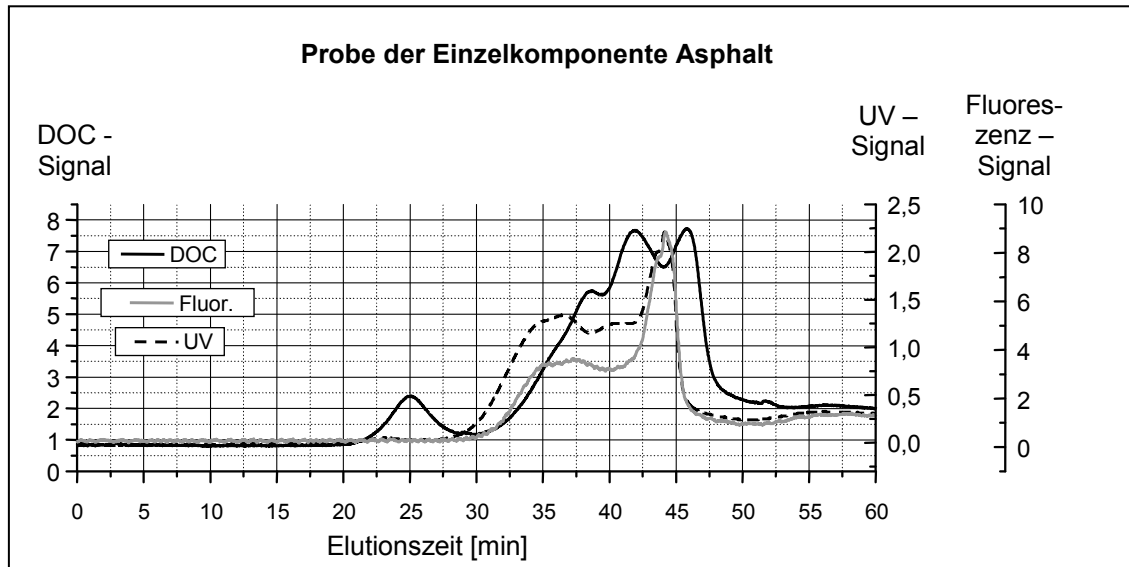


**Untersuchung der Probe aus dem Laborversuch mit der Einzelkomponente Asphalt zur Identifikation der möglichen Quelle für die Freisetzung huminstoffähnlicher Substanzen aus den Recycling-Materialien** (SEC (size exclusion chromatography)-Messungen wurden freundlicherweise durchgeführt von Dr. Ch. Specht, Dipl. Ing. G. Metreveli, Dr. G. Abbt-Braun (Engler-Bunte Institut, Universität Karlsruhe))

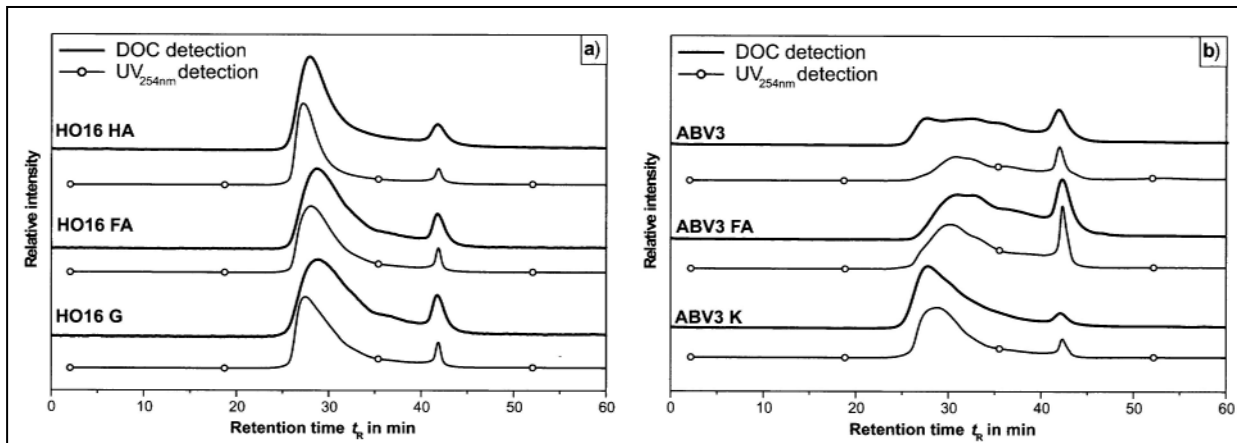
DOC = DOC-Messwert

Fluor. = Fluoreszenz-Messwert

UV = UV-Messwert



**Zum Vergleich mit den Chromatogrammen aus dem Feldversuch (Sickerwasserprobe Becken RCL 1 und 2) und dem Laborversuch (Probe mit der Einzelkomponente Asphalt):**



DOC- und UV-Chromatogramme nach Size-Exclusion Chromatographie (SEC) mit UV (254 nm) und DOC-Detektion verschiedener ROS (refractory organic substances)-Fraktionen (FRIMMEL et al. 2002)

- a) HO16: Wasserprobe vom Hohlohsee (Moorsee, Schwarzwald)  
 HA: Huminsäurefraktion (humic acids)  
 FA: Fulvinsäurefraktion (fulvic acids)  
 G: filtriertes Konzentrat

- b) ABV3: Abwasserprobe (Klärwerk)  
 FA: Fulvinsäurefraktion (fulvic acids)  
 K: filtriertes Konzentrat

**Unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Probenaufbereitung hinsichtlich Filtration (0,45 µm) sowie Ansäuern mit HNO<sub>3</sub> für Sickerwasserproben aus 3 Zeiträumen bei den Feldversuchen mit den Materialien RCL 1 und 2: Konzentration Spurenelemente**

<b>Material RCL 1</b>	Al	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Fe	Co	Cu
Zeitraum / Art der Probenaufbereitung	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Sickerwasserprobe aus Zeitraum April/Mai 2002									
filtriert und nicht angesäuert	<0,04	0,6	3,8	<0,5	<0,5	20,6	<0,03	1,1	6,3
filtriert und "normal" angesäuert	0,16	0,7	3,5	0,9	<0,5	20,5	0,07	1,1	4,9
angesäuert vor Filtration	2,20	0,6	4,0	2,2	<0,5	20,4	1,38	9,5	12,1
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juni 2002									
filtriert und nicht angesäuert	<0,04	0,8	3,4	0,6	<0,5	13,7	<0,03	1,2	7,4
filtriert und "normal" angesäuert	0,14	0,8	3,1	0,5	<0,5	13,4	0,11	1,4	4,1
angesäuert vor Filtration	2,18	0,8	3,6	3,6	<0,5	17,3	1,84	2,2	6,8
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juli 2002									
filtriert und nicht angesäuert	<0,04	0,8	2,4	<0,5	<0,5	31,1	<0,03	1,3	5,2
filtriert und "normal" angesäuert	0,19	0,9	2,4	0,7	<0,5	13,2	0,05	1,4	4,3
angesäuert vor Filtration	0,39	0,8	2,7	1,3	<0,5	14,2	0,30	1,5	5,4

<b>Material RCL 1</b>	Mn	Mo	Ni	Se	Si	Zn	Sn	Ba
Zeitraum / Art der Probenaufbereitung	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Sickerwasserprobe aus Zeitraum April/Mai 2002								
filtriert und nicht angesäuert	<0,5	14,2	1,2	<5,0	2,8	<0,03	0,5	12,5
filtriert und "normal" angesäuert	2,8	14,7	< 1,0	<5,0	2,7	<0,03	1,3	10,9
angesäuert vor Filtration	98,7	9,6	< 1,0	<5,0	4,5	<0,03	4,0	60,4
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juni 2002								
filtriert und nicht angesäuert	<0,5	13,9	1,1	<5,0	3,5	<0,03	0,8	17,2
filtriert und "normal" angesäuert	4,7	13,8	< 1,0	<5,0	3,6	<0,03	4,0	11,6
angesäuert vor Filtration	72,3	11,3	2,4	<5,0	6,4	<0,03	6,8	30,4
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juli 2002								
filtriert und nicht angesäuert	<0,5	11,4	1,2	<5,0	3,6	<0,03	0,6	19,8
filtriert und "normal" angesäuert	2,1	11,5	< 1,0	<5,0	3,9	<0,03	4,3	16,1
angesäuert vor Filtration	14,7	10,8	< 1,0	<5,0	3,8	<0,03	3,0	34,8

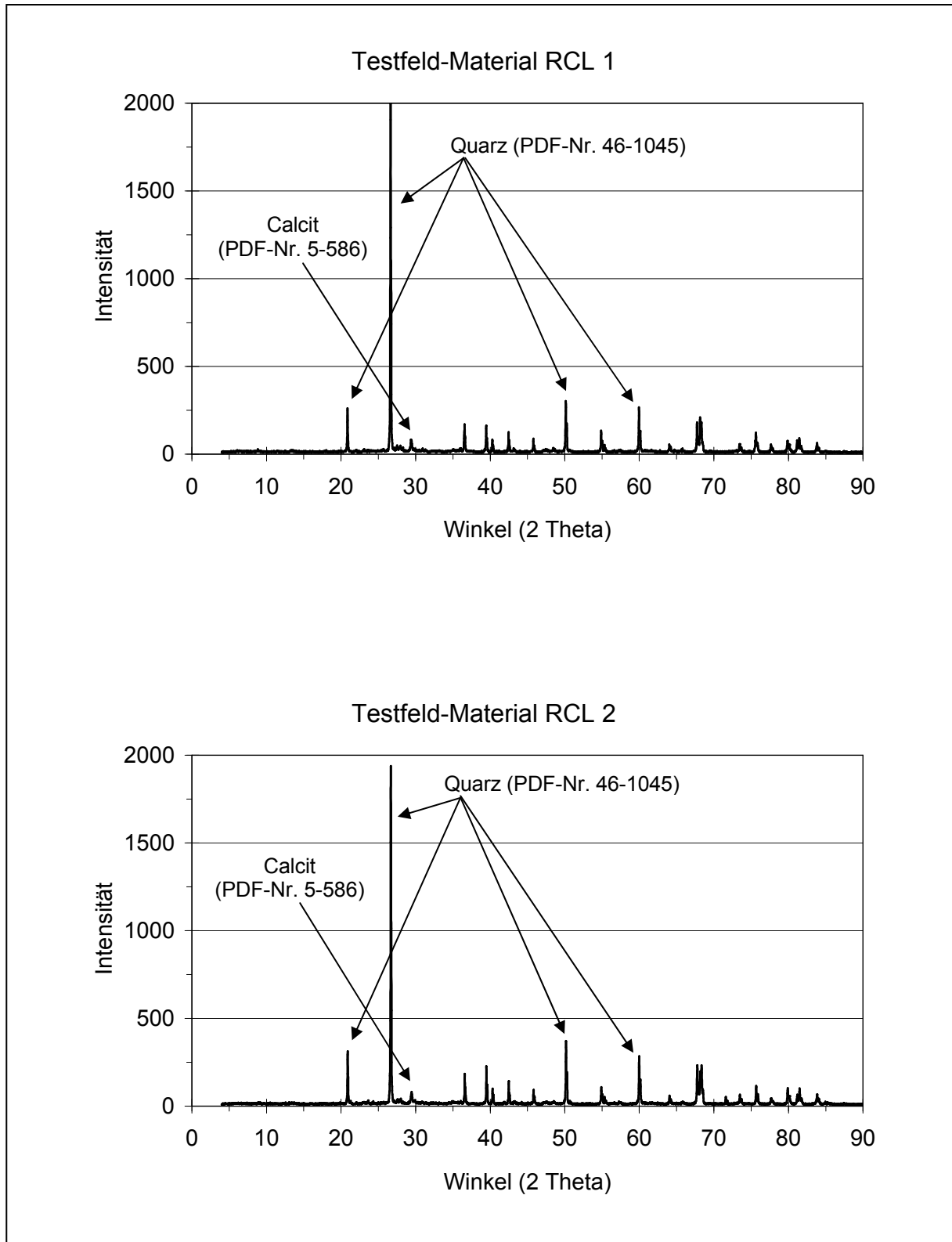
<b>Material RCL 2</b>	Al	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Fe	Co	Cu
Zeitraum / Art der Probenaufbereitung	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Sickerwasserprobe aus Zeitraum April/Mai 2002									
filtriert und nicht angesäuert	5,25	1,2	95,5	3,5	0,9	32,5	0,12	3,0	15,6
filtriert und "normal" angesäuert	6,36	1,1	87,9	0,8	<0,5	32,2	<0,03	3,1	16,4
angesäuert vor Filtration	8,04	1,0	76,3	41,3	<0,5	26,2	0,85	5,6	22,1
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juni 2002									
filtriert und nicht angesäuert	3,99	1,7	76,1	1,0	<0,5	46,7	0,23	4,1	20,9
filtriert und "normal" angesäuert	4,41	1,4	66,4	0,9	<0,5	42,4	0,12	4,1	18,5
angesäuert vor Filtration	10,40	1,3	54,8	11,7	<0,5	50,2	5,09	7,9	25,6
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juli 2002									
filtriert und nicht angesäuert	4,36	1,6	71,6	0,9	<0,5	54,8	0,59	5,4	19,5
filtriert und "normal" angesäuert	4,71	1,4	62,8	1,8	<0,5	50,7	0,30	5,5	18,9
angesäuert vor Filtration	6,49	1,3	57,2	7,8	<0,5	52,3	2,10	7,7	25,1

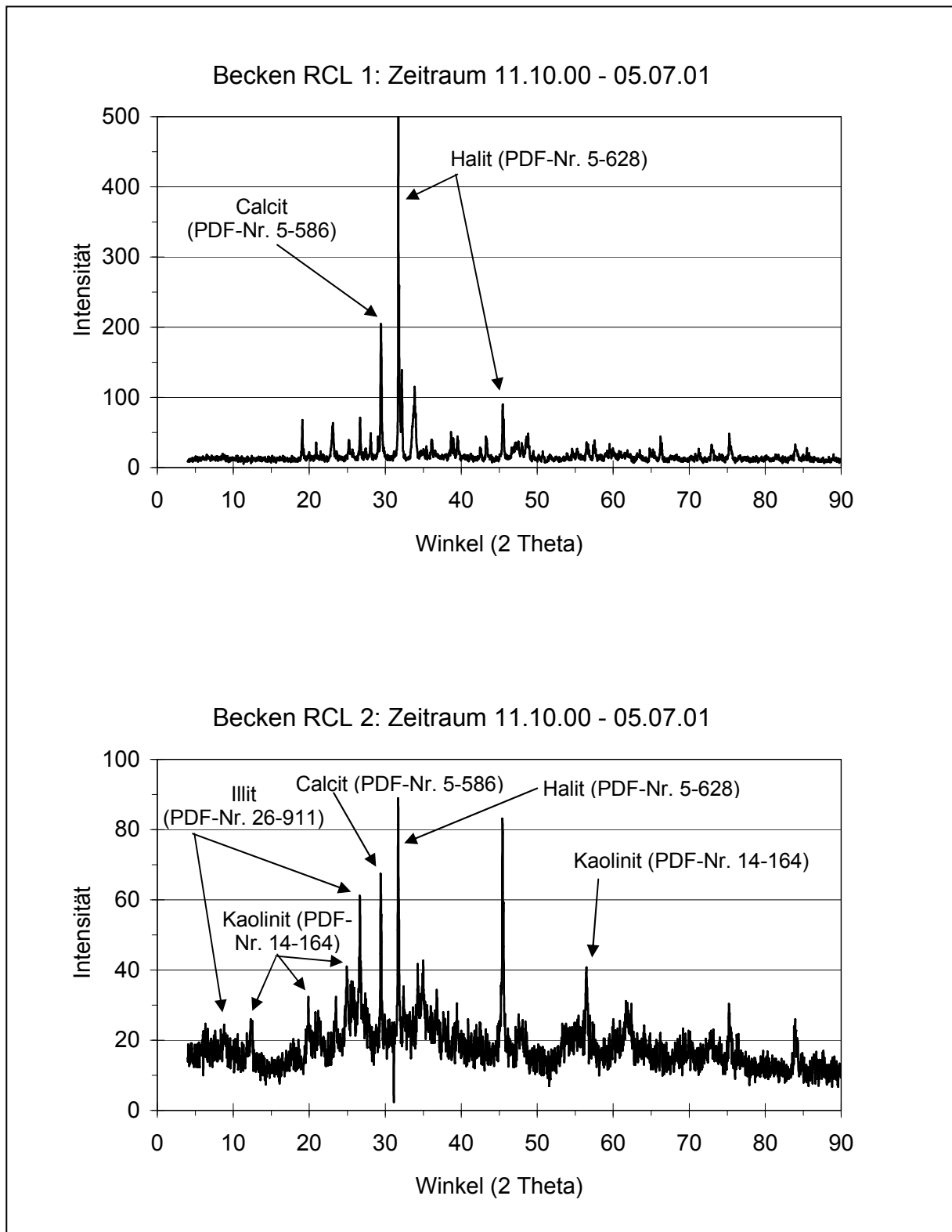
<b>Material RCL 2</b>	Mn	Mo	Ni	Se	Si	Zn	Sn	Ba
Zeitraum / Art der Probenaufbereitung	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Sickerwasserprobe aus Zeitraum April/Mai 2002								
filtriert und nicht angesäuert	2,4	15,4	10,3	7,3	5,1	<0,03	2,1	3,8
filtriert und "normal" angesäuert	2,6	15,3	1,7	7,1	5,1	<0,03	1,3	21,1
angesäuert vor Filtration	147,0	10,6	5,2	<5,0	6,7	<0,03	1,3	22,4
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juni 2002								
filtriert und nicht angesäuert	5,5	23,4	5,6	7,7	4,2	<0,03	2,8	5,4
filtriert und "normal" angesäuert	7,2	21,8	2,1	6,7	3,9	<0,03	1,6	< 0,5
angesäuert vor Filtration	291,0	13,7	13,9	5,2	11,3	<0,03	2,2	61,6
Sickerwasserprobe aus Zeitraum Juli 2002								
filtriert und nicht angesäuert	11,7	21,3	7,0	8,3	5,4	<0,03	3,4	6,3
filtriert und "normal" angesäuert	18,8	20,4	4,4	7,0	4,7	<0,03	2,6	2,2
angesäuert vor Filtration	207,0	14,8	10,2	7,6	6,8	<0,03	2,5	28,2

**Aufgeschlossene Filtrerrückstände von Sickerwasserproben (Zeitraum April/Mai 2002) aus den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 sowie von huminstoffähnlichen Substanzen (Sickerwasserprobe Becken RCL 2), die nach dem Probenansäuern ausgefallen sind:  
Massenanteil Haupt- und Spurenelemente**

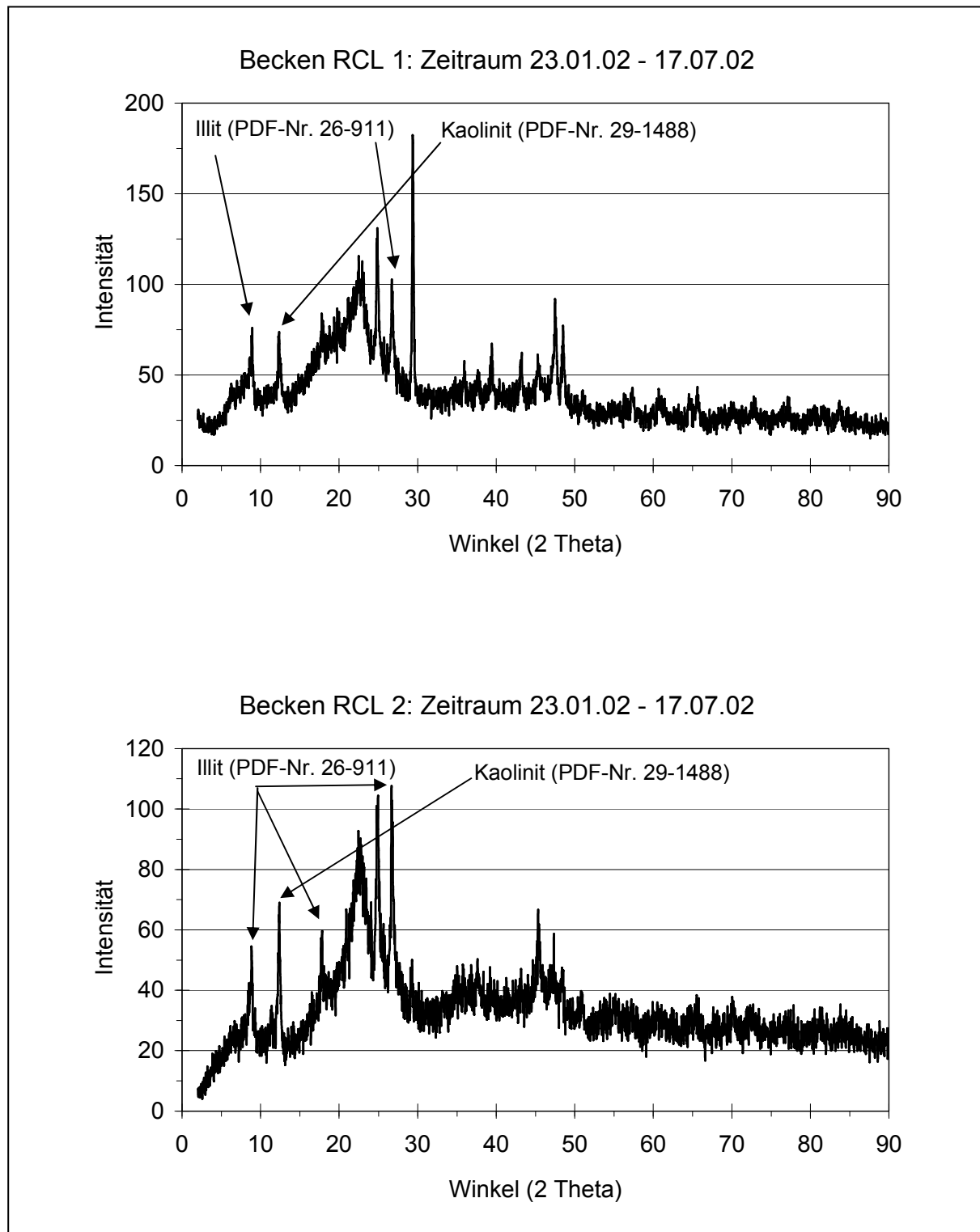
Aufschluss Filtrerrückstand	Sickerwasserprobe Becken <b>RCL 1</b>	Sickerwasserprobe Becken <b>RCL 2</b>	nach Ansäuern ausgefallene huminstoffähnliche Substanzen aus Sickerwasserprobe Becken <b>RCL 2</b>
Na [mg/g]	7	3	10
K [mg/g]	2	3	9
Ca [mg/g]	1	1	
Mg [mg/g]	1	2	1
Al [mg/g]	8	24	23
Fe [mg/g]	14	42	41
Mn [mg/g]	0,3	1	0,5
Si [mg/g]	7	4	21
Zn [µg/g]	97	166	492
Cr [µg/g]	8	82	669
Ni [µg/g]	21	68	65
Pb [µg/g]	28	62	25
Cu [µg/g]	15	58	134
As [µg/g]	14	51	116
Co [µg/g]	5	21	19
Mo [µg/g]		1	449
Sn [µg/g]	3	1	84
Sb [µg/g]		1	11

## Charakterisierung der fein gemahlene Testfeld-Materialien RCL 1 und 2 per Röntgen-Diffraktometrie (XRD)

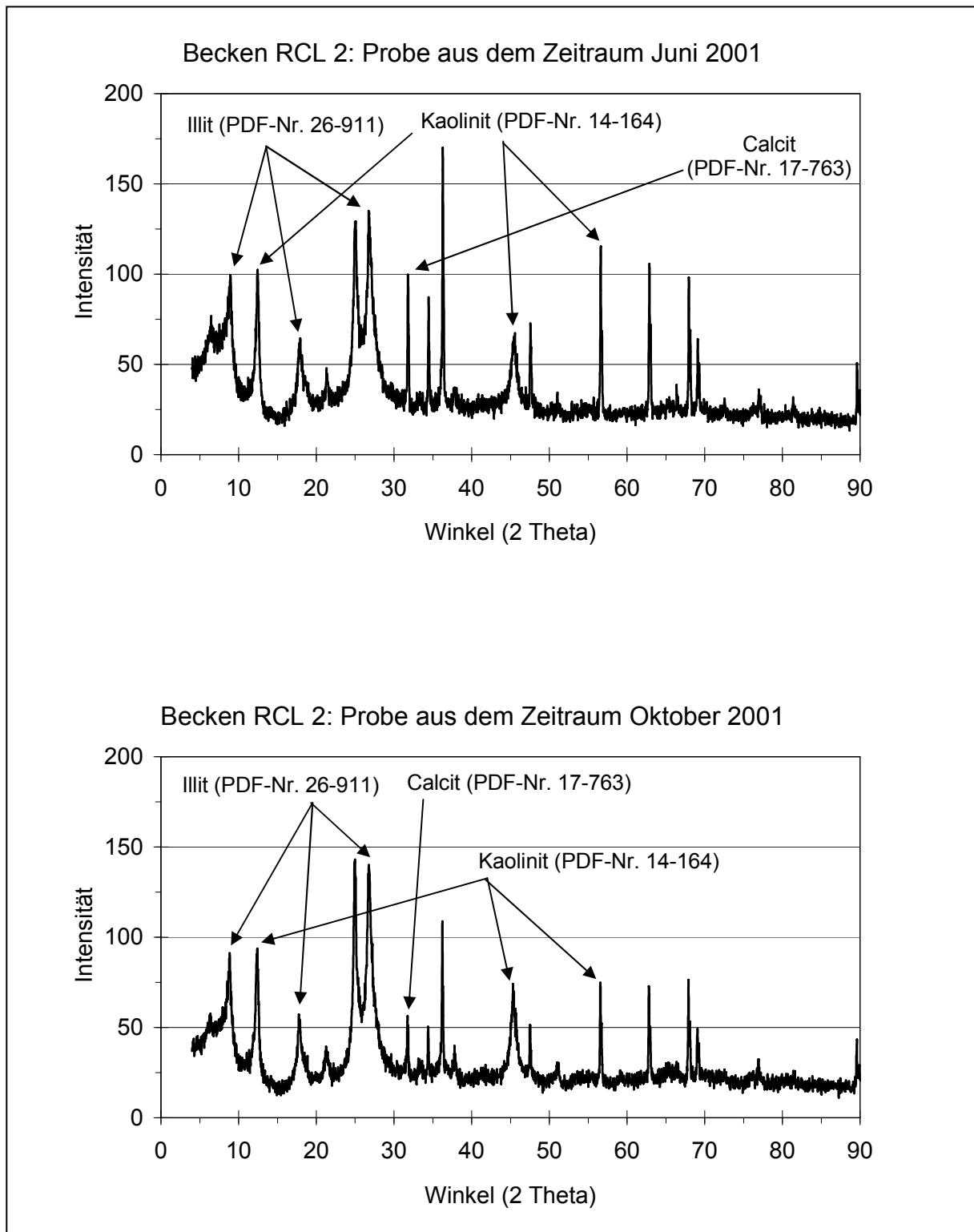


**Charakterisierung der ofengetrockneten, fein gemahlene Rückstände aus der Sammelflasche im Sammelschicht bei den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 per Röntgen-Diffraktometrie (XRD)**

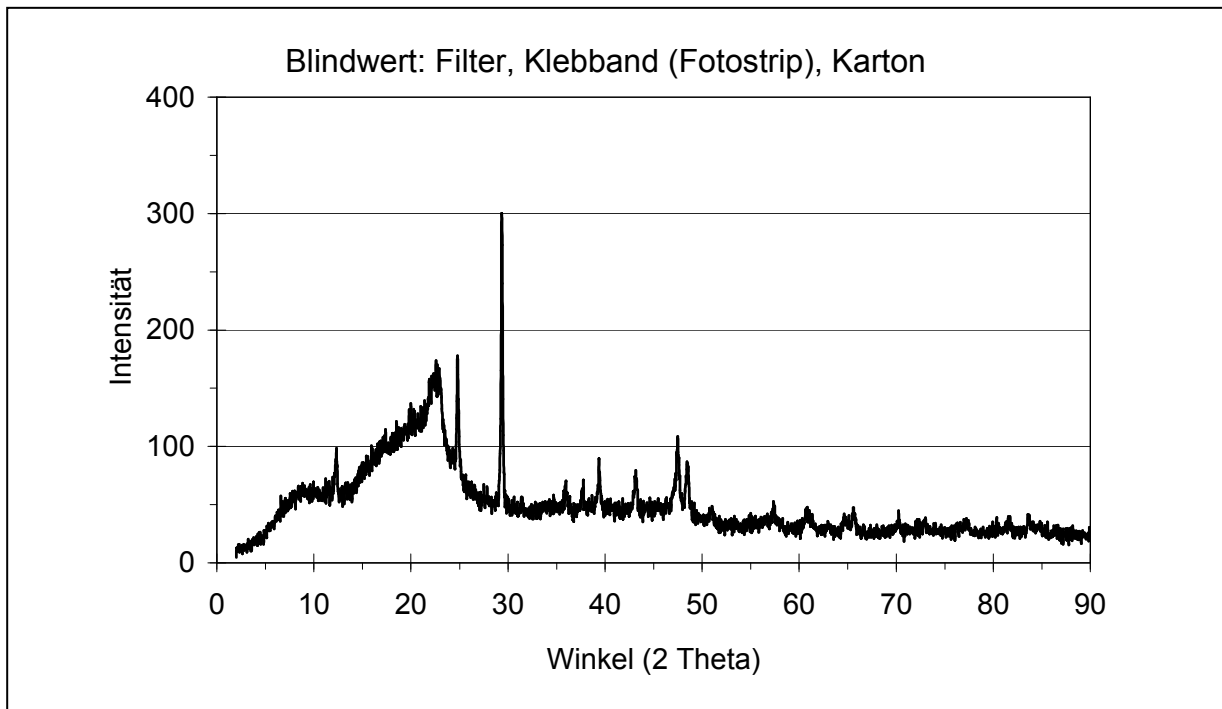
Charakterisierung der Filtrerrückstände nach Filtration des Sickerwassers aus der Sammelflasche im Sammelschacht bei den Feldversuchen mit Material RCL 1 und 2 per Röntgen-Diffraktometrie (XRD); zur Untersuchung wurde der Filter mitsamt Filtrerrückstand mit Klebband (Fotostrip) auf ein Kartonstück geklebt; bei der Ergebnisinterpretation muss dadurch der Blindwert aus Filter, Klebband und Karton berücksichtigt werden



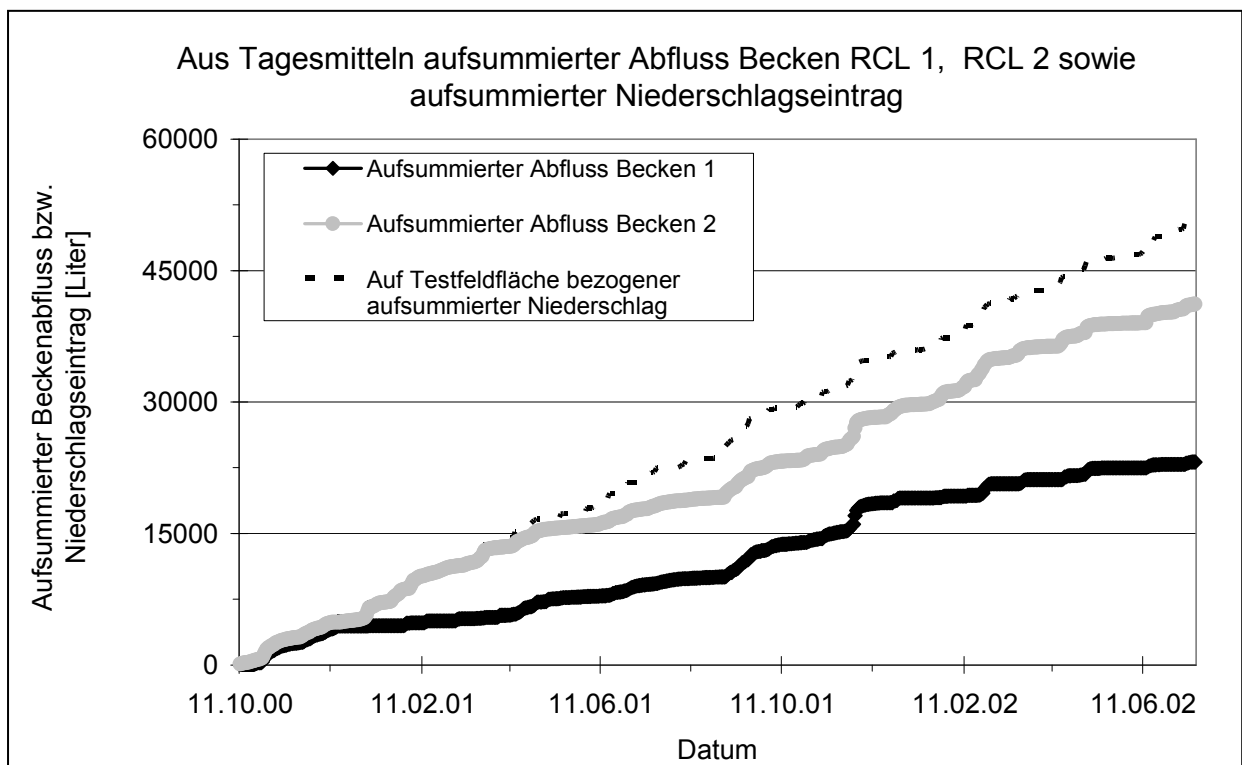
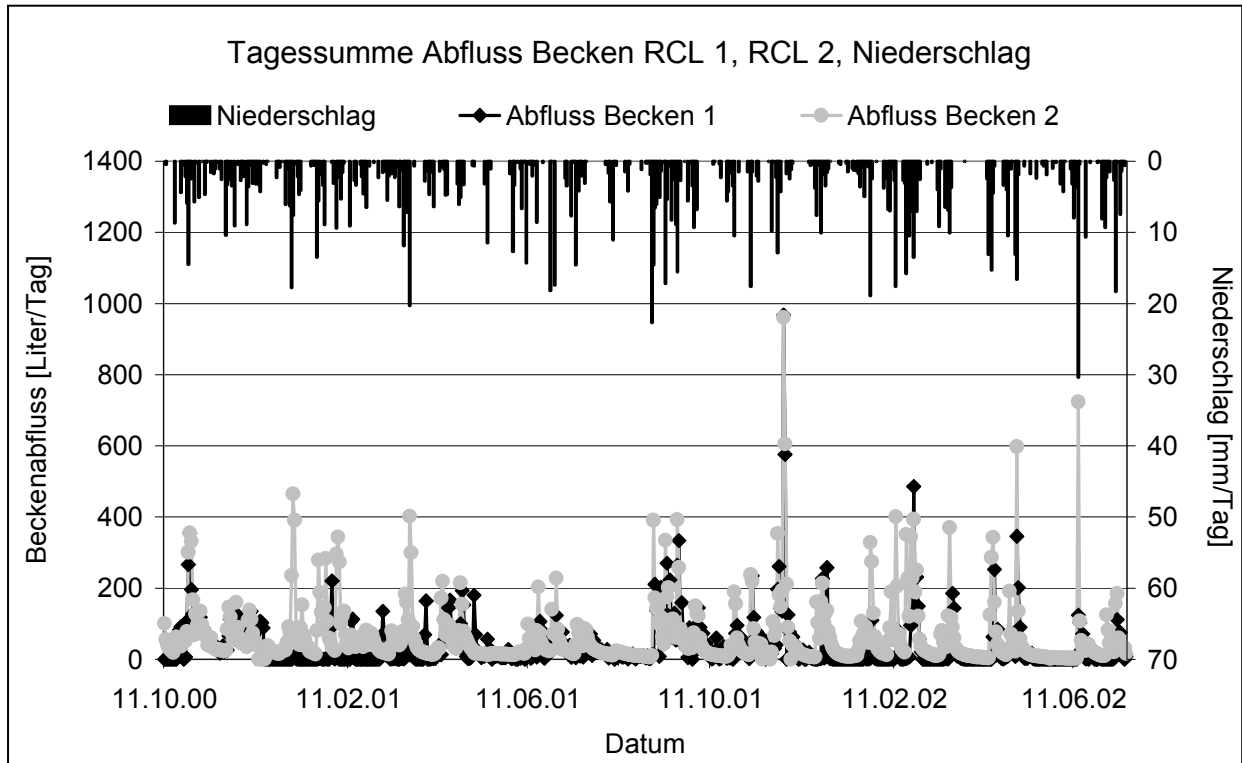
Charakterisierung von Filtrerrückständen nach Filtration von Wasserproben aus Becken RCL 2 (Zeitraum Juni 2001 und Oktober 2001) per Röntgen-Diffraktometrie (XRD); zur Untersuchung wurde der Filter mitsamt Filtrerrückstand mit Klebband (Fotostrip) auf ein Kartonstück geklebt; bei der Ergebnisinterpretation muss dadurch der Blindwert aus Filter, Klebband und Karton berücksichtigt werden



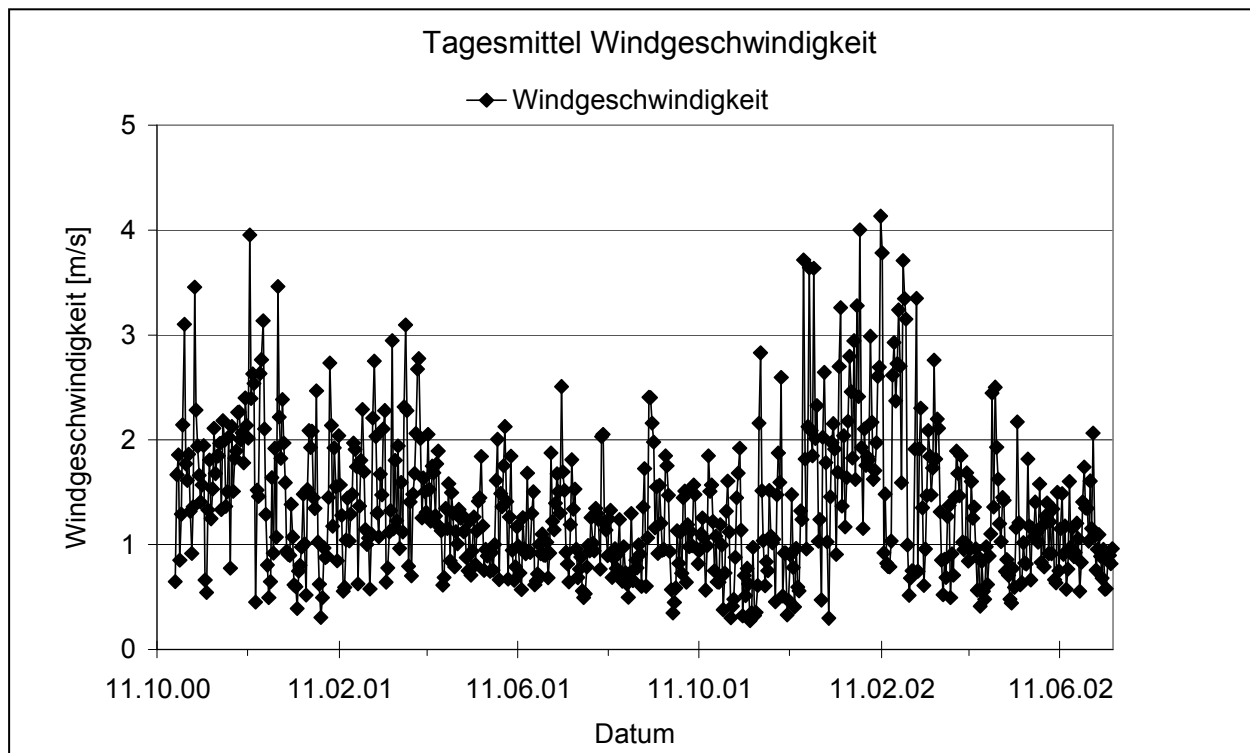
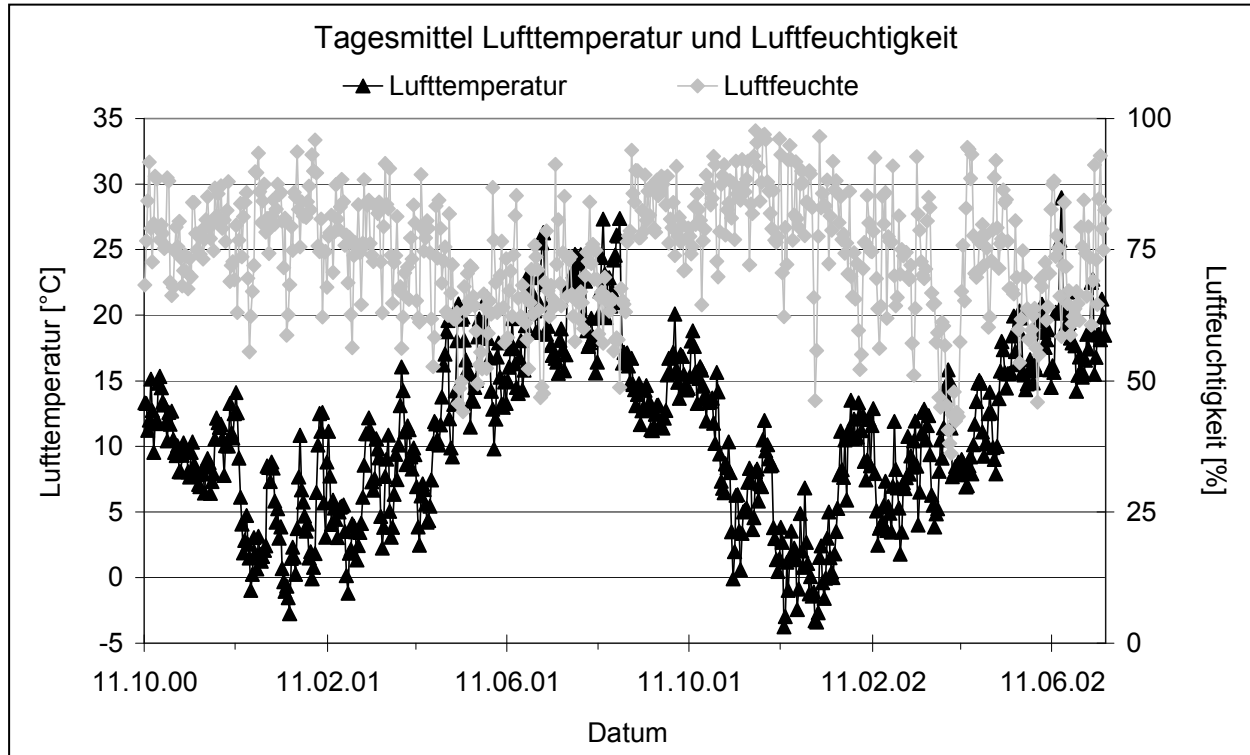
**Ermittlung des Blindwertes aus Filter, Klebband (Fotostrip) und Karton per Röntgen-Diffraktometrie (XRD) zur Berücksichtigung bei der Ergebnisinterpretation in Bezug auf Filterrückstände nach Filtration**



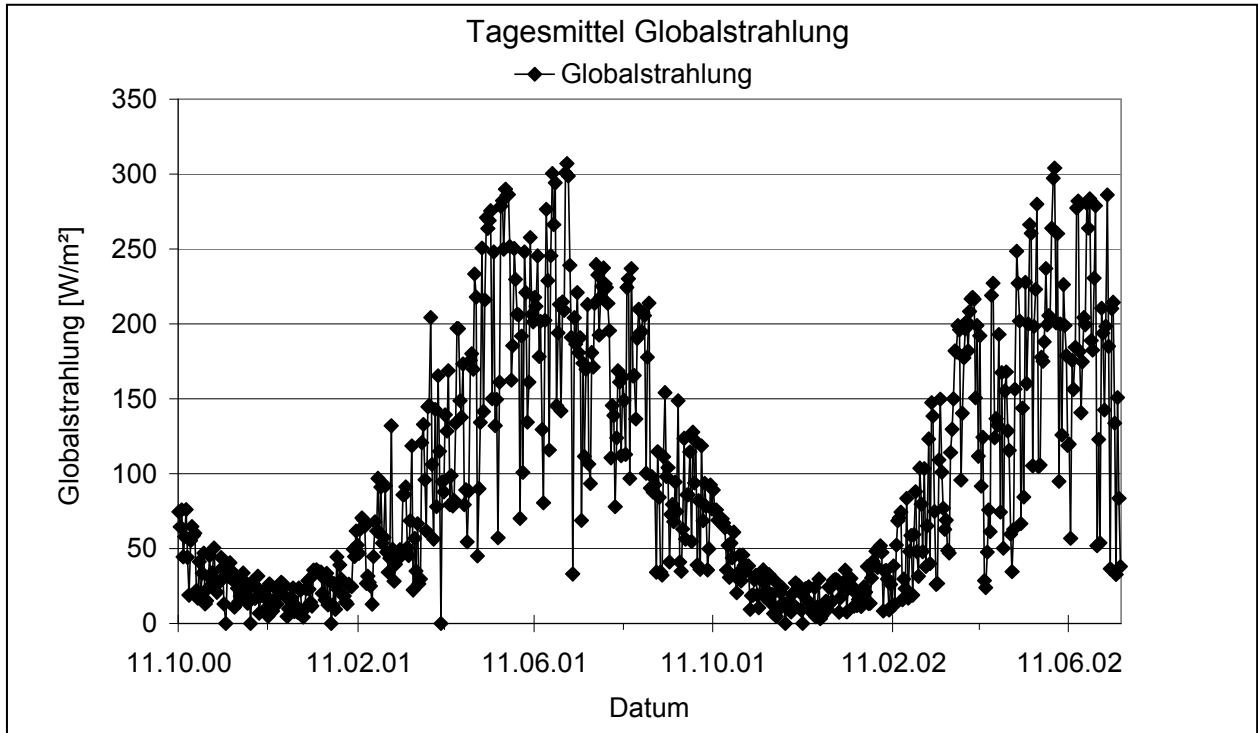
**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Tagessummen Abfluss aus Becken RCL 1 und 2 und Niederschlag**



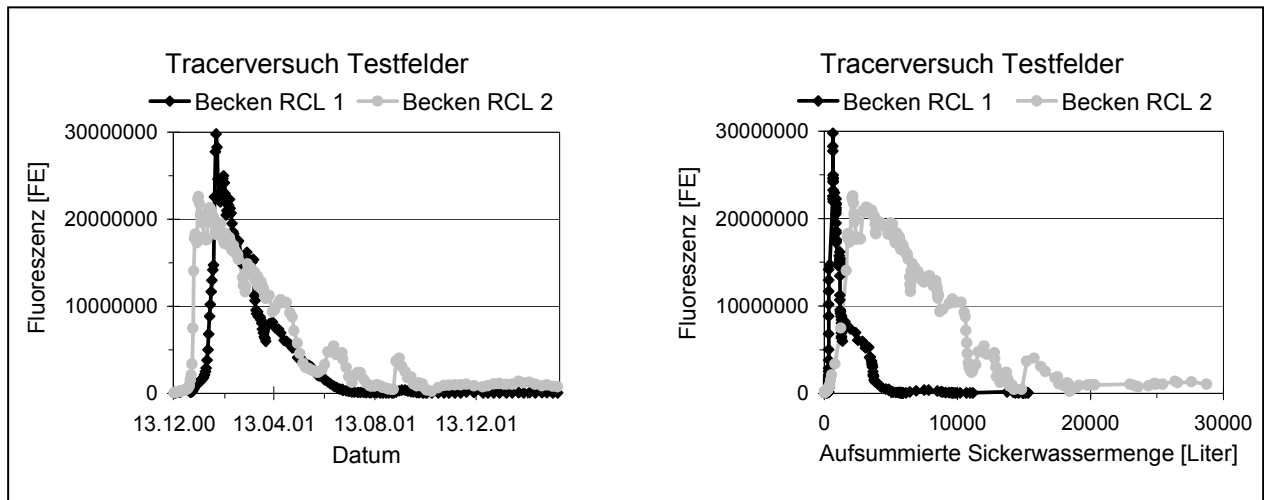
## Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Tagesmittel Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit



Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Tagesmittel Globalstrahlung



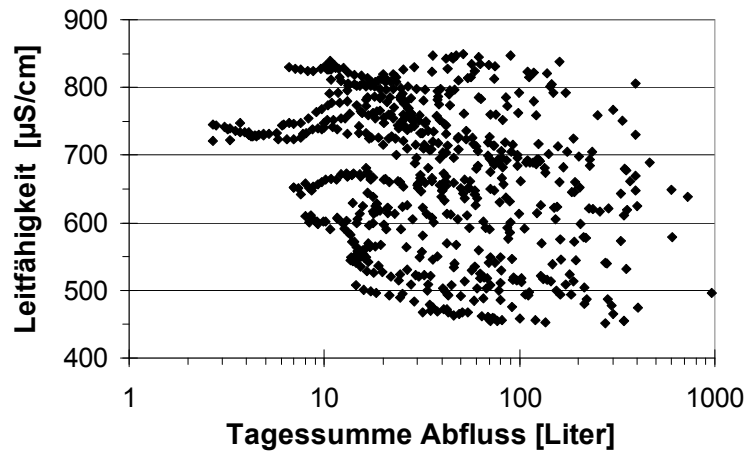
Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Tracerversuch mit dem Markierstoff Uranin auf den Testfeldern RCL 1 und 2



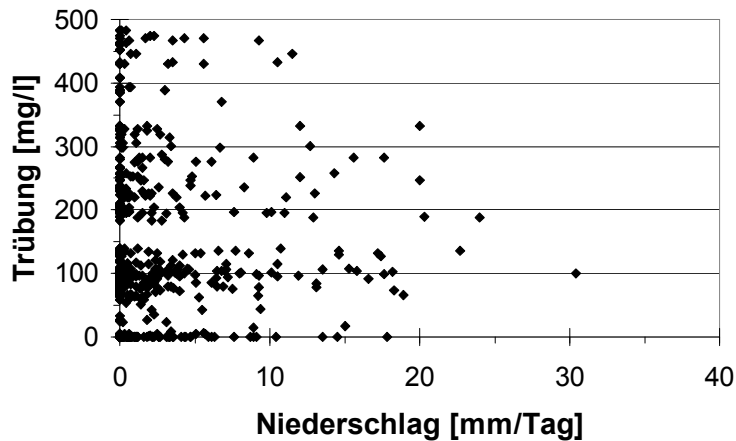
**Feldversuch mit Material RCL 1 und 2: Redox-Messungen**

Feld = Feldmessungen

RCL 1	RCL 1	RCL 2	RCL 2
Datum	Redox [mV] Feld	Datum	Redox [mV] Feld
10.10.01	560	10.10.01	440
14.11.01	572	14.11.01	447
22.01.02	460	22.01.02	353
26.02.02	620	26.02.02	330
28.05.02	566	28.05.02	362

**Feldversuch mit Material RCL 2: Messung von elektrischer Leitfähigkeit und Beckenabfluss**

Auftragung der elektrischen Leitfähigkeit gegen die Tagessumme des Abflusses für Becken RCL 2

**Feldversuch mit Material RCL 2: Messung von Trübung und Niederschlag**

Auftragung der Trübung gegen die Tagessumme des Niederschlags für Becken RCL 2

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Ammoniumnitrat-Extrakt - Konzentration (BERN-SEE 2003)**

n.n. = nicht nachweisbar

Probe	Si [mg/l]	Al [mg/l]	Fe [mg/l]	Mn [µg/l]	Cr [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [mg/l]	Co [µg/l]	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]
RCL 1	5,2	n.n.	n.n.	26,0	230,0	153,0	0,12	10,5	n.n.	340,6
RCL 2	5,4	n.n.	n.n.	15,6	183,0	167,0	0,07	12,5	n.n.	353,6
SH	4,6	n.n.	n.n.	42,0	152,0	93,4	0,27	8,91	n.n.	290,6
HH 1	4,3	n.n.	n.n.	10,0	524,0	361,0	0,82	27,6	n.n.	1462,6
HH 2	6,4	n.n.	n.n.	47,0	170,0	117,0	0,20	10,5	n.n.	799,6
NW 1	4,5	n.n.	0,1	89,7	156,0	224,0	0,42	10,8	n.n.	395,6
RP	4,5	n.n.	n.n.	21,2	399,0	192,0	0,32	14,9	n.n.	487,6
SI	4,2	n.n.	n.n.	711,0	11,4	189,0	0,58	8,71	n.n.	61,2
BW 1	6,0	n.n.	n.n.	2,4	534,0	239,0	0,19	18,9	n.n.	1072,6
BW 2	6,5	n.n.	n.n.	22,8	265,0	204,0	0,50	12,1	n.n.	1912,6
Bb 1	3,9	n.n.	n.n.	86,8	192,0	181,0	0,35	11,4	n.n.	674,6
Bb 2	10,3	n.n.	n.n.	33,2	67,8	42,3	0,15	4,64	n.n.	160,6
BI 1	4,4	n.n.	n.n.	24,6	218,0	149,0	0,65	12,2	n.n.	822,6
BI 2	3,3	n.n.	n.n.	12,1	297,0	220,0	0,83	20,7	n.n.	1172,6
SA 1	4,1	n.n.	n.n.	34,4	135,0	146,0	0,16	15,4	n.n.	686,6
SA 2	5,1	n.n.	n.n.	5,4	269,0	166,0	0,55	19,3	n.n.	2462,6
Hs	5,7	n.n.	n.n.	14,4	294,0	135,0	0,23	9,51	n.n.	483,6
Sa	2,6	n.n.	n.n.	51,5	432,0	243,0	0,79	13,2	n.n.	862,6
By	5,6	n.n.	n.n.	29,4	240,0	91,9	0,20	4,45	n.n.	456,6

Probe	As [µg/l]	Sn [µg/l]	Cd [µg/l]	Sb [µg/l]	Se [µg/l]	Mo [µg/l]	Ba [µg/l]
RCL 1	4,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	19,2	3840
RCL 2	4,6	n.n.	n.n.	2,6	n.n.	18,3	4010
SH	11,3	n.n.	n.n.	3,7	n.n.	14,8	3040
HH 1	4,8	n.n.	7,4	n.n.	28,0	62,4	5880
HH 2	25,7	n.n.	2,5	6,1	n.n.	50,7	2680
NW 1	6,7	n.n.	3,8	3,8	n.n.	34,8	3940
RP	14,3	n.n.	3,2	4,1	n.n.	56,6	4880
SI	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	27,1	7660
BW 1	5,7	n.n.	4,3	n.n.	n.n.	25,5	3940
BW 2	10,1	n.n.	8,0	4,8	n.n.	36,2	1680
Bb 1	7,7	n.n.	2,9	6,4	32,1	39,8	6170
Bb 2	13,6	n.n.	n.n.	3,3	n.n.	12,8	1540
BI 1	15,2	n.n.	7,6	5,0	29,9	25,9	3630
BI 2	14,7	n.n.	7,7	5,4	35,7	35,4	7100
SA 1	8,9	n.n.	n.n.	3,6	n.n.	24,4	8250
SA 2	5,9	n.n.	3,8	n.n.	34,3	46,2	8240
Hs	11,3	n.n.	2,5	3,9	32,4	101,0	4980
Sa	4,5	n.n.	22,4	5,5	32,2	28,6	10300
By	6,3	n.n.	2,8	n.n.	n.n.	18,5	2920

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Ammoniumnitrat-Extrakt - Massenanteil  
(BERNSEE 2003)**

Probe	Si [mg/kg]	Al [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Cr [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Zn [mg/kg]	Co [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cu [mg/kg]
RCL 1	12,9			0,1	575,0	382,5	0,3	26,3		0,9
RCL 2	13,5			0,0	457,5	417,5	0,2	31,3		0,9
SH	11,5			0,1	380,0	233,5	0,7	22,3		0,7
HH 1	10,6			0,0	1310,0	902,5	2,1	69,0		3,7
HH 2	16,0			0,1	425,0	292,5	0,5	26,3		2,0
NW 1	11,4		0,1	0,2	390,0	560,0	1,1	27,0		1,0
RP	11,2			0,1	997,5	480,0	0,8	37,3		1,2
SI	10,5			1,8	28,5	472,5	1,4	21,8		0,2
BW 1	15,0			0,0	1335,0	597,5	0,5	47,3		2,7
BW 2	16,1			0,1	662,5	510,0	1,3	30,3		4,8
Bb 1	9,9			0,2	480,0	452,5	0,9	28,5		1,7
Bb 2	25,8			0,1	169,5	105,8	0,4	11,6		0,4
BI 1	11,1			0,1	545,0	372,5	1,6	30,5		2,1
BI 2	8,3			0,0	742,5	550,0	2,1	51,8		2,9
SA 1	10,3			0,1	337,5	365,0	0,4	38,5		1,7
SA 2	12,7			0,0	672,5	415,0	1,4	48,3		6,2
Hs	14,3			0,0	735,0	337,5	0,6	23,8		1,2
Sa	6,5			0,1	1080,0	607,5	2,0	33,0		2,2
By	13,9			0,1	600,0	229,8	0,5	11,1		1,1

Probe	As [µg/kg]	Sn [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Sb [µg/kg]	Se [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Ba [mg/kg]
RCL 1	10,8					48,0	9,6
RCL 2	11,6			6,5		45,8	10,0
SH	28,3			9,2		37,0	7,6
HH 1	12,0		18,6		70,0	156,0	14,7
HH 2	64,3		6,3	15,3		126,8	6,7
NW 1	16,8		9,5	9,5		87,0	9,8
RP	35,8		8,0	10,2		141,5	12,2
SI						67,8	19,1
BW 1	14,2		10,7			63,8	9,8
BW 2	25,3		20,0	11,9		90,5	4,2
Bb 1	19,2		7,2	16,1	80,3	99,5	15,4
Bb 2	34,0			8,2		32,0	3,8
BI 1	38,0		18,9	12,4	74,8	64,8	9,0
BI 2	36,8		19,3	13,4	89,3	88,5	17,7
SA 1	22,2			9,1		61,0	20,6
SA 2	14,7		9,4		85,8	115,5	20,6
Hs	28,3		6,3	9,7	81,0	252,5	12,4
Sa	11,3		56,0	13,8	80,5	71,5	25,7
By	15,7		7,0			46,3	7,3

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****pH, elektr. Leitfähigkeit (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>pH-Wert (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	11,2	11,1	11,2	11,9	11,1	11,5	11,5	11,5	11,9	11,5	11,7
2	11,3	11,2	11,3	12,0	11,2	11,5	11,5	11,6	12,0	11,6	11,8
4	11,3	11,2	11,4	12,0	11,3	11,5	11,6	11,6	12,1	11,6	11,8
8	11,4	11,3	11,4	12,1	11,4	11,6	11,6	11,7	12,1	11,6	11,8
24	11,3	11,3	11,5	12,1	11,5	11,6	11,7	11,7	12,1	11,6	11,9
48	11,4	11,3	11,5	12,2	11,5	11,7	11,7	11,8	12,1	11,5	12,0
72	11,4	11,4									
120	11,5	11,4									
192	11,2	11,3									

<b>pH-Wert (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	10,8	11,8	12,1	11,4	12,1	11,3	11,6	11,7
2	10,8	11,9	12,2	11,6	12,3	11,4	11,7	11,8
4	10,9	12,0	12,2	11,6	12,3	11,5	11,7	11,8
8	10,9	11,9	12,2	11,7	12,3	11,6	11,8	11,8
24	11,0	12,1	12,4	11,8	12,4	11,6	11,8	12,0
48	10,9	12,1	12,4	11,8	12,5	11,6	11,8	12,0

<b>Leitfähigkeit [µS/cm] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	607	544	557	2160	485	1126	1049	1135	2330	2970	878
2	682	622	630	2430	555	1271	1197	1288	2710	3140	1074
4	755	705	668	2800	667	1209	1300	1433	3330	3210	1094
8	817	780	751	3010	746	1332	1444	1609	3620	3250	1265
24	850	770	862	3160	812	1510	1719	1815	3790	3200	1550
48	892	819	933	3410	881	1540	1732	1953	4060	3070	1676
72	953	905									
120	1030	970									
192	934	987									

<b>Leitfähigkeit [µS/cm] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	462	1187	2270	634	2400	1020	1666	906
2	502	1416	2640	738	2850	1160	1877	1064
4	505	1609	2900	782	3080	1240	1951	1197
8	541	1730	3170	905	3410	1385	2150	1352
24	626	1860	3700	1093	3820	1486	2290	1742
48	663	1835	4090	1213	4120	1564	2350	1819

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>Cl [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	9,2	7,9	8,1	33,5	7,5	13,0	13,0	13,0	1,3	56,3	2,1
2	9,0	8,3	8,4	33,0	8,0	14,4	16,0	12,4	1,9	62,4	2,6
4	9,2	8,7	9,7	32,5	9,6	13,8	13,0	12,0	2,4	66,7	3,2
8	9,7	9,7	9,3	33,5	8,7	15,2	13,2	12,6	2,9	70,9	3,5
24	11,6	9,2	9,8	35,5	9,3	17,0	15,4	14,0	3,7	67,6	5,3
48	11,8	9,7	9,8	35,0	9,4	15,8	15,4	12,8	4,2	70,5	6,0
72	16,3	18,2									
120	12,6	9,6									
192	15,1	10,7									

<b>Cl [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	6,8	1,9	1,2	3,2	0,7	5,8	2,1	1,7
2	7,7	2,5	1,5	4,7	0,9	3,6	3,6	2,4
4	8,7	2,5	1,8	5,3	1,3	3,9	3,6	2,6
8	10,2	3,7	2,1	7,3	1,7	4,2	3,2	4,2
24	10,7	3,2	3,6	8,7	2,1	7,4	4,8	6,0
48	11,9	3,5	3,3	9,8	2,8	5,6	5,7	7,6

<b>NO<sub>3</sub> [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	6,2	5,7	10,6	27,0	5,9	13,0	13,4	11,0	1,6	4,6	1,7
2	6,4	5,8	10,7	26,0	5,9	12,0	43,4	11,0	2,0	5,6	1,8
4	6,4	6,1	11,2	26,5	5,9	11,6	14,4	11,2	2,4	4,8	2,1
8	6,8	6,1	11,9	27,0	6,0	12,4	14,6	11,0	2,2	5,1	0,2
24	7,2	6,2	12,3	27,0	6,7	14,6	15,0	11,0	3,8	4,0	1,1
48	7,7	6,8	13,1	27,0	6,4	12,4	16,2	12,6	4,2	2,8	3,0
72	7,7	6,6									
120	8,1	6,6									
192	8,6	6,9									

<b>NO<sub>3</sub> [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	14,6	1,9	1,9	8,4	1,2	3,5	2,7	3,9
2	15,0	2,2	1,8	10,6	1,9	4,5	3,3	4,2
4	15,9	2,8	2,1	11,8	2,3	3,3	4,0	4,4
8	17,3	2,8	2,8	14,1	4,5	4,5	6,0	2,7
24	18,3	3,8	2,4	14,9	4,1	6,0	5,7	2,3
48	18,5	2,8	2,4	16,3	4,3	6,4	7,4	1,5

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>SO<sub>4</sub> [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	56,2	81,8	33,0	95,5	54,8	59,6	66,6	48,4	21,3	1382,0	43,8
2	60,9	89,5	35,0	96,0	60,0	64,0	69,4	51,2	21,1	1445,0	46,1
4	62,5	114,8	35,9	86,5	88,5	61,0	69,8	51,2	23,2	1454,0	47,2
8	66,3	139,5	37,5	78,5	95,8	64,6	73,0	53,6	21,4	1463,0	45,5
24	87,6	103,1	59,9	80,0	73,3	73,2	103,6	57,2	14,0	1472,0	46,5
48	90,9	107,3	61,3	66,0	78,4	72,0	86,6	54,6	9,6	1467,0	49,1
72	73,0	83,3									
120	75,3	86,6									
192	93,2	99,7									

<b>SO<sub>4</sub> [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	126,4	88,5	29,6	59,8	29,7	37,3	42,5	18,4
2	144,2	97,3	28,9	66,2	26,8	33,5	48,9	23,1
4	121,4	106,1	28,4	56,4	26,9	37,7	46,5	20,6
8	127,4	97,9	24,2	58,7	23,3	37,8	39,5	23,0
24	172,4	89,7	16,1	63,5	14,7	47,7	33,2	32,8
48	165,8	63,1	11,0	65,4	9,9	38,8	25,1	33,8

<b>Na [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	6,8	7,3	4,8	8,1	5,1	5,8	5,4	7,3	3,1	12,8	3,6
2	7,6	8,0	5,2	9,2	5,5	6,4	5,9	8,1	3,7	13,6	4,2
4	7,9	7,7	5,2	11,6	5,9	5,7	6,5	8,2	4,5	13,9	4,4
8	8,5	8,4	5,5	12,4	6,4	6,2	7,1	9,1	4,9	14,9	5,1
24	9,7	9,0	5,9	12,1	6,3	7,1	8,8	10,1	5,1	15,7	5,9
48	10,4	9,7	6,5	13,1	6,7	7,6	9,8	11,1	5,7	17,6	6,5
72	11,0	10,1									
120	12,1	10,7									
192	12,5	11,8									

<b>Na [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	7,5	4,5	6,6	5,8	9,7	6,5	7,7	1,4
2	8,3	5,1	7,6	6,7	10,9	7,1	8,6	1,6
4	8,3	5,8	9,1	5,8	11,1	7,6	8,5	1,5
8	8,9	7,6	10,5	7,3	12,1	8,4	9,5	1,8
24	10,1	7,5	11,3	8,4	13,4	10,7	10,6	2,2
48	10,8	8,2	12,1	9,4	14,4	11,2	11,2	2,6

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>K [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	6,2	7,5	6,1	12,7	5,5	8,4	9,9	10,5	11,7	20,1	8,7
2	7,0	8,6	6,6	14,7	6,1	9,4	11,0	11,8	14,0	22,0	10,4
4	7,8	8,8	6,7	19,2	6,5	8,8	12,2	12,1	17,3	24,7	11,7
8	8,7	10,1	7,3	21,3	7,4	9,8	13,6	13,6	19,4	27,9	13,9
24	10,5	11,8	7,8	21,2	8,3	11,7	17,2	15,0	20,5	28,9	17,3
48	11,9	13,6	8,9	23,8	9,2	13,3	19,4	17,1	23,1	34,8	20,0
72	13,7	14,9									
120	15,8	16,8									
192	15,7	17,9									

<b>K [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	9,5	11,1	18,1	10,2	23,3	8,8	21,7	3,8
2	10,8	12,5	21,4	12,1	26,9	9,9	24,7	4,3
4	10,8	14,4	26,0	11,5	28,2	10,7	24,9	4,4
8	12,2	16,5	29,5	13,9	31,7	12,1	28,5	5,1
24	14,7	20,7	35,1	17,1	36,1	15,1	32,8	6,6
48	16,7	23,6	39,2	20,0	40,0	16,7	36,7	7,8

<b>Ca [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	57,9	56,6	50,5	183,7	50,2	96,5	89,9	94,0	190,1	608,9	70,8
2	65,3	64,1	57,9	209,6	57,9	112,5	104,1	108,0	216,0	657,7	87,4
4	72,0	78,5	60,6	239,0	73,2	106,6	112,8	120,7	291,4	666,8	94,1
8	76,2	91,4	67,3	256,6	82,4	118,1	124,2	137,1	316,6	677,0	107,5
24	84,9	82,3	80,3	266,2	79,8	135,7	157,9	154,1	329,4	671,9	134,5
48	87,7	85,7	88,7	248,8	88,7	137,2	150,5	165,0	359,6	655,5	143,5
72	94,0	86,3									
120	120,5	90,8									
192	92,1	94,1									

<b>Ca [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	62,3	108,9	181,8	58,6	189,3	84,8	135,3	77,9
2	69,2	131,7	211,0	69,0	225,8	97,6	151,3	93,9
4	65,8	143,1	228,0	70,0	258,2	103,4	158,4	105,7
8	71,5	157,5	259,6	81,2	294,6	114,4	173,4	118,3
24	88,1	161,0	301,4	95,0	325,6	122,2	178,6	148,9
48	91,7	150,6	338,2	108,4	352,2	126,4	179,5	157,5

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

n.n. = nicht nachweisbar

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>Mg [mg/l] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	0,070	0,088	0,026	0,019	0,043	0,025	0,023	0,027	0,021	0,030	0,002
2	0,055	0,069	0,023	0,024	0,037	0,026	0,021	0,025	0,022	0,027	n.n
4	0,044	0,061	0,019	0,024	0,035	0,027	0,022	0,022	0,046	0,020	n.n
8	0,040	0,054	0,041	0,023	0,032	0,023	0,015	0,025	0,024	0,016	n.n
24	0,039	0,048	0,023	0,022	0,031	0,020	0,022	0,020	0,028	0,018	n.n
48	0,043	0,038	0,026	0,025	0,028	0,019	0,021	0,019	0,023	0,033	0,002
72	0,124	0,045									
120	1,736	0,036									
192	0,026	0,036									

<b>Mg [mg/l] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	0,215	n.n	n.n	0,050	0,025	0,002	0,002	0,050
2	0,224	n.n	n.n	0,052	0,025	0,006	n.n	0,050
4	0,188	n.n	n.n	0,044	0,023	0,007	n.n	0,046
8	0,157	0,224	n.n	0,047	0,023	n.n	n.n	0,043
24	0,166	n.n	n.n	0,064	0,019	n.n	n.n	0,041
48	0,173	n.n	n.n	0,037	0,019	n.n	n.n	0,043

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: Langzeitversuch (über 192 Stunden) analog S4-Test  
Konzentration Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

<b>RCL 1 (analog S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
1	2,1	0,5	1,0	<0,5	<0,5	10,9	0,03	<0,5	<1,0	<0,5
2	1,8	0,6	1,1	<0,5	<0,5	11,5	<0,03	<0,5	2,4	<0,5
4	1,9	0,7	1,3	<0,5	<0,5	15,6	<0,03	<0,5	4,4	<0,5
8	1,7	0,8	1,5	<0,5	<0,5	20,9	<0,03	0,6	<1,0	0,6
24	1,2	1,0	1,5	<0,5	<0,5	24,6	<0,03	0,6	8,7	<0,5
48	1,1	1,1	1,6	<0,5	<0,5	28,1	<0,03	0,7	2,9	<0,5
72	1,3	0,9	1,5	2,2	<0,5	27,5	<0,03	0,7	11,8	0,6
120	3,7	1,1	2,7	15,1	<0,5	39,7	1,68	2,4	11,1	131,0
192	1,2	1,3	1,6	<0,5	<0,5	38,7	0,17	1,2	3,6	4,8

<b>RCL 1 (analog S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
1	0,9	2,5	<5,0	9,2	<0,03	<0,5
2	1,0	<1,0	<5,0	10,6	<0,03	<0,5
4	1,3	1,6	<5,0	13,5	<0,03	<0,5
8	1,7	1,2	<5,0	15,8	<0,03	<0,5
24	2,0	1,8	<5,0	18,2	<0,03	<0,5
48	2,2	1,6	<5,0	18,6	<0,03	<0,5
72	2,1	2,1	<5,0	16,4	<0,03	<0,5
120	2,5	6,7	<5,0	22,2	<0,03	<0,5
192	3,5	3,2	<5,0	19,2	<0,03	<0,5

<b>RCL 2 (analog S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
1	2,6	1,1	1,2	<0,5	<0,5	11,2	<0,03	0,7	10,9	<0,5
2	2,2	1,1	1,2	<0,5	<0,5	12,7	<0,03	0,7	8,0	<0,5
4	2,0	1,2	1,3	<0,5	<0,5	16,9	<0,03	0,8	6,6	<0,5
8	1,8	1,1	1,3	<0,5	<0,5	18,9	<0,03	0,8	9,3	<0,5
24	1,5	1,3	1,6	<0,5	<0,5	24,9	<0,03	1,0	11,6	2,2
48	1,3	1,4	1,5	<0,5	<0,5	27,0	<0,03	1,1	8,9	1,0
72	1,3	1,1	1,4	<0,5	<0,5	23,8	<0,03	0,9	11,2	<0,5
120	1,3	1,0	1,7	<0,5	<0,5	26,1	<0,03	1,0	9,9	11,0
192	1,1	1,2	2,7	<0,5	<0,5	33,4	0,04	1,2	6,5	1,4

<b>RCL 2 (analog S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
1	1,1	2,1	<5,0	7,7	<0,03	<0,5
2	1,3	1,7	<5,0	9,1	<0,03	<0,5
4	1,5	2,1	<5,0	10,7	<0,03	<0,5
8	1,7	2,1	<5,0	11,9	<0,03	<0,5
24	2,3	2,4	<5,0	14,7	<0,03	<0,5
48	2,5	3,1	<5,0	15,8	<0,03	<0,5
72	2,3	2,9	<5,0	16,0	<0,03	<0,5
120	2,3	2,7	<5,0	15,1	<0,03	<0,5
192	3,7	2,7	<5,0	16,0	<0,03	<0,5

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: S4-Test (Werte nach 24 Stunden Laufzeit)  
 Konzentration Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

S4-Test										
Probe	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
RCL 1	1,2	1,0	1,5	<0,5	<0,5	24,6	<0,03	0,6	8,7	<0,5
RCL 2	1,5	1,3	1,6	<0,5	<0,5	24,9	<0,03	1,0	11,6	2,2
SH	2,4	0,7	1,4	<0,5	<0,5	17,7	0,05	0,7	10,7	3,0
HH1	0,4	<0,5	0,7	0,9	<0,5	36,3	0,07	1,0	21,8	4,0
HH2	1,6	1,4	2,4	<0,5	<0,5	10,7	<0,03	0,8	34,7	0,8
NW1	2,5	<0,5	0,9	<0,5	<0,5	17,3	<0,03	0,5	18,5	0,5
RP	1,5	<0,5	0,8	<0,5	<0,5	37,3	<0,03	0,8	10,5	<0,5
SI	3,6	<0,5	0,7	<0,5	<0,5	5,7	<0,03	0,5	4,2	0,6
BW1	0,6	<0,5	<0,5	1,4	<0,5	28,2	<0,03	<0,5	4,3	<0,5
BW2	0,1	<0,5	1,2	6,7	1,2	45,0	<0,03	0,8	15,7	<0,5
Bb1	2,7	<0,5	1,1	<0,5	<0,5	14,3	<0,03	0,5	7,5	<0,5
Bb2	0,4	0,6	1,7	<0,5	<0,5	11,9	<0,03	0,6	6,5	<0,5
BI1	0,7	<0,5	<0,5	0,5	<0,5	20,9	0,29	0,9	17,9	<0,5
BI2	0,6	<0,5	<0,5	2,3	<0,5	22,5	<0,03	1,4	11,3	<0,5
SA1	2,4	<0,5	1,2	<0,5	<0,5	10,7	<0,03	0,7	10,7	<0,5
SA2	0,6	<0,5	0,5	<0,5	<0,5	15,2	<0,03	0,9	17,6	<0,5
Hs	2,3	<0,5	1,0	<0,5	<0,5	19,6	<0,03	0,6	11,5	<0,5
Sa	2,5	<0,5	<0,5	0,5	<0,5	31,2	<0,03	0,6	9,0	0,6
By	2,0	<0,5	0,7	<0,5	<0,5	16,3	<0,03	<0,5	8,4	<0,5

S4-Test						
Probe	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
RCL 1	2,0	1,8	<5,0	18,2	<0,03	<0,5
RCL 2	2,3	2,4	<5,0	14,7	<0,03	<0,5
SH	1,5	2,9	<5,0	8,5	<0,03	<0,5
HH1	3,8	10,2	<5,0	2,5	<0,03	0,6
HH2	4,3	3,9	<5,0	9,8	<0,03	<0,5
NW1	2,8	4,0	<5,0	8,2	<0,03	<0,5
RP	5,0	4,3	<5,0	6,4	<0,03	<0,5
SI	2,5	2,9	<5,0	4,9	<0,03	<0,5
BW1	1,6	5,8	7,0	1,0	<0,03	2,2
BW2	15,3	6,7	6,8	3,9	<0,03	<0,5
Bb1	2,0	3,5	<5,0	6,1	<0,03	<0,5
Bb2	2,0	2,0	<5,0	18,8	<0,03	<0,5
BI1	2,9	4,3	<5,0	6,5	<0,03	<0,5
BI2	2,4	7,4	<5,0	1,4	<0,03	<0,5
SA1	1,4	2,8	<5,0	9,0	<0,03	<0,5
SA2	3,4	6,5	5,2	1,1	<0,03	<0,5
Hs	8,8	2,2	<5,0	7,6	<0,03	<0,5
Sa	3,7	3,8	<5,0	3,0	<0,03	<0,5
By	1,2	2,2	<5,0	6,7	<0,03	<0,5

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>Cl [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	92	79	81	335	75	130	130	130	13	563	21
2	90	83	84	330	80	144	160	124	19	624	26
4	92	87	97	325	96	138	130	120	24	667	32
8	97	97	93	335	87	152	132	126	29	709	35
24	116	92	98	355	93	170	154	140	37	676	53
48	118	97	98	350	94	158	154	128	42	705	60
72	163	182									
120	126	96									
192	151	107									

<b>Cl [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	68	19	12	32	7	58	21	17
2	77	25	15	47	9	36	36	24
4	87	25	18	53	13	39	36	26
8	102	37	21	73	17	42	32	42
24	107	32	36	87	21	74	48	60
48	119	35	33	98	28	56	57	76

<b>NO<sub>3</sub> [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	62	57	106	270	59	130	134	110	16	46	17
2	64	58	107	260	59	120	434	110	20	56	18
4	64	61	112	265	59	116	144	112	24	48	21
8	68	61	119	270	60	124	146	110	22	51	2
24	72	62	123	270	67	146	150	110	38	40	11
48	77	68	131	270	64	124	162	126	42	28	30
72	77	66									
120	81	66									
192	86	69									

<b>NO<sub>3</sub> [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	146	19	19	84	12	35	27	39
2	150	22	18	106	19	45	33	42
4	159	28	21	118	23	33	40	44
8	173	28	28	141	45	45	60	27
24	183	38	24	149	41	60	57	23
48	185	28	24	163	43	64	74	15

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>SO<sub>4</sub> [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	562	818	330	955	548	596	666	484	213	13820	438
2	609	895	350	960	600	640	694	512	211	14450	461
4	625	1148	359	865	885	610	698	512	232	14540	472
8	663	1395	375	785	958	646	730	536	214	14630	455
24	876	1031	599	800	733	732	1036	572	140	14720	465
48	909	1073	613	660	784	720	866	546	96	14670	491
72	730	833									
120	753	866									
192	932	997									

<b>SO<sub>4</sub> [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	1264	885	296	598	297	373	425	184
2	1442	973	289	662	268	335	489	231
4	1214	1061	284	564	269	377	465	206
8	1274	979	242	587	233	378	395	230
24	1724	897	161	635	147	477	332	328
48	1658	631	110	654	99	388	251	338

<b>Na [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	68	73	48	81	51	58	54	73	31	128	36
2	76	80	52	92	55	64	59	81	37	136	42
4	79	77	52	116	59	57	65	82	45	139	44
8	85	84	55	124	64	62	71	91	49	149	51
24	97	90	59	121	63	71	88	101	51	157	59
48	104	97	65	131	67	76	98	111	57	176	65
72	110	101									
120	121	107									
192	125	118									

<b>Na [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	75	45	66	58	97	65	77	14
2	83	51	76	67	109	71	86	16
4	83	58	91	58	111	76	85	15
8	89	76	105	73	121	84	95	18
24	101	75	113	84	134	107	106	22
48	108	82	121	94	144	112	112	26

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>K [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	62	75	61	127	55	84	99	105	117	201	87
2	70	86	66	147	61	94	110	118	140	220	104
4	78	88	67	192	65	88	122	121	173	247	117
8	87	101	73	213	74	98	136	136	194	279	139
24	105	118	78	212	83	117	172	150	205	289	173
48	119	136	89	238	92	133	194	171	231	348	200
72	137	149									
120	158	168									
192	157	179									

<b>K [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	95	111	181	102	233	88	217	38
2	108	125	214	121	269	99	247	43
4	108	144	260	115	282	107	249	44
8	122	165	295	139	317	121	285	51
24	147	207	351	171	361	151	328	66
48	167	236	392	200	400	167	367	78

<b>Ca [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	579	566	505	1837	502	965	899	940	1901	6089	708
2	653	641	579	2096	579	1125	1041	1080	2160	6577	874
4	720	785	606	2390	732	1066	1128	1207	2914	6668	941
8	762	914	673	2566	824	1181	1242	1371	3166	6770	1075
24	849	823	803	2662	798	1357	1579	1541	3294	6719	1345
48	877	857	887	2488	887	1372	1505	1650	3596	6555	1435
72	940	863									
120	1205	908									
192	921	941									

<b>Ca [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	623	1089	1818	586	1893	848	1353	779
2	692	1317	2110	690	2258	976	1513	939
4	658	1431	2280	700	2582	1034	1584	1057
8	715	1575	2596	812	2946	1144	1734	1183
24	881	1610	3014	950	3256	1222	1786	1489
48	917	1506	3382	1084	3522	1264	1795	1575

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog S4-Test****Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

n.n. = nicht nachweisbar

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>Mg [mg/kg] (analog S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	0,7	0,9	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,0
2	0,5	0,7	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	n.n
4	0,4	0,6	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,5	0,2	n.n
8	0,4	0,5	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	n.n
24	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	n.n
48	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,0
72	1,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
120	17,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
192	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

<b>Mg [mg/kg] (analog S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	2,1	n.n	n.n	0,5	0,2	0,0	0,0	0,5
2	2,2	n.n	n.n	0,5	0,3	0,1	n.n	0,5
4	1,9	n.n	n.n	0,4	0,2	0,1	n.n	0,5
8	1,6	2,2	n.n	0,5	0,2	n.n	n.n	0,4
24	1,7	n.n	n.n	0,6	0,2	n.n	n.n	0,4
48	1,7	n.n	n.n	0,4	0,2	n.n	n.n	0,4

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: Langzeitversuch (über 192 Stunden) analog S4-Test  
 Massenanteil Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

<b>RCL 1 (analog S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
1	21	5	10			109	0,3			
2	18	6	11			115			24	
4	19	7	13			156			44	
8	17	8	15			209		6		6
24	12	10	15			246		6	87	
48	11	11	16			281		7	29	
72	13	9	15	22		275		7	118	6
120	37	11	27	151		397	16,8	24	111	1310
192	12	13	16			387	1,7	12	36	48

<b>RCL 1 (analog S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
1	9	25		92		
2	10			106		
4	13	16		135		
8	17	12		158		
24	20	18		182		
48	22	16		186		
72	21	21		164		
120	25	67		222		
192	35	32		192		

<b>RCL 2 (analog S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
1	26	11	12			112		7	109	
2	22	11	12			127		7	80	
4	20	12	13			169		8	66	
8	18	11	13			189		8	93	
24	15	13	16			249		10	116	22
48	13	14	15			270		11	89	10
72	13	11	14			238		9	112	
120	13	10	17			261		10	99	110
192	11	12	27			334	0,4	12	65	14

<b>RCL 2 (analog S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
1	11	21		77		
2	13	17		91		
4	15	21		107		
8	17	21		119		
24	23	24		147		
48	25	31		158		
72	23	29		160		
120	23	27		151		
192	37	27		160		

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: S4-Test (Werte nach 24 Stunden Laufzeit)****Massenanteil Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

Probe BW2: Überkopfschüttler aufgrund eines Defekts mit erhöhter Drehfrequenz (14 Umdrehungen/Minute gegen Versuchsende)

<b>S4-Test</b>										
<b>Probe</b>	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
RCL 1	12	10	15			246		6	87	
RCL 2	15	13	16			249		10	116	22
SH	24	7	14			177	0,5	7	107	30
HH1	4		7	9		363	0,7	10	218	40
HH2	16	14	24			107		8	347	8
NW1	25		9			173		5	185	5
RP	15		8			373		8	105	
SI	36		7			57		5	42	6
BW1	6			14		282			43	
BW2	1		12	67	12	450		8	157	
Bb1	27		11			143		5	75	
Bb2	4	6	17			119		6	65	
BI1	7			5		209	2,9	9	179	
BI2	6			23		225		14	113	
SA1	24		12			107		7	107	
SA2	6		5			152		9	176	
Hs	23		10			196		6	115	
Sa	25			5		312		6	90	6
By	20		7			163			84	

<b>S4-Test</b>						
<b>Probe</b>	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
RCL 1	20	18		182		
RCL 2	23	24		147		
SH	15	29		85		
HH1	38	102		25		6
HH2	43	39		98		
NW1	28	40		82		
RP	50	43		64		
SI	25	29		49		
BW1	16	58	70	10		22
BW2	153	67	68	39		
Bb1	20	35		61		
Bb2	20	20		188		
BI1	29	43		65		
BI2	24	74		14		
SA1	14	28		90		
SA2	34	65	52	11		
Hs	88	22		76		
Sa	37	38		30		
By	12	22		67		

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**
**pH, elektr. Leitfähigkeit (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>pH-Wert (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	10,0	10,3	10,3	11,3	10,3	10,5	10,7	10,5	11,5	10,4	10,7
2	10,0	10,4	10,4	11,5	10,4	10,6	11,1	10,9	11,6	10,6	10,8
4	10,0	10,5	10,5	11,6	10,5	10,7	11,2	11,0	11,7	10,7	11,0
8	10,0	10,6	10,6	11,6	10,6	10,9	11,3	11,1	11,7	10,8	11,1
24	10,1	10,8	10,7	11,7	10,8	11,0	11,4	11,3	11,8	10,9	11,3
48	10,3	10,9	10,9	11,8	10,9	11,1	11,4	11,3	11,9	11,0	11,4
72	10,2	10,9									
120	10,4	10,9									
192	10,4	11,0									

<b>pH-Wert (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	9,7	11,0	11,5	10,6	11,6	10,5	11,5	9,8
2	9,9	11,1	11,7	10,9	11,8	10,7	11,7	9,8
4	9,9	11,3	11,8	11,0	11,9	10,8	11,8	9,8
8	10,0	11,3	11,9	11,1	12,0	10,9	11,8	9,9
24	10,1	11,4	12,0	11,2	12,0	11,0	12,0	9,9
48	10,2	11,5	12,0	11,3	12,0	11,1	12,1	10,0

<b>Leitfähigkeit [µS/cm] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	118	210	107	655	214	191	247	305	828	499	167
2	143	246	121	924	266	246	332	410	1096	640	243
4	165	286	154	1128	315	304	442	516	1328	757	310
8	188	324	172	1361	378	365	561	614	1583	895	390
24	231	404	214	1689	444	477	756	814	1981	1048	531
48	270	464	294	1942	507	567	891	963	2250	1090	649
72	287	500									
120	306	537									
192	335	584									

<b>Leitfähigkeit [µS/cm] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	247	387	771	287	1054	222	610	57
2	304	506	1110	396	1559	307	850	63
4	354	623	1480	485	2080	381	1040	72
8	407	715	1730	587	2520	461	1288	80
24	511	906	2120	722	3090	592	1621	121
48	591	1023	2400	842	2450	691	1820	124

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**
**Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>Cl [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	7,5	6,6	6,6	1,8	1,7	0,8	1,9	0,6	0,9	30,5	0,5
2	7,0	7,0	7,0	2,2	2,2	1,4	1,5	0,6	1,1	36,8	1,2
4	7,6	7,1	9,2	3,2	2,6	1,4	2,3	1,0	1,4	39,9	1,4
8	7,8	7,9	7,9	2,9	3,1	1,8	2,8	1,1	2,0	42,1	1,8
24	8,3	8,4	8,0	3,8	3,8	2,4	4,1	1,7	2,5	50,2	2,7
48	8,1	8,7	9,2	4,5	4,4	2,7	5,2	2,2	2,8	53,4	3,1
72	9,8	8,9									
120	9,3	9,5									
192	9,6	6,8									

<b>Cl [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	3,7	1,2	0,6	2,3	0,6	1,4	1,9	0,7
2	4,9	1,3	0,9	3,4	0,8	2,3	2,2	0,3
4	6,0	1,9	1,2	4,5	1,1	2,9	2,4	0,4
8	6,9	1,9	1,7	5,6	1,4	3,9	3,6	0,6
24	8,1	2,7	1,9	7,5	2,1	4,7	4,2	2,7
48	9,2	2,9	2,2	8,6	2,5	5,3	4,7	1,2

<b>NO<sub>3</sub> [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	5,7	5,7	7,3	0,8	2,2	0,8	2,2	0,2	0,8	2,8	1,1
2	5,9	5,8	7,2	1,2	2,5	1,2	2,7	1,1	1,2	3,4	2,6
4	6,2	5,9	8,0	1,6	2,4	1,5	4,3	0,5	1,1	4,1	2,9
8	6,4	6,0	8,2	1,5	2,9	3,5	5,1	0,4	1,1	4,6	0,2
24	6,8	6,1	9,5	2,0	3,7	3,6	7,0	0,7	1,6	5,6	0,5
48	7,4	6,1	10,7	1,9	2,7	2,0	6,0	0,4	1,5	5,9	2,0
72	7,8	6,2									
120	7,9	6,3									
192	8,2	2,1									

<b>NO<sub>3</sub> [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	5,8	1,3	0,9	5,9	1,7	2,0	2,1	0,4
2	7,4	1,7	1,3	8,3	2,3	3,1	2,8	0,6
4	9,0	2,0	1,3	10,1	2,8	3,7	3,5	0,7
8	10,6	2,3	1,0	12,0	2,9	3,7	4,3	1,1
24	13,0	2,5	1,2	14,8	3,5	4,1	6,0	1,1
48	13,8	2,5	1,4	16,8	3,8	4,9	5,3	1,2

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**

**Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer > 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>SO<sub>4</sub> [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	30,2	51,3	16,8	66,9	46,1	23,4	22,0	25,5	15,8	158,3	17,6
2	36,0	59,5	18,2	69,0	60,5	34,0	30,8	25,6	18,3	222,8	25,9
4	41,1	66,5	20,7	73,8	72,0	47,1	32,8	27,3	20,6	277,8	39,1
8	46,8	73,0	22,0	85,5	86,7	57,9	32,0	29,3	22,6	304,1	45,5
24	56,3	80,4	23,7	102,0	94,9	70,1	31,5	32,8	24,0	336,2	53,8
48	63,9	84,6	27,3	104,9	104,6	73,1	33,9	32,7	23,8	347,1	58,1
72	69,3	85,6									
120	70,7	86,3									
192	73,1	105,8									

<b>SO<sub>4</sub> [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	76,9	71,0	25,7	33,9	21,8	25,3	23,0	8,7
2	99,9	90,3	29,7	45,0	21,4	32,7	26,4	9,8
4	124,1	105,1	34,8	44,3	20,1	37,8	28,7	10,9
8	147,0	126,4	45,2	34,8	18,9	43,0	30,9	11,9
24	183,6	144,1	56,8	26,8	26,9	49,7	34,5	15,5
48	218,1	153,2	78,0	21,3	23,7	54,7	34,2	18,8

<b>Na [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	3,2	4,6	1,7	5,0	4,1	2,8	2,2	2,6	1,8	5,9	1,9
2	4,0	5,4	2,0	6,9	4,8	3,6	2,6	3,2	2,2	7,0	2,8
4	4,6	6,1	2,5	7,8	5,2	4,2	3,2	3,7	2,6	7,8	3,2
8	5,2	6,8	2,9	8,7	5,7	4,6	3,7	4,1	3,1	8,8	3,6
24	6,3	7,9	3,6	10,2	6,1	5,5	4,7	5,1	3,9	10,4	4,4
48	7,2	8,7	4,8	11,5	6,5	6,2	5,5	5,8	4,4	11,0	4,8
72	7,7	9,0									
120	8,4	9,7									
192	8,8	10,5									

<b>Na [mg/l]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	4,5	3,6	4,0	4,0	6,8	4,0	4,1	0,6
2	5,4	4,7	5,8	5,3	8,9	5,7	5,3	0,5
4	5,9	5,4	6,9	6,1	10,2	6,5	6,0	0,6
8	6,8	6,3	8,0	6,8	11,1	8,1	7,2	0,6
24	8,0	6,9	9,2	8,1	12,2	9,5	8,2	1,8
48	8,7	7,5	10,0	8,8	13,1	10,8	9,0	0,9

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**

**Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer > 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>K [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	2,4	4,3	2,2	7,2	3,8	3,7	3,6	3,9	6,2	9,0	4,1
2	3,1	5,1	2,5	10,3	4,6	4,8	4,4	5,1	8,3	11,2	6,3
4	3,5	6,1	2,9	12,1	5,1	5,7	5,6	6,1	10,2	12,9	7,6
8	4,1	7,1	3,3	13,8	5,8	6,5	6,9	7,0	12,3	14,8	9,0
24	5,4	9,0	3,9	16,8	6,5	8,1	9,0	8,7	15,8	18,0	11,6
48	6,5	10,4	5,1	19,5	7,2	9,6	10,8	10,3	18,0	19,2	13,4
72	7,3	11,2									
120	8,4	12,3									
192	8,8	13,8									

<b>K [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	5,6	8,4	10,3	5,4	16,5	4,8	10,4	1,4
2	7,1	11,1	15,6	8,0	22,8	6,8	14,1	1,6
4	8,1	13,2	19,5	9,7	27,3	7,9	16,4	1,8
8	9,6	16,1	22,9	11,5	30,8	9,0	19,3	2,1
24	11,8	17,6	28,1	14,2	35,7	10,9	24,0	3,3
48	13,5	19,8	31,5	16,5	39,5	12,9	27,2	2,9

<b>Ca [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	14,7	24,4	12,3	63,1	28,6	20,4	24,5	30,5	64,6	74,0	18,6
2	16,9	28,2	14,2	83,8	35,6	25,6	32,1	39,7	84,7	99,8	25,8
4	19,4	32,6	18,1	102,9	43,2	32,2	42,5	49,1	104,5	119,8	32,2
8	23,4	37,0	19,6	121,7	52,7	39,2	53,4	56,2	125,7	145,2	40,2
24	28,2	44,4	24,2	152,6	60,7	51,1	68,6	70,2	159,2	170,9	52,1
48	31,3	50,6	31,0	171,4	66,6	59,2	78,3	81,6	181,8	177,1	61,4
72	33,3	53,9									
120	45,7	57,3									
192	39,1	62,8									

<b>Ca [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	36,7	46,2	64,3	30,5	79,6	21,2	47,7	6,3
2	45,5	57,8	90,1	40,3	118,1	28,6	65,7	7,5
4	54,7	69,2	116,4	49,2	168,2	35,6	78,8	8,5
8	62,5	79,3	138,9	58,3	203,9	44,4	100,9	9,7
24	81,3	97,8	174,0	69,6	248,3	56,0	122,9	13,9
48	97,3	108,6	204,0	79,7	277,3	63,8	141,2	15,9

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**

**Konzentration Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer > 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

n.n. = nicht nachweisbar

<b>Mg [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	0,178	0,156	0,034	0,006	0,042	0,025	0,013	0,012	0,033	0,347	0,010
2	0,233	0,173	0,040	0,000	0,050	0,028	0,011	0,017	0,031	0,325	0,010
4	0,262	0,154	0,032	n.n	0,039	0,036	0,006	0,005	0,026	0,246	0,001
8	0,383	0,131	0,031	n.n	0,045	0,026	n.n	0,005	0,033	0,150	0,007
24	0,263	0,090	0,033	n.n	0,032	0,014	n.n	n.n	0,026	0,051	0,001
48	0,258	0,062	0,029	n.n	0,016	0,004	n.n	n.n	0,024	0,029	n.n
72	0,209	0,057									
120	1,056	0,049									
192	0,132	0,013									

<b>Mg [mg/l] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	0,230	0,014	n.n	0,014	n.n	0,024	0,004	0,131
2	0,292	0,015	n.n	0,011	n.n	0,011	n.n	0,151
4	0,344	0,006	n.n	0,011	n.n	0,001	n.n	0,184
8	0,383	0,011	n.n	0,001	n.n	0,091	0,155	0,210
24	0,463	0,000	0,040	n.n	n.n	n.n	n.n	0,258
48	0,503	0,000	0,025	n.n	n.n	n.n	n.n	0,226

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: Langzeitversuch (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test****Konzentration Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

<b>RCL 1 (analog Modifizierter S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
1	0,5	<0,5	1,1	<0,5	<0,5	1,6	<0,03	<0,5	3,3	<0,5
2	0,4	<0,5	1,3	<0,5	<0,5	2,2	<0,03	<0,5	2,6	<0,5
4	0,5	<0,5	1,5	<0,5	<0,5	2,7	<0,03	<0,5	3,9	<0,5
8	1,2	0,6	2,0	10,3	<0,5	4,7	0,74	1,1	7,0	52,1
24	0,6	0,9	2,8	1,9	<0,5	6,5	<0,03	0,6	7,9	0,7
48	0,6	0,9	2,2	<0,5	<0,5	7,1	<0,03	<0,5	6,5	0,7
72	0,4	1,2	3,1	<0,5	<0,5	9,8	<0,03	0,6	4,5	0,8
120	0,2	1,2	2,7	<0,5	<0,5	9,0	<0,03	0,6	13,0	<0,5
192	0,5	1,3	2,9	<0,5	<0,5	11,0	0,20	0,7	5,0	2,7

<b>RCL 1 (analog Modifizierter S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
1	<0,5	<1,0	<5,0	1,5	<0,03	<0,5
2	<0,5	<1,0	<5,0	1,6	<0,03	<0,5
4	0,6	<1,0	<5,0	2,3	<0,03	<0,5
8	0,6	2,3	<5,0	5,2	<0,03	<0,5
24	1,3	<1,0	<5,0	7,5	<0,03	<0,5
48	1,2	1,0	<5,0	8,4	<0,03	<0,5
72	1,5	1,0	<5,0	11,0	<0,03	<0,5
120	1,5	1,3	<5,0	12,8	<0,03	<0,5
192	1,5	19,6	<5,0	15,2	<0,03	<0,5

<b>RCL 2 (analog Modifizierter S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
1	1,5	0,7	1,5	<0,5	<0,5	3,5	<0,03	<0,5	6,9	<0,5
2	1,9	0,8	1,6	<0,5	<0,5	5,0	0,20	0,6	15,4	2,8
4	1,7	0,7	1,3	<0,5	<0,5	6,8	0,13	0,8	5,6	1,0
8	1,5	0,9	1,3	<0,5	<0,5	8,6	<0,03	0,8	8,7	<0,5
24	1,5	0,9	1,5	<0,5	<0,5	10,8	<0,03	0,9	14,5	<0,5
48	1,3	1,2	1,6	<0,5	<0,5	13,4	<0,03	0,9	7,3	<0,5
72	1,0	1,1	1,5	<0,5	<0,5	14,4	<0,03	1,0	14,2	<0,5
120	1,1	1,2	1,7	<0,5	<0,5	16,3	<0,03	1,0	9,7	0,5
192	1,0	1,2	1,8	<0,5	<0,5	18,5	<0,03	1,1	6,4	<0,5

<b>RCL 2 (analog Modifizierter S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
1	<0,5	1,0	<5,0	1,9	<0,03	<0,5
2	0,5	2,0	<5,0	3,4	<0,03	<0,5
4	0,7	1,8	<5,0	4,2	<0,03	<0,5
8	0,9	2,8	<5,0	5,8	<0,03	<0,5
24	1,1	2,0	<5,0	8,8	<0,03	<0,5
48	1,5	1,8	<5,0	11,8	<0,03	<0,5
72	1,6	2,1	<5,0	13,3	<0,03	<0,5
120	1,7	2,3	<5,0	15,4	<0,03	<0,5
192	2,0	2,0	<5,0	17,1	<0,03	<0,5

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Modifizierter S4-Test (Werte nach 24 Stunden Laufzeit)****Konzentration Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

Modifizierter S4-Test										
Probe	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]
RCL 1	0,6	0,9	2,8	1,9	<0,5	6,5	<0,03	0,6	7,9	0,7
RCL 2	1,5	0,9	1,5	<0,5	<0,5	10,8	<0,03	0,9	14,5	<0,5
SH	1,5	0,5	2,0	<0,5	<0,5	5,4	<0,03	<0,5	10,5	0,8
HH1	1,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	21,6	<0,03	1,1	21,5	<0,5
HH2	1,2	1,4	2,8	<0,5	<0,5	19,7	<0,03	1,0	30,5	<0,5
NW1	2,1	<0,5	1,8	<0,5	<0,5	3,1	<0,03	<0,5	8,3	<0,5
RP	2,4	<0,5	1,6	<0,5	<0,5	23,9	<0,03	0,6	9,7	<0,5
SI	4,3	<0,5	1,6	<0,5	<0,5	4,5	0,04	<0,5	3,9	0,7
BW1	1,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	15,0	<0,03	<0,5	7,4	<0,5
BW2	1,2	1,2	1,4	<0,5	<0,5	10,2	<0,03	<0,5	8,2	<0,5
Bb1	2,4	0,7	1,7	<0,5	<0,5	7,5	<0,03	<0,5	8,4	<0,5
Bb2	0,5	<0,5	2,2	<0,5	<0,5	5,3	<0,03	0,5	4,0	<0,5
BI1	2,3	0,9	1,8	<0,5	<0,5	13,4	<0,03	0,7	18,8	<0,5
BI2	1,9	<0,5	0,7	1,6	<0,5	20,3	<0,03	1,4	15,4	<0,5
SA1	2,5	<0,5	1,4	<0,5	<0,5	8,7	<0,03	0,7	9,5	<0,5
SA2	1,2	<0,5	0,5	<0,5	<0,5	14,8	<0,03	0,8	12,1	<0,5
Hs	2,0	0,6	2,7	<0,5	<0,5	9,4	<0,03	<0,5	3,8	<0,5
Sa	2,8	<0,5	0,7	<0,5	<0,5	18,4	<0,03	<0,5	4,2	0,5
By	0,4	<0,5	3,0	<0,5	<0,5	2,3	<0,03	<0,5	13,8	0,7

Modifizierter S4-Test						
Probe	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
RCL 1	1,3	<1,0	<5,0	7,5	<0,03	<0,5
RCL 2	1,1	2,0	<5,0	8,8	<0,03	<0,5
SH	0,7	2,4	<5,0	3,7	<0,03	<0,5
HH1	2,9	7,0	<5,0	4,3	<0,03	<0,5
HH2	5,2	3,9	<5,0	8,0	<0,03	<0,5
NW1	1,6	1,6	<5,0	7,6	<0,03	<0,5
RP	2,4	1,9	<5,0	5,8	<0,03	<0,5
SI	1,4	3,1	<5,0	5,6	<0,03	<0,5
BW1	0,8	3,1	5,1	2,7	<0,03	<0,5
BW2	3,0	2,9	<5,0	5,4	<0,03	<0,5
Bb1	1,0	1,8	<5,0	5,9	<0,03	<0,5
Bb2	1,4	2,0	<5,0	7,7	<0,03	<0,5
BI1	2,1	3,8	<5,0	7,6	<0,03	<0,5
BI2	1,9	6,3	<5,0	2,9	<0,03	<0,5
SA1	1,2	2,9	<5,0	6,4	<0,03	<0,5
SA2	2,8	5,8	5,2	1,5	<0,03	<0,5
Hs	3,7	1,9	<5,0	9,5	<0,03	<0,5
Sa	2,3	3,8	<5,0	4,5	<0,03	<0,5
By	<0,5	2,3	<5,0	5,0	<0,03	<0,5

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**
**Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>Cl [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	75	66	66	18	17	8	19	6	9	305	5
2	70	70	70	22	22	14	15	6	11	368	12
4	76	71	92	32	26	14	23	10	14	399	14
8	78	79	79	29	31	18	28	11	20	421	18
24	83	84	80	38	38	24	41	17	25	502	27
48	81	87	92	45	44	27	52	22	28	534	31
72	98	89									
120	93	95									
192	96	68									

<b>Cl [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	37	12	6	23	6	14	19	7
2	49	13	9	34	8	23	22	3
4	60	19	12	45	11	29	24	4
8	69	19	17	56	14	39	36	6
24	81	27	19	75	21	47	42	27
48	92	29	22	86	25	53	47	12

<b>NO<sub>3</sub> [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	57	57	73	8	22	8	22	2	8	28	11
2	59	58	72	12	25	12	27	11	12	34	26
4	62	59	80	16	24	15	43	5	11	41	29
8	64	60	82	15	29	35	51	4	11	46	2
24	68	61	95	20	37	36	70	7	16	56	5
48	74	61	107	19	27	20	60	4	15	59	20
72	78	62									
120	79	63									
192	82	21									

<b>NO<sub>3</sub> [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	58	13	9	59	17	20	21	4
2	74	17	13	83	23	31	28	6
4	90	20	13	101	28	37	35	7
8	106	23	10	120	29	37	43	11
24	130	25	12	148	35	41	60	11
48	138	25	14	168	38	49	53	12

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**

**Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer > 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>SO<sub>4</sub> [mg/kg]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	302	513	168	669	461	234	220	255	158	1583	176
2	360	595	182	690	605	340	308	256	183	2228	259
4	411	665	207	738	720	471	328	273	206	2778	391
8	468	730	220	855	867	579	320	293	226	3041	455
24	563	804	237	1020	949	701	315	328	240	3362	538
48	639	846	273	1049	1046	731	339	327	238	3471	581
72	693	856									
120	707	863									
192	731	1058									

<b>SO<sub>4</sub> [mg/kg]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	769	710	257	339	218	253	230	87
2	999	903	297	450	214	327	264	98
4	1241	1051	348	443	201	378	287	109
8	1470	1264	452	348	189	430	309	119
24	1836	1441	568	268	269	497	345	155
48	2181	1532	780	213	237	547	342	188

<b>Na [mg/kg]</b> (analog Modifizierter S4-Test)											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	32	46	17	50	41	28	22	26	18	59	19
2	40	54	20	69	48	36	26	32	22	70	28
4	46	61	25	78	52	42	32	37	26	78	32
8	52	68	29	87	57	46	37	41	31	88	36
24	63	79	36	102	61	55	47	51	39	104	44
48	72	87	48	115	65	62	55	58	44	110	48
72	77	90									
120	84	97									
192	88	105									

<b>Na [mg/kg]</b> (analog Modifizierter S4-Test)								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	45	36	40	40	68	40	41	6
2	54	47	58	53	89	57	53	5
4	59	54	69	61	102	65	60	6
8	68	63	80	68	111	81	72	6
24	80	69	92	81	122	95	82	18
48	87	75	100	88	131	108	90	9

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**
**Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer &gt; 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

<b>K [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	24	43	22	72	38	37	36	39	62	90	41
2	31	51	25	103	46	48	44	51	83	112	63
4	35	61	29	121	51	57	56	61	102	129	76
8	41	71	33	138	58	65	69	70	123	148	90
24	54	90	39	168	65	81	90	87	158	180	116
48	65	104	51	195	72	96	108	103	180	192	134
72	73	112									
120	84	123									
192	88	138									

<b>K [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	56	84	103	54	165	48	104	14
2	71	111	156	80	228	68	141	16
4	81	132	195	97	273	79	164	18
8	96	161	229	115	308	90	193	21
24	118	176	281	142	357	109	240	33
48	135	198	315	165	395	129	272	29

<b>Ca [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	147	244	123	631	286	204	245	305	646	740	186
2	169	282	142	838	356	256	321	397	847	998	258
4	194	326	181	1029	432	322	425	491	1045	1198	322
8	234	370	196	1217	527	392	534	562	1257	1452	402
24	282	444	242	1526	607	511	686	702	1592	1709	521
48	313	506	310	1714	666	592	783	816	1818	1771	614
72	333	539									
120	457	573									
192	391	628									

<b>Ca [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	Bl 1	Bl 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	367	462	643	305	796	212	477	63
2	455	578	901	403	1181	286	657	75
4	547	692	1164	492	1682	356	788	85
8	625	793	1389	583	2039	444	1009	97
24	813	978	1740	696	2483	560	1229	139
48	973	1086	2040	797	2773	638	1412	159

**Fortsetzung Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Langzeitversuche (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test**

**Massenanteil Hauptelemente (Anionen & Kationen) (SCHÄFER 2002)**

Werte für Elutionsdauer > 48 Stunden wurden nur für Material RCL 1 und 2 gemessen

n.n. = nicht nachweisbar

<b>Mg [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>											
Versuchslaufzeit [h]	RCL 1	RCL 2	SH	HH 1	HH 2	NW 1	RP	SI	BW 1	BW 2	Bb 1
1	1,8	1,6	0,3	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1	0,3	3,5	0,1
2	2,3	1,7	0,4	0,0	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	3,3	0,1
4	2,6	1,5	0,3	n.n.	0,4	0,4	0,1	0,0	0,3	2,5	0,0
8	3,8	1,3	0,3	n.n.	0,4	0,3	n.n.	0,1	0,3	1,5	0,1
24	2,6	0,9	0,3	n.n.	0,3	0,1	n.n.	n.n.	0,3	0,5	0,0
48	2,6	0,6	0,3	n.n.	0,2	0,0	n.n.	n.n.	0,2	0,3	n.n.
72	2,1	0,6	0,0								
120	10,6	0,5	0,0								
192	1,3	0,1	0,0								

<b>Mg [mg/kg] (analog Modifizierter S4-Test)</b>								
Versuchslaufzeit [h]	Bb 2	BI 1	BI 2	SA 1	SA 2	Hs	Sa	By
1	2,3	0,1	n.n.	0,1	n.n.	0,2	0,0	1,3
2	2,9	0,1	n.n.	0,1	n.n.	0,1	n.n.	1,5
4	3,4	0,1	n.n.	0,1	n.n.	0,0	n.n.	1,8
8	3,8	0,1	n.n.	0,0	n.n.	0,9	1,5	2,1
24	4,6	0,0	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,6
48	5,0	0,0	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2,3

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: Langzeitversuch (über 192 Stunden) analog Modifizierter S4-Test****Massenanteil Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

<b>RCL 1 (analog Modifizierter S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
1	5		11			16			33	
2	4		13			22			26	
4	5		15			27			39	
8	12	6	20	103		47	7,4	11	70	521
24	6	9	28	19		65		6	79	7
48	6	9	22			71			65	7
72	4	12	31			98		6	45	8
120	2	12	27			90		6	130	
192	5	13	29			110	2,0	7	50	27

<b>RCL 1 (analog Modifizierter S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
1				15		
2				16		
4	6			23		
8	6	23		52		
24	13			75		
48	12	10		84		
72	15	10		110		
120	15	13		128		
192	15	196		152		

<b>RCL 2 (analog Modifizierter S4-Test)</b>										
Versuchslaufzeit [h]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
1	15	7	15			35			69	
2	19	8	16			50	2,0	6	154	28
4	17	7	13			68	1,3	8	56	10
8	15	9	13			86		8	87	
24	15	9	15			108		9	145	
48	13	12	16			134		9	73	
72	10	11	15			144		10	142	
120	11	12	17			163		10	97	5
192	10	12	18			185		11	64	

<b>RCL 2 (analog Modifizierter S4-Test)</b>						
Versuchslaufzeit [h]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
1		10		19		
2	5	20		34		
4	7	18		42		
8	9	28		58		
24	11	20		88		
48	15	18		118		
72	16	21		133		
120	17	23		154		
192	20	20		171		

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: Modifizierter S4-Test (Werte nach 24 Stunden Laufzeit)****Massenanteil Spurenelemente (Schwer-, Leicht- und Halbmetalle)**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

Modifizierter S4-Test										
Probe	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]
RCL 1	6	9	28	19		65		6	79	7
RCL 2	15	9	15			108		9	145	
SH	15	5	20			54			105	8
HH1	16					216		11	215	
HH2	12	14	28			197		10	305	
NW1	21		18			31			83	
RP	24		16			239		6	97	
SI	43		16			45	0,4		39	7
BW1	16					150			74	
BW2	12	12	14			102			82	
Bb1	24	7	17			75			84	
Bb2	5		22			53		5	40	
BI1	23	9	18			134		7	188	
BI2	19		7	16		203		14	154	
SA1	25		14			87		7	95	
SA2	12		5			148		8	121	
Hs	20	6	27			94			38	
Sa	28		7			184			42	5
By	4		30			23			138	7

Modifizierter S4-Test						
Probe	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
RCL 1	13			75		
RCL 2	11	20		88		
SH	7	24		37		
HH1	29	70		43		
HH2	52	39		80		
NW1	16	16		76		
RP	24	19		58		
SI	14	31		56		
BW1	8	31	51	27		
BW2	30	29		54		
Bb1	10	18		59		
Bb2	14	20		77		
BI1	21	38		76		
BI2	19	63		29		
SA1	12	29		64		
SA2	28	58	52	15		
Hs	37	19		95		
Sa	23	38		45		
By		23		50		

**Laborversuche mit den 19 Recycling-Materialien: pH stat-Versuch bei pH 4 - Massenanteil (BERN-SEE 2003)**

leere Felder = nicht nachweisbar

Probe	Si [mg/kg]	Al [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Cr [µg/kg]	Ni [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Co [mg/kg]	Pb [µg/kg]	Cu [mg/kg]	As [µg/kg]	Sn [µg/kg]
RCL 1	680	564	104	359	80	6	21	57	562	2	71	
RCL 2	623	458	175	279		13	21	50	1091	1	91	
SH	670	428	170	174	109	3	16	60	284	2	60	31
HH 1	545	574	98	196	173	5	27	28	621	3	80	27
HH 2	708	507	45	102	125	3	31	75	3268	6	131	
NW 1	604	523	226	621		6	19	38	541	2	86	
RP	579	493	148	276		6	9	49	198	1	135	
SI	852	511	298	1471		4	21	36	138	0	129	
BW 1	511	396	89	130		6	4	31	488	1	81	29
BW 2	488	560	51	535	112	6	43	35	822	21	51	
Bb 1	599	591	141	289	103	5	16	51	222304	2	255	
Bb 2	697	518	101	70	120	2	28	84	368	1	61	
BI 1	612	513	234	246	157	5	40	45	1122	2	67	
BI 2	569	535	47	360	152	4	21	37	168	1	79	
SA 1	616	717	198	275	114	6	11	30	413323	2	117	
SA 2	536	567	77	123	137	5	22	34	173	7	69	
Hs	553	486	146	220	92	6	13	40	232	1	88	
Sa	562	490	141	574	167	6	22	39	993	2	75	
By	453	361	88	292		5	11	30	670	1	60	

Probe	Cd [µg/kg]	Sb [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Se [µg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Li [mg/kg]
RCL 1	109			342	6	50383	642	629	19
RCL 2	94	36		334	6	56177	560	607	20
SH	96		37	450	14	40872	212	541	23
HH 1	105		30	606	5	86010	355	707	28
HH 2	98	27		324	4	34959	237	480	13
NW 1	110			534	12	85993	329	585	31
RP	59			472	18	90017	752	711	32
SI	28		53	522	13	91463	557	958	32
BW 1	69			517	18	115064	185	708	38
BW 2	135	36		505	6	103603	326	639	33
Bb 1	66	480		329	5	42106	258	875	18
Bb 2	33			365	4	25946	234	652	12
BI 1	164	26		459	5	58652	282	777	22
BI 2	44			554	7	72492	341	839	28
SA 1	87	28		446	9	54223	309	706	25
SA 2	59			416	7	65323	278	744	26
Hs	80		33	353	13	62585	627	714	24
Sa	497			402	6	56159	381	828	21
By	194			377	35	147818	306	490	44

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: pH stat-Versuche bei pH 2, 4, 6, 8 - Massenanteil (BERN-SEE 2003)**

leere Felder = nicht nachweisbar

	Si [mg/kg]	Al [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Cr [µg/kg]	Ni [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Co [mg/kg]	Pb [µg/kg]
<b>RCL 1 - pH-Wert</b>									
2	2484	6159	3675	485	5954	21	37	75	11702
4	680	564	104	359	80	6	21	57	562
6	203	1	1	157		2	1	12	26
8	219			2	170	0,4		0,2	
<b>RCL 2 - pH-Wert</b>									
2	2096	4951	3215	378	7068	29	37	69	17977
4	623	458	175	279		13	21	50	1091
6	214		0,4	91		3		7	
8	220			1	106	0,3		0,1	

	Cu [mg/kg]	As [µg/kg]	Sn [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Sb [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Se [µg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]
<b>RCL 1 - pH-Wert</b>									
2	9	311	27	139		28	433	11	45331
4	2	71		109			342	6	50383
6	0,2			27	28	150		16	42756
8	0,2	33			29	160		4	18390
<b>RCL 2 - pH-Wert</b>									
2	11	789		122	36	63	359	12	50459
4	1	91		94	36		334	6	56177
6	0,2	26			81	155	321	17	47490
8	0,3				68	116		4	13057

	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Li [mg/kg]
<b>RCL 1 - pH-Wert</b>			
2	1382	1126	24
4	642	629	19
6	286	563	21
8	253	394	10
<b>RCL 2 - pH-Wert</b>			
2	1064	990	24
4	560	607	20
6	250	543	22
8	185	346	8

**Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: pH stat-Versuche bei pH 2, 4, 6, 8 Säureneutralisationskapazität (BERNSEE 2003)**

pH 2			pH 4			pH 6			pH 8		
Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2
	Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	
0	2,4	2,6	0	1,3	0,7	0	1,1	1,1	0	0,6	0,4
15	2,8	3,0	18	1,8	1,7	15	1,3	1,2	4	0,7	0,5
22	3,0	3,2	26	2,0	2,1	22	1,3	1,2	23	0,8	0,5
39	3,2	3,3	41	2,2	2,3	39	1,3	1,3	30	0,8	0,5
45	3,3	3,4	47	2,3	2,4	45	1,4	1,3	46	0,8	0,6
63	3,3	3,5	66	2,3	2,6	63	1,4	1,4	52	0,8	0,6
70	3,4	3,5	71	2,4	2,7	70	1,4	1,4	73	0,8	0,6
87	3,4	3,5	90	2,4	2,7	87	1,4	1,4	79	0,8	0,6
93	3,5	3,6	95	2,4	2,7	93	1,5	1,5	94	0,8	0,6
114	3,5	3,6	116	2,5	2,8	114	1,5	1,5	102	0,8	0,6
120	3,5	3,6	123	2,5	2,8	120	1,5	1,5	117	0,8	0,6
134	3,5	3,6	139	2,5	2,8	134	1,5	1,5	124	0,8	0,6
143	3,6	3,7	146	2,5	2,8	143	1,5	1,6	140	0,8	0,6
158	3,6	3,7	160	2,5	2,8	158	1,6	1,6	148	0,8	0,6
165	3,6	3,7	164	2,5	2,8	165	1,6	1,6	165	0,9	0,6
181	3,6	3,7	194	2,5	2,8	181	1,6	1,6	175	0,9	0,6
189	3,6	3,7	208	2,6	2,8	189	1,6	1,6	191	0,9	0,6
206	3,6	3,7	217	2,6	2,8	206	1,6	1,6	214	0,9	0,6
216	3,6	3,7	236	2,6	2,8	216	1,6	1,7	221	0,9	0,6
231	3,7	3,8	245	2,6	2,8	231	1,7	1,7	239	0,9	0,6
255	3,7	3,8	255	2,6	2,8	255	1,7	1,7	251	0,9	0,6
262	3,7	3,8	267	2,6	2,8	262	1,7	1,7	262	0,9	0,6
280	3,7	3,8	283	2,6	2,8	280	1,7	1,7	268	0,9	0,6
292	3,7	3,8	292	2,6	2,9	292	1,7	1,8	287	0,9	0,6
303	3,7	3,8	310	2,6	2,9	303	1,7	1,8	291	0,9	0,6
309	3,7	3,8	314	2,6	2,9	309	1,8	1,8	293	0,9	0,6
328	3,7	3,8	328	2,6	2,9	328	1,8	1,8	308	0,9	0,6
331	3,7	3,8	338	2,6	2,9	331	1,8	1,9	311	0,9	0,6
334	3,7	3,8	358	2,6	2,9	334	1,8	1,9	316	0,9	0,6
348	3,7	3,9	364	2,6	2,9	348	1,8	1,9	333	0,9	0,6
352	3,7	3,9	378	2,6	2,9	352	1,8	1,9	335	0,9	0,6
357	3,7	3,9	381	2,6	2,9	357	1,8	1,9	339	0,9	0,6
374	3,8	3,9	389	2,6	2,9	374	1,9	1,9	340	0,9	0,6
376	3,8	3,9	401	2,6	2,9	376	1,9	1,9	358	0,9	0,6
380	3,8	3,9	407	2,6	2,9	380	1,9	2,0	363	0,9	0,6
381	3,8	3,9	410	2,6	2,9	381	1,9	2,0	364	0,9	0,6
399	3,8	3,9	427	2,6	2,9	399	1,9	2,0	366	0,9	0,6
404	3,8	3,9	433	2,6	2,9	404	1,9	2,0	380	0,9	0,6
405	3,8	3,9	434	2,6	2,9	405	1,9	2,0	385	0,9	0,6
406	3,8	3,9	451	2,6	2,9	406	1,9	2,0	386	0,9	0,6
420	3,8	3,9	455	2,6	2,9	420	2,0	2,0	390	0,9	0,6
425	3,8	3,9	459	2,6	2,9	425	2,0	2,0	410	0,9	0,6
427	3,8	3,9	474	2,6	2,9	427	2,0	2,0	413	0,9	0,6
431	3,8	3,9	477	2,6	2,9	431	2,0	2,1	430	0,9	0,6
450	3,8	3,9	482	2,6	2,9	450	2,0	2,1	434	0,9	0,6
454	3,8	3,9	496	2,6	2,9	454	2,0	2,1	437	0,9	0,6
471	3,8	3,9	502	2,6	2,9	471	2,0	2,1	454	0,9	0,6
475	3,8	3,9	508	2,6	2,9	475	2,0	2,1	457	0,9	0,6
478	3,8	3,9	522	2,6	2,9	478	2,0	2,1	458	0,9	0,6
495	3,8	3,9	525	2,6	2,9	495	2,0	2,1	460	0,9	0,6
497	3,8	3,9	531	2,6	2,9	497	2,0	2,1	476	0,9	0,6
499	3,8	3,9	545	2,6	2,9	499	2,0	2,1	484	0,9	0,6

## Fortsetzung Laborversuche mit Material RCL 1 und 2: pH stat-Versuche bei pH 2, 4, 6, 8 Säureneutralisationskapazität (BERNSEE 2003)

pH 2			pH 4			pH 6			pH 8		
Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2	Zeit aufsummiert [h]	RCL 1	RCL 2
	Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]		Summe SNK [mol/kg]	Summe SNK [mol/kg]
501	3,8	3,9	549	2,6	2,9	501	2,0	2,1	488	0,9	0,6
517	3,8	3,9	551	2,6	2,9	517	2,0	2,2	500	0,9	0,6
524	3,8	3,9	554	2,6	2,9	524	2,1	2,2	504	0,9	0,6
528	3,8	3,9	570	2,6	2,9	528	2,1	2,2	506	0,9	0,6
541	3,8	3,9	575	2,6	2,9	541	2,1	2,2	508	0,9	0,6
544	3,8	3,9	579	2,6	2,9	544	2,1	2,2	525	0,9	0,6
547	3,8	3,9	596	2,6	2,9	547	2,1	2,2	527	0,9	0,6
549	3,8	3,9	599	2,6	2,9	549	2,1	2,2	529	0,9	0,6
566	3,8	3,9	602	2,6	2,9	566	2,1	2,2	531	0,9	0,6
568	3,8	3,9	620	2,6	2,9	568	2,1	2,2	532	0,9	0,6
570	3,8	3,9	642	2,6	2,9	570	2,1	2,2	535	0,9	0,6
572	3,8	3,9	665	2,6	2,9	572	2,1	2,2	549	0,9	0,6
573	3,8	3,9				573	2,1	2,2	551	0,9	0,6
576	3,8	3,9				576	2,1	2,2	553	0,9	0,6
590	3,8	3,9				590	2,1	2,3	555	0,9	0,6
592	3,8	3,9				592	2,1	2,3	561	0,9	0,6
594	3,8	3,9				594	2,1	2,3	572	0,9	0,6
596	3,8	3,9				596	2,1	2,3	574	0,9	0,6
601	3,8	3,9				601	2,1	2,3	578	0,9	0,6
613	3,8	3,9				613	2,1	2,3	586	0,9	0,6
615	3,8	3,9				615	2,1	2,3	599	0,9	0,6
619	3,8	3,9				619	2,1	2,3	600	0,9	0,6
627	3,8	3,9				627	2,2	2,3	607	0,9	0,6
639	3,8	3,9				639	2,2	2,3	620	0,9	0,6
641	3,8	3,9				641	2,2	2,3	624	0,9	0,6
648	3,8	3,9				648	2,2	2,3	628	0,9	0,6
661	3,8	3,9				661	2,2	2,3	630	0,9	0,6
665	3,8	3,9				665	2,2	2,4	643	0,9	0,6
669	3,8	3,9				669	2,2	2,4	650	0,9	0,6
671	3,8	3,9				671	2,2	2,4	669	0,9	0,6
684	3,8	3,9				684	2,2	2,4	677	0,9	0,6
									692	0,9	0,6

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Säulenabfluss aufsummiert (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
 leeres Feld = nicht bestimmt worden

Lauf- tage	Säulenausfluss aufsummiert [Liter]				Lauf- tage	Säulenausfluss aufsummiert [Liter]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4		Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1			0,5	0,6	56	1,7	1,9	30,1	30,9
2			1,1	1,2	57	1,7	2,0	30,6	31,4
3	0,0	0,0	1,7	1,8	58	1,7	2,0	31,1	31,9
4	0,0	0,0	2,3	2,4	59	1,8	2,0	31,6	32,5
5	0,1	0,1	2,9	3,0	60	1,8	2,1	32,0	33,0
6	0,1	0,1	3,5	3,5	61	1,8	2,1	32,5	33,5
7	0,1	0,1	4,0	4,1	62	1,8	2,1	33,0	34,0
8	0,2	0,2	4,6	4,7	63	1,8	2,2	33,5	34,6
9	0,2	0,2	5,2	5,2	64	1,9	2,2	34,0	35,1
10	0,2	0,2	5,7	5,7	65	1,9	2,2	34,4	35,6
11	0,2	0,3	6,3	6,2	66	1,9	2,3	34,9	36,1
12	0,3	0,3	6,8	6,7	67	1,9	2,3	35,4	36,6
13	0,3	0,4	7,4	7,2	68	1,9	2,3	36,0	37,1
14	0,3	0,4	8,0	7,7	69	2,0	2,4	36,5	37,6
15	0,4	0,4	8,5	8,3	70	2,0	2,4	37,1	38,2
16	0,4	0,5	9,1	8,9	71	2,0	2,4	37,6	38,7
17	0,5	0,5	9,7	9,5	72	2,1	2,5	38,1	39,2
18	0,5	0,5	10,2	10,1	73	2,1	2,5	38,6	39,8
19	0,5	0,6	10,8	10,7	74	2,1	2,5	39,0	40,3
20	0,6	0,6	11,4	11,2	75	2,1	2,6	39,5	40,8
21	0,6	0,7	11,9	11,8	76	2,2	2,6	40,0	41,4
22	0,6	0,7	12,4	12,4	77	2,2	2,6	40,5	41,9
23	0,7	0,7	13,0	12,9	78	2,2	2,7	41,0	42,4
24	0,7	0,7	13,5	13,4	79	2,3	2,7	41,5	42,9
25	0,7	0,8	13,9	14,0	80	2,3	2,7	42,0	43,5
26	0,8	0,8	14,4	14,5	81	2,3	2,8	42,5	44,0
27	0,8	0,9	14,9	15,0	82	2,3	2,8	43,1	44,5
28	0,8	0,9	15,3	15,5	83	2,4	2,8	43,6	45,0
29	0,9	0,9	15,9	16,1	84	2,4	2,8	44,1	45,6
30	0,9	1,0	16,5	16,6	85	2,4	2,9	44,7	46,1
31	1,0	1,0	17,0	17,2	86	2,4	2,9	45,3	46,7
32	1,0	1,1	17,6	17,7	87	2,5	2,9	45,8	47,2
33	1,0	1,1	18,2	18,3	88	2,5	2,9	46,3	47,6
34	1,1	1,1	18,7	18,8	89	2,5	3,0	46,8	48,1
35	1,1	1,2	19,3	19,4	90	2,5	3,0	47,3	48,6
36	1,1	1,2	19,8	20,0	91	2,5	3,0	47,8	49,1
37	1,2	1,3	20,3	20,6	92	2,6	3,0	48,3	49,6
38	1,2	1,3	20,8	21,1	93	2,6	3,0	48,8	50,1
39	1,3	1,3	21,3	21,7	94	2,6	3,1	49,3	50,6
40	1,3	1,4	21,8	22,3	95	2,6	3,1	49,8	51,1
41	1,3	1,4	22,3	22,9	96	2,7	3,1	50,3	51,7
42	1,3	1,5	22,8	23,5	97	2,7	3,1	50,8	52,2
43	1,4	1,5	23,4	24,0	98	2,7	3,1	51,3	52,7
44	1,4	1,5	24,0	24,5	99	2,7	3,1	51,8	53,2
45	1,4	1,6	24,6	25,1	100	2,8	3,2	52,3	53,7
46	1,4	1,6	25,2	25,6	101	2,8	3,2	52,8	54,2
47	1,5	1,6	25,8	26,1	102	2,8	3,2	53,3	54,7
48	1,5	1,7	26,4	26,7	103	2,8	3,2	53,8	55,2
49	1,5	1,7	26,9	27,2	104	2,9	3,2	54,2	55,7
50	1,5	1,7	27,4	27,7	105	2,9	3,2	54,7	56,2
51	1,6	1,8	27,8	28,3	106	2,9	3,2	55,2	56,7
52	1,6	1,8	28,3	28,8	107	2,9	3,2	55,7	57,2
53	1,6	1,8	28,7	29,3	108	3,0	3,2	56,2	57,7
54	1,7	1,9	29,2	29,8	109	3,0	3,2	56,6	58,2
55	1,7	1,9	29,6	30,4	110	3,0	3,3	57,1	58,7

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Säulenausfluss aufsummiert (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden

Lauf- tage	Säulenausfluss aufsummiert [Liter]				Lauf- tage	Säulenausfluss aufsummiert [Liter]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4		Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
111	3,0	3,3	57,6	59,2	166	4,5	5,2	86,5	88,8
112	3,1	3,3	58,1	59,7	167	4,5	5,2	87,1	89,3
113	3,1	3,3	58,6	60,2	168	4,6	5,3	87,6	89,8
114	3,1	3,3	59,1	60,7	169	4,6	5,3	88,1	90,4
115	3,1	3,3	59,7	61,3	170	4,6	5,3	88,6	90,9
116	3,2	3,3	60,2	61,8	171	4,7	5,3	89,1	91,4
117	3,2	3,3	60,7	62,3	172	4,7	5,4	89,6	92,0
118	3,2	3,3	61,2	62,9	173	4,7	5,4	90,1	92,5
119	3,2	3,3	61,7	63,4	174	4,8	5,4	90,7	93,0
120	3,2	3,3	62,3	63,9	175	4,8	5,5	91,2	93,6
121	3,3	3,3	62,8	64,4	176	4,8	5,5	91,7	94,1
122	3,3	3,3	63,3	65,0	177	4,9	5,5	92,2	94,6
123	3,3	3,4	63,8	65,5	178	4,9	5,5	92,7	95,2
124	3,3	3,4	64,3	66,0	179	4,9	5,6	93,2	95,7
125	3,4	3,4	64,9	66,5	180	5,0	5,6	93,8	96,3
126	3,4	3,4	65,4	67,1	181	5,0	5,7	94,3	96,8
127	3,4	3,4	65,9	67,6	182	5,0	5,7	94,8	97,4
128	3,4	3,4	66,4	68,1	183	5,1	5,7	95,3	97,9
129	3,5	3,4	67,0	68,6	184	5,1	5,8	95,9	98,5
130	3,5	3,5	67,5	69,2	185	5,2	5,8	96,4	99,0
131	3,5	3,6	68,1	69,8	186	5,2	5,9	96,9	99,6
132	3,6	3,7	68,6	70,3	187	5,2	5,9	97,4	100,1
133	3,6	3,8	69,2	70,9	188	5,3	5,9	98,0	100,7
134	3,6	3,9	69,7	71,4	189	5,3	6,0	98,5	101,2
135	3,6	4,0	70,3	72,0	190	5,3	6,0	99,0	101,7
136	3,7	4,1	70,8	72,5	191	5,4	6,0	99,5	102,3
137	3,7	4,2	71,4	73,1	192	5,4	6,0	100,0	102,8
138	3,7	4,2	71,9	73,6	193	5,4	6,1	100,5	103,4
139	3,7	4,3	72,4	74,2	194	5,5	6,1	101,0	103,9
140	3,8	4,3	72,9	74,7	195	5,5	6,1	101,6	104,4
141	3,8	4,4	73,5	75,3	196	5,5	6,2	102,1	105,0
142	3,8	4,4	74,0	75,8	197	5,6	6,2	102,6	105,5
143	3,9	4,5	74,5	76,4	198	5,6	6,2	103,1	106,0
144	3,9	4,5	75,1	76,9	199	5,6	6,3	103,6	106,6
145	3,9	4,5	75,6	77,5	200	5,7	6,3	104,1	107,1
146	3,9	4,6	76,1	78,0					
147	4,0	4,6	76,7	78,6					
148	4,0	4,6	77,2	79,1					
149	4,0	4,7	77,7	79,7					
150	4,1	4,7	78,2	80,2					
151	4,1	4,7	78,8	80,8					
152	4,1	4,8	79,3	81,3					
153	4,1	4,8	79,8	81,8					
154	4,2	4,8	80,3	82,4					
155	4,2	4,8	80,8	82,9					
156	4,2	4,9	81,4	83,4					
157	4,2	4,9	81,9	84,0					
158	4,3	4,9	82,4	84,5					
159	4,3	5,0	82,9	85,0					
160	4,3	5,0	83,4	85,6					
161	4,4	5,0	83,9	86,1					
162	4,4	5,1	84,5	86,6					
163	4,4	5,1	85,0	87,2					
164	4,5	5,1	85,5	87,7					
165	4,5	5,2	86,0	88,2					

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsummiert**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden

Lauf- tage	Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsumm. [l/kg]				Lauf- tage	Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsumm. [l/kg]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4		Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1	0,000	0,000	0,1	0,1	56	0,191	0,226	3,4	3,6
2	0,000	0,000	0,1	0,1	57	0,193	0,229	3,4	3,6
3	0,003	0,002	0,2	0,2	58	0,195	0,233	3,5	3,7
4	0,005	0,006	0,3	0,3	59	0,197	0,237	3,5	3,8
5	0,007	0,009	0,3	0,3	60	0,199	0,240	3,6	3,8
6	0,010	0,013	0,4	0,4	61	0,201	0,244	3,7	3,9
7	0,014	0,017	0,5	0,5	62	0,203	0,248	3,7	3,9
8	0,017	0,021	0,5	0,5	63	0,205	0,252	3,8	4,0
9	0,020	0,024	0,6	0,6	64	0,208	0,256	3,8	4,1
10	0,024	0,028	0,6	0,7	65	0,211	0,259	3,9	4,1
11	0,028	0,033	0,7	0,7	66	0,213	0,263	3,9	4,2
12	0,031	0,036	0,8	0,8	67	0,215	0,267	4,0	4,2
13	0,035	0,041	0,8	0,8	68	0,217	0,270	4,0	4,3
14	0,039	0,045	0,9	0,9	69	0,220	0,273	4,1	4,4
15	0,043	0,049	1,0	1,0	70	0,224	0,277	4,2	4,4
16	0,047	0,054	1,0	1,0	71	0,228	0,281	4,2	4,5
17	0,052	0,058	1,1	1,1	72	0,231	0,286	4,3	4,5
18	0,056	0,063	1,1	1,2	73	0,233	0,289	4,3	4,6
19	0,060	0,067	1,2	1,2	74	0,236	0,293	4,4	4,7
20	0,064	0,071	1,3	1,3	75	0,240	0,297	4,4	4,7
21	0,068	0,075	1,3	1,4	76	0,244	0,301	4,5	4,8
22	0,071	0,079	1,4	1,4	77	0,248	0,305	4,5	4,9
23	0,074	0,083	1,5	1,5	78	0,251	0,308	4,6	4,9
24	0,077	0,087	1,5	1,6	79	0,254	0,312	4,7	5,0
25	0,081	0,091	1,6	1,6	80	0,258	0,316	4,7	5,0
26	0,086	0,095	1,6	1,7	81	0,260	0,320	4,8	5,1
27	0,090	0,100	1,7	1,7	82	0,263	0,323	4,8	5,2
28	0,094	0,105	1,7	1,8	83	0,266	0,326	4,9	5,2
29	0,099	0,110	1,8	1,9	84	0,268	0,330	5,0	5,3
30	0,103	0,114	1,9	1,9	85	0,271	0,333	5,0	5,3
31	0,107	0,119	1,9	2,0	86	0,273	0,336	5,1	5,4
32	0,111	0,124	2,0	2,1	87	0,276	0,339	5,1	5,5
33	0,115	0,128	2,0	2,1	88	0,278	0,342	5,2	5,5
34	0,119	0,133	2,1	2,2	89	0,280	0,344	5,3	5,6
35	0,123	0,137	2,2	2,2	90	0,283	0,346	5,3	5,6
36	0,128	0,142	2,2	2,3	91	0,285	0,348	5,4	5,7
37	0,133	0,146	2,3	2,4	92	0,288	0,350	5,4	5,8
38	0,137	0,150	2,3	2,4	93	0,290	0,352	5,5	5,8
39	0,141	0,155	2,4	2,5	94	0,293	0,355	5,5	5,9
40	0,144	0,160	2,4	2,6	95	0,296	0,358	5,6	5,9
41	0,148	0,165	2,5	2,7	96	0,299	0,360	5,6	6,0
42	0,152	0,170	2,6	2,7	97	0,301	0,361	5,7	6,0
43	0,154	0,174	2,6	2,8	98	0,304	0,362	5,8	6,1
44	0,157	0,178	2,7	2,8	99	0,307	0,364	5,8	6,2
45	0,160	0,182	2,8	2,9	100	0,310	0,365	5,9	6,2
46	0,163	0,186	2,8	3,0	101	0,313	0,367	5,9	6,3
47	0,166	0,190	2,9	3,0	102	0,316	0,368	6,0	6,3
48	0,168	0,195	3,0	3,1	103	0,320	0,370	6,0	6,4
49	0,171	0,199	3,0	3,2	104	0,323	0,371	6,1	6,5
50	0,174	0,202	3,1	3,2	105	0,325	0,372	6,1	6,5
51	0,177	0,206	3,1	3,3	106	0,328	0,373	6,2	6,6
52	0,180	0,210	3,2	3,3	107	0,331	0,374	6,3	6,6
53	0,183	0,214	3,2	3,4	108	0,333	0,375	6,3	6,7
54	0,186	0,218	3,3	3,5	109	0,336	0,376	6,4	6,7
55	0,189	0,222	3,3	3,5	110	0,339	0,377	6,4	6,8

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsummiert**Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden

Lauf- tage	Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsumm. [l/kg]				Lauf- tage	Wasser/Feststoff-Verhältnis aufsumm. [l/kg]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4		Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
111	0,342	0,378	6,5	6,9	166	0,507	0,602	9,7	10,3
112	0,345	0,379	6,5	6,9	167	0,510	0,605	9,8	10,3
113	0,348	0,380	6,6	7,0	168	0,514	0,609	9,8	10,4
114	0,351	0,381	6,6	7,0	169	0,517	0,612	9,9	10,5
115	0,353	0,382	6,7	7,1	170	0,520	0,615	10,0	10,5
116	0,355	0,383	6,8	7,2	171	0,523	0,619	10,0	10,6
117	0,358	0,384	6,8	7,2	172	0,527	0,622	10,1	10,7
118	0,360	0,385	6,9	7,3	173	0,530	0,625	10,1	10,7
119	0,362	0,385	6,9	7,3	174	0,534	0,629	10,2	10,8
120	0,364	0,386	7,0	7,4	175	0,538	0,632	10,2	10,8
121	0,366	0,387	7,1	7,5	176	0,542	0,636	10,3	10,9
122	0,368	0,388	7,1	7,5	177	0,546	0,639	10,4	11,0
123	0,371	0,389	7,2	7,6	178	0,550	0,643	10,4	11,0
124	0,374	0,390	7,2	7,6	179	0,554	0,647	10,5	11,1
125	0,377	0,391	7,3	7,7	180	0,558	0,652	10,5	11,2
126	0,380	0,391	7,3	7,8	181	0,562	0,656	10,6	11,2
127	0,383	0,392	7,4	7,8	182	0,567	0,660	10,6	11,3
128	0,387	0,393	7,5	7,9	183	0,571	0,665	10,7	11,3
129	0,390	0,394	7,5	8,0	184	0,575	0,669	10,8	11,4
130	0,393	0,405	7,6	8,0	185	0,579	0,673	10,8	11,5
131	0,396	0,416	7,6	8,1	186	0,584	0,678	10,9	11,5
132	0,399	0,428	7,7	8,1	187	0,587	0,682	10,9	11,6
133	0,402	0,439	7,8	8,2	188	0,591	0,686	11,0	11,7
134	0,405	0,450	7,8	8,3	189	0,595	0,689	11,1	11,7
135	0,408	0,461	7,9	8,3	190	0,598	0,693	11,1	11,8
136	0,411	0,473	8,0	8,4	191	0,602	0,697	11,2	11,9
137	0,415	0,484	8,0	8,5	192	0,606	0,701	11,2	11,9
138	0,418	0,489	8,1	8,5	193	0,609	0,705	11,3	12,0
139	0,421	0,494	8,1	8,6	194	0,613	0,708	11,3	12,0
140	0,424	0,500	8,2	8,7	195	0,617	0,712	11,4	12,1
141	0,427	0,505	8,3	8,7	196	0,620	0,715	11,5	12,2
142	0,430	0,510	8,3	8,8	197	0,624	0,719	11,5	12,2
143	0,433	0,516	8,4	8,9	198	0,627	0,723	11,6	12,3
144	0,436	0,521	8,4	8,9	199	0,631	0,726	11,6	12,3
145	0,439	0,525	8,5	9,0	200	0,635	0,730	11,7	12,4
146	0,443	0,529	8,6	9,0					
147	0,446	0,533	8,6	9,1					
148	0,449	0,536	8,7	9,2					
149	0,453	0,540	8,7	9,2					
150	0,456	0,544	8,8	9,3					
151	0,459	0,548	8,8	9,4					
152	0,462	0,551	8,9	9,4					
153	0,465	0,554	9,0	9,5					
154	0,468	0,557	9,0	9,5					
155	0,471	0,560	9,1	9,6					
156	0,474	0,563	9,1	9,7					
157	0,477	0,566	9,2	9,7					
158	0,480	0,569	9,3	9,8					
159	0,484	0,574	9,3	9,9					
160	0,487	0,578	9,4	9,9					
161	0,490	0,582	9,4	10,0					
162	0,494	0,586	9,5	10,0					
163	0,497	0,591	9,5	10,1					
164	0,501	0,595	9,6	10,2					
165	0,504	0,598	9,7	10,2					

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Trübung, elektr. Leitfähigkeit, pH (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
 leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Trübung [FNU]				elektr. Leitfähigkeit [µS/cm]				pH-Wert			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1			6,0	1,6			3120	2500			7,3	9,5
2			4,1	1,6			2450	2370			8,0	9,3
3	16,4	1,5	3,4	1,5	2920	2650	1730	1805	7,9	8,0	8,0	9,8
4	16,4	1,5	2,1	1,5	2920	2650	1368	1384	7,9	8,0	8,5	9,8
5	0,8	1,9	1,6	1,6	3140	2540	1105	1121	8,0	8,0	8,0	10,1
6	0,8	1,9	1,2	1,9	3140	2540	908	912	8,0	8,0	8,0	10,2
7	0,9	1,8	2,0	2,0	3210	2460	775	820	7,9	8,0	8,0	10,1
8	0,9	1,8	1,0	1,8	3210	2460	701	746	7,9	8,0	8,0	10,3
9	0,8	1,8	1,2	1,9	3180	2320	659	679	7,8	8,0	9,0	10,0
10	0,8	1,8	1,3	3,6	3180	2320	579	651	7,8	8,0	8,5	10,0
11-12	1,6	1,7	1,1	3,3	3230	2290	539	622	7,8	8,0	8,3	10,1
13-14	1,3	3,3	1,0	2,3	3260	2240	478	569	7,8	8,0	8,7	10,5
15-17	2,1	2,3	1,2	1,6	3230	2200	440	539	7,8	8,1	8,7	10,5
18-21	4,3	2,4	1,1	1,2	3140	2140	371	567	7,8	8,2	9,2	10,5
22-24	0,9	3,0	1,1	0,8	3020	2070	326	531	8,1	8,4	8,3	10,4
25-28	1,3	1,5	1,1	0,8	2850	1989	326	531	8,0	8,2	8,3	10,4
29-31	3,0	1,1	0,8	0,7	2550	1925	261	486	7,9	8,3	8,5	10,2
32-35	2,9	1,5	0,8	0,7	2470	1858	261	486	7,9	8,2	8,5	10,2
36-38	1,2	0,9	0,9	0,8	2300	1760	248	396	7,8	8,1	8,7	10,4
39-42	1,4	2,6	0,9	0,8	2160	1684	248	396	7,8	7,8	8,7	10,4
43-49	4,1	1,6	1,1	0,7	1961	1564	243	484	7,8	8,0	9,3	11,1
50-56	0,6	0,8	0,7	0,5	1808	1425	231	413	7,6	7,8	9,3	10,9
57-60	1,4	3,9	0,7	0,3	1745	1361	247	341	7,4	7,5	9,6	10,8
61-63	1,4	3,9	0,7	0,3	1675	1291	237	361	7,4	7,5	9,6	10,8
64	0,9	1,5	0,8	0,4	1629	1260	220	383	7,7	7,9	9,7	11,2
65	0,9	1,5	0,8	0,4	1596	1230	219	667	7,7	7,9	9,7	11,2
66	0,9	1,5	0,8	0,4	1596	1230	220	654	7,7	7,9	9,7	11,2
67	0,9	1,5	0,8	0,4	1596	1230	219	509	7,7	7,9	9,7	11,2
68-70	0,9	1,5	0,8	0,4	1544	1277	215	598	7,7	7,9	9,7	11,2
71	1,1	1,2	0,8	0,5	1484	1158	212	489	7,5	7,8	9,7	11,1
72	1,1	1,2	0,8	0,5	1474	1162	215	562	7,5	7,8	9,7	11,1
73	1,1	1,2	0,8	0,5	1470	1152	215	622	7,5	7,8	9,7	11,1
74	1,1	1,2	0,8	0,5	1444	1131	215	502	7,5	7,8	9,7	11,1
75	1,1	1,2	0,8	0,5	1474	1188	218	403	7,5	7,8	9,7	11,1
76-77	1,1	1,2	0,8	0,5	1400	1160	218	403	7,5	7,8	9,7	11,1
78-79	0,9	-5,0	0,7	2,3	1285	1061	213	631	7,6	7,8	9,8	11,2
80-81	0,9	-5,0	0,7	2,3	1285	1061	213	517	7,6	7,8	9,8	11,2
82-84	0,9	-5,0	0,7	2,3	1285	1061	213	529	7,6	7,8	9,8	11,2
85-86	0,9	1,1	0,7	0,6	1231	994	207	604	7,6	7,9	9,9	11,4
87-91	0,9	1,1	0,7	0,6	1231	994	203	594	7,6	7,9	9,9	11,4
92-94	0,6	1,3	0,8	1,1	1163	908	202	412	7,6	7,8	10,0	11,1
95-99	0,6	1,3	0,6	0,4	1163	908	200	541	7,6	7,8	9,9	11,3
100-101	0,4	1,7	0,6	0,4	1076	845	200	541	7,6	7,7	9,9	11,3
102-107	0,4	1,7	0,5	0,3	1076	845	208	553	7,6	7,7	9,9	11,3
108-114	0,5	2,7	0,4	0,3	1005	836	201	528	7,6	7,8	10,2	11,4
115-122	0,7	1,4	0,7	0,4	932	780	212	534	7,5	8,1	10,3	11,3
123-129	0,3	1,2	0,5	0,4	853	740	200	524	7,4	7,8	9,8	11,3
130-137	0,5	0,9	0,8	0,4	999	985	268	256	7,4	8,4	9,8	10,3
138-144	0,3	0,6	0,5	0,3	874	974	207	606	7,6	7,6	9,8	11,2
145-151	0,3	0,8	0,9	0,4	969	962	218	626	7,4	7,9	10,2	11,5
152-158	0,3	1,0	0,4	0,4	988	1007	201	574	7,6	7,0	10,3	11,4
159-164	0,4	0,8	0,4	0,3	1078	904	262	659	7,5	7,8	10,3	11,5
165-172	0,6	0,7	0,4	0,3	855	831	191	279	7,7	7,7	9,9	10,8
173-178	0,5	0,5	0,4	0,3	818	837	198	520	7,4	8,0	10,2	11,3
179-186	0,5	0,5	0,3	0,3	743	757	177	562	7,6	7,9	10,1	11,7
187-191	0,5	0,6	0,3	0,3	712	707	200	565	7,5	7,9	10,4	11,3
192-200	0,6	0,9	0,5	0,4	708	699	199	583	7,3	7,9	10,5	11,5

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Hauptelemente – Anionen (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Cl [mg/l]				NO <sub>3</sub> [mg/l]				SO <sub>4</sub> [mg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1			111,6	140,2							1528,0	1049,0
2			73,9	143,6							1195,0	914,1
3	111,3	134,9	35,7	87,6	57,9				1607,0	1255,0	840,0	668,6
4	111,3	134,9	25,7	55,3	57,9			15,1	1607,0	1255,0	601,0	504,3
5	123,6	142,1	20,9	38,7	54,0			9,4	1719,0	1162,0	454,2	397,0
6	123,6	142,1	18,5	31,2	54,0			6,2	1719,0	1162,0	369,5	316,6
7	129,6	135,1	16,9	25,8	49,1			4,6	1361,0	976,9	301,2	232,0
8	129,6	135,1	15,0	22,0	49,1			3,9	1361,0	976,9	256,2	221,0
9	141,6	154,9	14,5	20,8	47,0			3,4	1783,0	999,5	229,0	207,0
10	141,6	154,9	13,6	18,9	47,0			2,6	1783,0	999,5	192,0	186,0
11-12	147,2	159,2	13,0	18,1	41,7			1,7	1730,0	936,0	171,0	178,0
13-14	152,1	158,7	12,4	16,4	35,6			2,1	1576,0	883,2	146,0	153,9
15-17	154,7	164,9	11,7	14,7	33,8			2,2	1323,0	818,5	125,0	133,7
18-21	149,3	170,1	11,1	13,7	32,2			1,9	1645,0	766,1	98,8	105,7
22-24	142,7	162,6	10,3	11,7	38,5			2,0	1554,0	721,7	82,9	80,8
25-28	128,8	164,5	10,3	11,7	31,7			2,0	1380,0	710,6	82,9	80,8
29-31	119,2	150,3	9,6	10,8	30,4			1,8	1295,0	671,7	59,5	68,1
32-35	105,3	143,4	9,6	10,8	32,3			1,8	1179,0	667,9	59,5	68,1
36-38	90,5	131,8	9,5	10,0	23,0			1,8	1050,0	593,9	50,6	57,1
39-42	80,0	127,4	9,5	10,0	21,5			1,8	945,6	584,6	50,6	57,1
43-49	72,7	105,4	5,7	6,2	15,8	36,8	1,0	1,5	915,0	544,0	45,2	49,1
50-56	62,6	97,1	4,9	5,9	14,1	32,3	1,0	2,1	820,0	492,0	28,7	43,1
57-63	59,9	67,4	5,7	5,5	15,2	23,1	0,9	1,3	734,0	345,0	40,3	37,1
64-70	55,0	77,6	5,1	5,1	14,0	27,2	0,9	2,0	687,0	402,0	29,8	32,6
71-77	47,4	69,8	4,9	5,0	14,4	21,0	0,9	1,9	587,0	382,0	25,1	32,1
78-84	44,0	58,2	5,0	4,9	11,4	16,6	0,9	1,3	543,0	334,0	25,8	31,5
85-91	43,4	45,4	3,9	4,2	13,0	10,0	3,1	3,3	556,0	324,9	16,8	26,1
92-94	40,3	48,5	3,4	3,3	12,9		3,2	3,4	512,0	331,9	14,4	21,0
95-99	40,3	48,5	4,1	3,6	12,9		3,2	3,2	512,0	331,9	15,9	21,1
100-107	36,3	45,2	4,2	4,0	12,0		3,2	3,3	453,0	302,4	17,8	23,0
108-114	33,7	44,3	4,2	4,2	11,9		3,2	3,3	415,0	286,3	16,7	22,7
115-120	31,2	36,7	4,2	4,1	10,4		3,3	3,3	417,0	263,0	19,0	24,4
121-125	31,2	36,7	4,2	4,1	10,4		3,3	3,3	417,0	263,0	19,0	24,4
126-129	28,6	33,4	5,0	5,7	12,5	2,3	0,5	2,1	332,0	315,0	26,4	28,5
130-137	28,6	33,4	5,0	5,7	12,5	2,3	0,5	2,1	332,0	315,0	26,4	28,5
138-144	27,5	31,7	4,5	5,8	12,7	2,6	0,8	2,0	318,0	317,0	25,3	26,7
145-151	26,3	30,6	4,5	5,5	12,9	2,4	1,2	2,0	315,0	309,4	22,9	28,0
152-158	25,1	28,6	3,9	3,2	15,6	3,2	2,6	2,7	319,7	287,1	17,5	25,2
159-164	23,9	28,1	3,5	2,9	15,0	3,1	2,7	2,6	307,5	273,1	18,5	23,4
165-172	24,6	26,8	3,2	3,1	13,4	3,1	2,6	2,6	316,6	254,1	16,8	23,7
173-178	27,6	28,2	2,6	4,0	8,7	3,1	2,6	0,3	359,4	241,6	17,6	28,2
179-186	18,9	23,6	1,2	3,7	7,9	1,1	0,2	0,1	273,1	229,1	17,5	27,8
187-191	17,7	21,8	1,3	3,7	7,3	2,1	0,2	0,0	262,8	214,0	16,2	27,0
192-200	17,4	21,2	1,4	3,7	5,5	2,3	0,2	0,0	258,3	212,5	15,7	25,8

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Hauptelemente – Anionen und Ionenbilanz**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
Bestimmung aus Mischproben

Lauf- tage	OH <sup>-</sup> [mg/l]				CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]				HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
115-120			2,1	28,8			43,3	23,2				
121-122			2,1	28,8			43,3	23,2				
123-125				33,1			37,3	30,9			21,4	
126-129				33,1			37,3	30,9	37,8		21,4	
130-137				9,2		1,6	37,3	35,2		101,7	28,4	
138-144							33,8			192,6	30,1	
145-151			1,3	35,2			41,8	33,2	38,7	40,5		
152-158				7,8			19,5	122,8	51,7	70,7	14,0	
159-164			6,1	17,7			26,9	34,9	33,4	58,3		
165-172				11,3			36,3	28,6	64,5	117,3	14,8	
173-178			1,8	18,5			25,7	38,9	19,0	44,6		
179-186			2,2				32,1		17,1	32,3		
187-191			3,2	15,7			26,7	48,9	18,0	45,5		
192-200			4,3	28,1			17,4	31,3	11,5	51,8		

Lauf- tage	Fehler Ionenbilanz [%]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
115-120			5,72	-17,48
121-122			7,51	-10,80
123-125			8,81	4,11
126-129	1,94		14,72	7,11
130-137		12,08	23,81	40,47
138-144		27,44	20,89	
145-151	5,02	-1,36	13,90	11,73
152-158	10,88	3,68	-19,52	41,45
159-164	7,25	2,18	1,28	-17,15
165-172	18,88	13,52	13,32	2,13
173-178	27,75	0,04	-16,09	-6,06
179-186	4,47	-7,15	-2,78	
187-191	4,68	-0,53	-8,27	-0,73
192-200	2,14	2,96	-32,99	1,13

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Hauptelemente – Kationen (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
 leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Na [mg/l]				K [mg/l]				Ca [mg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1			202,4	166,4			52,9	43,7			501,8	387,8
2			177,7	177,7			59,5	57,4			356,8	330,5
3	152,8	169,6	126,0	151,1	20,3	26,0	52,3	53,3	540,6	440,0	231,0	218,3
4	152,8	169,6	95,0	123,0	20,3	26,0	46,2	47,9	540,6	440,0	168,3	151,4
5	163,2	173,3	75,0	101,4	24,5	25,6	40,1	43,1	565,3	399,8	130,7	107,2
6	163,2	173,3	60,0	85,0	24,5	25,6	35,2	39,3	565,3	399,8	104,3	82,0
7	175,7	178,5	50,3	74,6	24,9	27,8	31,7	37,7	569,5	365,4	86,4	68,7
8	175,7	178,5	43,3	66,4	24,9	27,8	29,9	37,0	569,5	365,4	74,2	60,5
9	184,7	180,0	38,6	58,7	26,6	33,3	29,1	36,0	557,4	329,5	66,4	52,5
10	184,7	180,0	34,0	54,9	26,6	33,3	27,2	35,3	557,4	329,5	61,9	51,8
11-12	198,0	181,7	29,9	51,2	31,2	36,3	26,7	35,0	559,3	310,1	56,4	52,7
13-14	209,2	182,4	25,5	38,8	33,8	40,0	26,0	35,1	562,0	292,3	50,4	56,9
15-17	219,2	184,3	21,4	28,9	36,3	45,0	26,3	37,5	544,6	273,8	46,1	54,6
18-21	227,0	185,8	16,7	22,4	40,6	49,9	23,8	36,1	512,5	255,4	39,1	58,8
22-24	221,6	181,1	13,8	15,0	41,9	51,8	21,1	32,8	450,6	233,0	34,4	55,8
25-28	217,9	175,5	13,8	15,0	43,6	52,6	21,1	32,8	400,4	216,5	34,4	55,8
29-31	214,4	172,8	9,9	10,7	46,3	54,1	18,5	30,1	358,5	201,4	25,9	54,1
32-35	210,8	168,8	9,9	10,7	47,7	54,6	18,5	30,1	323,8	180,5	25,9	54,1
36-38	199,4	163,2	7,5	8,4	47,9	54,7	17,5	27,4	275,9	169,6	26,8	42,6
39-42	193,9	160,1	7,5	8,4	48,0	54,8	17,5	27,4	251,4	151,0	26,8	42,6
43-49	182,6	148,9	7,6	6,7	47,7	53,1	17,1	25,3	212,7	130,9	28,1	52,9
50-56	169,8	142,0	5,9	5,5	46,3	52,2	15,2	22,9	191,8	114,6	29,0	48,5
57-63	157,5	137,2	8,0	4,7	47,8	52,5	16,1	20,1	175,2	100,2	27,3	39,2
64-70	152,7	132,2	6,1	3,9	45,4	74,6	14,8	18,2	151,4	86,6	25,9	56,9
71-77	141,6	126,4	5,0	3,5	44,1	54,0	14,2	16,8	131,2	74,8	27,3	51,5
78-84	124,6	115,6	4,8	3,2	41,9	50,2	13,4	15,6	112,5	65,9	28,5	60,5
85-91	120,5	110,2	3,6	2,9	60,1	51,7	11,9	14,0	107,9	59,5	29,3	63,4
92-94	112,5	104,4	2,8	2,8	49,0	47,9	11,2	13,5	97,3	50,5	30,7	48,7
95-99	112,5	104,4	2,3	2,6	49,0	47,9	10,2	12,7	97,3	50,5	31,4	61,1
100-107	104,7	98,6	2,3	2,6	41,6	50,4	9,6	12,6	87,0	39,9	32,8	62,8
108-114	97,3	97,9	2,1	2,5	37,6	50,0	8,8	12,1	79,8	37,8	32,7	62,2
115-120	91,3	89,9	2,1	2,6	37,6	49,7	8,7	12,2	72,4	35,3	34,1	66,4
121-125	89,6	88,3	2,6	2,6	40,4	48,4	9,0	12,4	68,9	34,4	32,8	61,5
126-129	89,6	88,3	2,6	2,6	40,4	48,4	9,0	12,4	68,9	34,4	32,8	61,5
130-137	86,6	87,0	2,8	2,6	56,9	67,3	10,0	12,1	63,2	53,9	30,4	24,8
138-144	81,8	81,9	2,8	2,7	43,7	67,7	9,6	11,8	63,3	56,4	29,8	58,1
145-151	79,3	81,6	2,6	2,6	45,2	67,6	8,9	11,6	62,8	56,8	29,6	62,0
152-158	75,3	78,0	2,3	2,3	44,6	66,0	8,0	10,3	63,5	52,5	27,9	61,2
159-164	71,8	73,6	2,7	2,3	44,1	64,2	8,0	9,8	60,6	49,6	28,8	59,8
165-172	68,0	70,9	2,2	2,3	47,7	64,3	7,2	9,1	57,5	45,5	28,3	37,3
173-178	62,4	65,1	2,1	2,2	44,5	63,5	7,0	8,9	54,6	42,8	28,5	59,3
179-186	59,3	62,0	2,0	2,2	45,6	64,0	6,7	8,8	51,7	41,7	27,8	60,3
187-191	55,9	57,3	2,1	2,2	44,9	61,2	6,1	8,4	50,1	36,3	26,7	58,8
192-200	53,3	56,1	1,8	2,2	46,0	62,5	6,1	8,5	50,3	33,8	28,9	59,8

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Hauptelemente – Kationen (SCHUWIRTH 2002)**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
 leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Mg [mg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1	22,86	5,94	6,40	2,19
2	22,86	5,94	4,50	1,03
3	22,86	5,94	3,82	0,77
4	22,86	5,94	3,08	0,61
5		5,53	2,44	0,51
6		5,53	1,90	0,36
7	18,99	4,88	1,55	0,30
8	18,99	4,88	1,33	0,22
9	15,68	4,21	1,16	0,20
10	15,68	4,21	1,00	0,20
11-12	13,74	3,95	0,88	0,21
13-14	11,20	3,72	0,72	0,06
15-17	9,18	3,53	0,61	0,02
18-21	7,32	3,31	0,45	0,00
22-24	6,09	3,16	0,42	0,00
25-28	5,13	3,02	0,42	0,00
29-31	4,69	2,87	0,20	0,00
32-35	4,19	2,74	0,20	0,00
36-38	3,79	2,56	0,12	0,00
39-42	3,60	2,38	0,12	0,00
43-49	3,17	1,81	0,10	0,00
50-56	2,76	1,81	0,07	0,00
57-63	2,41	1,57	0,00	0,03
64-70	2,11	1,36	0,00	0,02
71-77	1,75	1,15	0,00	0,00
78-84	1,44	0,96	0,00	0,00
85-91	1,34	0,83	0,00	0,00
92-94	1,21	0,55	0,00	0,00
95-99	1,21	0,55	0,00	0,00
100-107	1,05	0,24	0,00	0,00
108-114	0,94	0,13	0,00	0,00
115-120	0,82	0,08	0,00	0,00
121-125				
126-129				
130-137				
138-144				
145-151				
152-158				
159-164	0,42	0,00	0,00	0,00
165-172	0,36	0,00	0,00	0,00
173-178				
179-186				
187-191				
192-200				

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Spurenelemente - Schwer-, Leicht- und Halbmetalle**Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Al [mg/l]				Sb [µg/l]				As [µg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			<0,04	0,05			3,2	1,2			3,8	5,8
8-14	<0,04	<0,04	<0,04	0,11	1,2	1,0	3,7	1,1	3,6	5,4	4,6	4,6
15-17	<0,04	<0,04	<0,04	0,28	1,2	1,0	3,2	1,1	3,6	5,4	4,9	4,2
18-21	<0,04	<0,04	<0,04	0,28	1,5	1,0	3,2	1,1	4,2	4,2	4,9	4,2
22-28	<0,04	<0,04	<0,04	0,41	1,5	1,0	2,6	0,6	4,2	4,2	5,9	2,6
29-35	<0,04	<0,04	<0,04	0,41	1,5	1,0	2,2	0,7	4,2	4,2	5,7	2,4
36-42	<0,04	<0,04	0,04	0,55	1,6	1,2	2,1	0,7	3,3	4,3	6,4	2,1
43-49	<0,04	<0,04	<0,04	0,64	1,5	1,1	2,1	0,6	3,1	4,7	6,2	2,2
50-56	<0,04	<0,04	<0,04	0,57	1,5	1,1	1,6	0,6	3,1	4,9	5,4	1,6
57-63	<0,04	<0,04	0,04	0,62	0,9	1,0	1,5	0,6	4,8	5,5	5,0	1,8
64-70	<0,04	<0,04	<0,04	0,68	1,5	1,0	1,0	0,6	3,2	5,5	4,5	2,3
71-77	<0,04	<0,04	0,05	0,67	1,8	1,0	1,3	0,6	3,6	5,9	4,4	1,7
78-84	<0,04	<0,04	0,06	0,64	1,4	0,6	1,2	<0,5	3,2	5,2	4,0	1,6
85-91	<0,04	<0,04	0,07	0,62	1,4	0,7	1,0	<0,5	3,3	6,9	3,8	1,7
92-94	<0,04	0,05	0,10	0,67	1,3	0,7	0,8	<0,5	3,3	8,5	3,5	0,9
95-101	<0,04	0,05	0,13	0,68	1,3	0,7	0,7	<0,5	3,3	8,5	3,3	1,6
102-107	<0,04		0,14	0,67	1,5		0,8	<0,5	3,9		3,7	1,7
108-114	<0,04		0,17	0,68	1,4		0,7	<0,5	4,3		3,4	1,4
115-120	<0,04		0,20	0,69	1,4		0,8	<0,5	5,0		3,6	1,7
121-137	<0,04	0,25	0,17	0,69	2,1	1,2	1,2	0,7	8,1	10,1	4,2	1,7
138-158	<0,04	0,13	0,18	0,74	2,2	1,1	1,2	0,7	8,2	10,2	4,0	2,4
159-178	<0,04	0,17	0,26	0,73	1,9	1,0	1,0	0,8	9,4	9,3	3,7	2,3
179-200	<0,04	0,19	0,33	0,69	1,8	0,9	0,9	0,9	10,7	8,3	3,5	2,7

Lauf- tage	Pb [µg/l]				Cd [µg/l]				Cr [µg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			<0,5	<0,5			<0,5	<0,5			83,6	130,0
8-14	<0,5	0,9	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	131,0	193,0	23,3	38,2
15-17	<0,5	0,9	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	131,0	193,0	23,4	18,1
18-21	<0,5	1,0	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	183,0	140,0	23,4	18,1
22-28	<0,5	1,0	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	183,0	140,0	10,9	11,4
29-35	<0,5	1,0	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	183,0	140,0	4,8	11,7
36-42	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	150,0	133,0	14,7	11,0
43-49	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	124,0	149,0	7,3	10,6
50-56	0,5	<0,5	6,5	<0,5	<0,5	<0,5	2,0	<0,5	107,0	123,0	7,3	9,8
57-63	0,8	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	108,0	107,0	4,6	8,7
64-70	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	109,0	107,0	1,7	8,8
71-77	<0,5	<0,5	<0,5	6,3	<0,5	<0,5	<0,5	1,3	95,4	98,7	1,9	8,7
78-84	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	87,7	78,1	11,1	7,7
85-91	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	83,8	84,3	3,2	7,3
92-94	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	74,1	61,2	3,6	7,0
95-101	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	74,1	61,2	3,8	6,8
102-107	<0,5		<0,5	<0,5	<0,5		<0,5	<0,5	70,3		4,5	7,4
108-114	<0,5		<0,5	<0,5	<0,5		<0,5	<0,5	69,9		3,8	6,7
115-120	<0,5		<0,5	<0,5	<0,5		<0,5	<0,5	59,7		4,3	6,8
121-137	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	61,4	4,2	5,6	42,5
138-158	<0,5	6,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	52,1	3,2	5,7	6,8
159-178	<0,5	<0,5	<0,5	0,8	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	44,1	1,9	4,7	7,0
179-200	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	35,2	<1,5	4,2	6,9

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Spurenelemente - Schwer-, Leicht- und Halbmetalle**Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Fe [mg/l]				Co [µg/l]				Cu [µg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			<0,03	<0,03			6,5	5,8			34,2	43,1
8-14	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	14,6	10,6	1,6	1,4	33,4	34,4	20,8	22,2
15-17	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	14,6	10,6	0,9	0,7	33,4	34,4	9,5	13,2
18-21	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	15,8	9,5	0,9	0,7	31,1	29,7	9,5	13,2
22-28	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	15,8	9,5	0,7	<0,5	31,1	29,7	10,7	5,1
29-35	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	15,8	9,5	<0,5	<0,5	31,1	29,7	4,9	9,5
36-42	<0,03	<0,03	0,16	<0,03	10,2	7,8	<0,5	<0,5	33,3	21,3	11,8	2,8
43-49	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	8,5	7,3	0,6	<0,5	30,3	25,5	2,5	13,2
50-56	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	7,4	6,4	<0,5	<0,5	18,8	18,6	7,5	7,3
57-63	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	5,2	4,8	<0,5	<0,5	16,6	20,1	4,6	5,3
64-70	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,7	4,8	<0,5	<0,5	14,0	20,1	4,9	12,0
71-77	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	5,9	4,3	<0,5	<0,5	17,2	17,0	2,1	9,1
78-84	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	4,6	2,9	<0,5	<0,5	17,3	11,1	2,4	18,2
85-91	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	4,3	3,2	<0,5	<0,5	22,1	13,6	8,3	7,6
92-94	<0,03	0,06	<0,03	<0,03	3,6	2,7	<0,5	<0,5	15,2	24,6	13,5	7,8
95-101	<0,03	0,06	<0,03	<0,03	3,6	2,7	<0,5	<0,5	15,2	24,6	5,1	8,9
102-107	<0,03		<0,03	<0,03	3,6		<0,5	<0,5	12,0		14,4	12,5
108-114	<0,03		<0,03	<0,03	3,2		<0,5	<0,5	15,6		4,4	8,2
115-120	<0,03		<0,03	<0,03	2,9		<0,5	<0,5	16,0		3,0	7,0
121-137	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	3,6	2,1	<0,5	<0,5	14,4	20,7	2,8	4,4
138-158	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	3,1	1,4	<0,5	<0,5	13,8	13,1	3,0	4,7
159-178	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	2,7	1,2	<0,5	<0,5	12,7	7,6	3,7	7,2
179-200	0,04	<0,03	<0,03	<0,03	2,5	1,0	<0,5	<0,5	8,3	5,7	2,0	5,6

Lauf- tage	Mn [µg/l]				Mo [µg/l]				Ni [µg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			26,1	1,1			19,6	23,3			7,8	7,5
8-14	14,3	5,6	11,8	0,6	21,5	28,0	7,1	8,8	5,9	6,6	2,3	2,8
15-17	14,3	5,6	1,3	<0,5	21,5	28,0	4,7	6,6	5,9	6,6	1,4	2,2
18-21	3,7	1,5	1,3	<0,5	39,3	31,9	4,7	6,6	6,8	6,5	1,4	2,2
22-28	3,7	1,5	0,7	<0,5	39,3	31,9	4,4	3,6	6,8	6,5	1,1	1,1
29-35	3,7	1,5	0,6	<0,5	39,3	31,9	3,7	3,4	6,8	6,5	< 1,0	< 1,0
36-42	2,2	1,2	3,1	<0,5	41,3	35,7	3,1	3,4	6,0	5,9	1,1	1,3
43-49	3,1	0,5	0,6	2,0	38,3	37,2	3,0	2,7	5,0	4,9	1,2	1,2
50-56	4,6	1,5	<0,5	<0,5	36,9	34,7	2,5	2,5	4,7	6,4	< 1,0	1,1
57-63	3,4	<0,5	0,8	<0,5	33,5	33,5	2,5	2,4	4,0	3,9	1,7	2,6
64-70	0,6	<0,5	1,0	<0,5	38,2	33,5	2,1	2,1	5,0	3,9	1,1	< 1,0
71-77	1,2	<0,5	0,5	<0,5	35,9	32,0	2,0	1,9	12,7	3,5	< 1,0	1,3
78-84	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	31,5	25,9	1,5	1,5	3,3	2,4	< 1,0	< 1,0
85-91	1,1	<0,5	<0,5	<0,5	30,7	30,3	1,3	1,3	3,1	2,5	< 1,0	< 1,0
92-94	1,1	2,6	<0,5	<0,5	26,5	27,7	0,9	1,1	3,9	3,2	< 1,0	1,1
95-101	1,1	2,6	<0,5	<0,5	26,5	27,7	0,9	1,1	3,9	3,2	< 1,0	< 1,0
102-107	1,8		<0,5	<0,5	26,4		1,1	1,1	2,8		< 1,0	< 1,0
108-114	<0,5		<0,5	<0,5	24,8		0,9	1,0	2,7		< 1,0	< 1,0
115-120	4,1		<0,5	<0,5	22,7		0,8	1,0	2,5		< 1,0	< 1,0
121-137	4,1	0,7	0,6	1,3	25,1	25,5	1,9	1,9	1,6	6,0	< 1,0	15,4
138-158	3,4	2,1	3,1	<0,5	22,6	24,3	1,6	1,8	< 1,0	4,7	< 1,0	1,7
159-178	2,2	0,5	0,5	0,5	18,9	22,1	1,4	1,6	< 1,0	3,7	< 1,0	< 1,0
179-200	2,5	1,1	0,8	<0,5	16,1	18,3	1,2	1,6	< 1,0	2,9	< 1,0	< 1,0

**Fortsetzung Säulenversuche mit Material RCL 1: Spurenelemente - Schwer-, Leicht- und Halbmetalle**Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø  
leeres Feld = nicht bestimmt worden; überwiegend Mischproben

Lauf- tage	Hg [µg/l]				Se [µg/l]				Si [mg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			<0,1	<0,1			<5,0	<5,0			11,1	19,1
8-14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	11,8	6,5	<5,0	<5,0	5,2	4,0	15,0	21,2
15-17	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	11,8	6,5	<5,0	<5,0	5,2	4,0	18,1	22,0
18-21	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,5	<5,0	<5,0	<5,0	5,4	6,8	18,1	22,0
22-28	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,5	<5,0	<5,0	<5,0	5,4	6,8	9,4	6,7
29-35	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,5	<5,0	<5,0	<5,0	5,4	6,8	11,5	6,3
36-42	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	6,6	<5,0	<5,0	<5,0	4,6	8,0	23,7	22,2
43-49	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	7,7	7,8	<5,0	<5,0	8,1	10,2	23,7	21,5
50-56	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	7,1	7,8	<5,0	<5,0	5,8	8,9	18,0	13,7
57-63	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	8,2	9,7	19,0	15,6
64-70	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	6,2	<5,0	<5,0	<5,0	3,8	9,7	3,3	18,3
71-77	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	6,0	<5,0	<5,0	<5,0	9,2	11,1	20,7	18,1
78-84	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	6,2	8,3	22,4	17,1
85-91	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	5,1	8,8	21,3	16,5
92-94	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	7,6	11,3	23,4	18,4
95-101	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	7,6	11,3	22,5	18,4
102-107	<0,1		<0,1	<0,1	<5,0		<5,0	<5,0	8,5		21,6	18,3
108-114	<0,1		<0,1	<0,1	<5,0		<5,0	<5,0	9,1		20,9	18,5
115-120	<0,1		<0,1	<0,1	<5,0		<5,0	<5,0	10,0		20,5	18,5
121-137					7,7	6,7	<5,0	<5,0	12,3	19,4	21,3	19,3
138-158					6,8	6,4	<5,0	<5,0	12,5	18,3	21,4	19,1
159-178					5,1	<5,0	<5,0	<5,0	13,9	19,1	19,8	19,4
179-200					<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	13,9	18,9	17,7	19,1

Lauf- tage	Zn [mg/l]				Sn [µg/l]			
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
1-7			<0,03	<0,03			1,7	2,3
8-14	0,05	0,04	<0,03	<0,03	16,1	14,9	1,0	1,2
15-17	0,05	0,04	<0,03	<0,03	16,1	14,9	0,8	1,4
18-21	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,3	4,5	0,8	1,4
22-28	<0,03	<0,03	0,04	<0,03	6,3	4,5	0,6	1,7
29-35	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,3	4,5	0,8	1,4
36-42	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	12,0	12,1	0,9	1,7
43-49	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	8,6	6,6	1,2	1,3
50-56	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,3	8,4	1,2	1,3
57-63	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	15,6	8,3	0,6	0,7
64-70	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	13,8	8,3	1,3	1,9
71-77	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	5,6	8,3	2,9	4,0
78-84	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	10,9	9,5	1,5	3,8
85-91	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	8,3	7,0	1,3	1,8
92-94	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	7,6	10,5	1,1	2,5
95-101	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	7,6	10,5	1,2	2,1
102-107	<0,03		<0,03	<0,03	10,8		1,4	1,6
108-114	<0,03		<0,03	<0,03	11,8		1,1	1,1
115-120	<0,03		<0,03	<0,03	8,4		1,3	1,7
121-137	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	6,7	6,1	1,8	1,9
138-158	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	8,1	6,1	2,2	1,8
159-178	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	9,6	9,1	1,3	1,6
179-200	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	8,7	6,1	1,2	1,6

**Säulenversuche mit Material RCL 1: Aufsummierte Massenanteile, die sich bis zur Einstellung der Säulenversuche bei den aufgeführten Wasser/Feststoff-Verhältnissen ergeben haben**

Säule 1=800mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 2=800mm/a, 0-10 mm Ø ; Säule 3=8650mm/a, 0-45 mm Ø ; Säule 4=8650mm/a, 0-10 mm Ø

Aufsummierte Werte nach einer Laufzeit von 200 Tagen	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4
Wasser/Feststoff-Verhältnis [l/kg]	0,6	0,7	11,7	12,4
Cl [mg/kg]	35,5	50,7	78,6	108,3
NO <sub>3</sub> [mg/kg]	11,0	5,2	14,9	26,2
SO <sub>4</sub> [mg/kg]	420,7	311,3	756,8	780,5
Na [mg/kg]	78,3	82,6	117,2	138,1
K [mg/kg]	28,1	42,1	160,9	223,9
Ca [mg/kg]	108,5	76,3	450,1	745,4
Mg [mg/kg]	1,5	0,8	2,5	0,5
Al [mg/kg]	0,0	0,1	1,5	7,4
Sb [µg/kg]	1,1	0,7	17,4	7,7
As [µg/kg]	3,9	5,4	50,2	29,4
Pb [µg/kg]	0,0	0,7	2,3	3,8
Cd [µg/kg]	0,0	0,0	0,7	0,5
Cr [µg/kg]	55,8	48,7	115,6	171,5
Fe [mg/kg]	0,0	0,0	0,1	0,0
Co [µg/kg]	4,0	3,1	4,6	3,7
Cu [µg/kg]	11,9	13,4	77,6	117,5
Mn [µg/kg]	2,2	1,0	26,7	3,7
Mo [µg/kg]	17,2	20,0	33,2	39,0
Ni [µg/kg]	2,0	3,5	7,7	13,6
Hg [µg/kg]	0,0	0,0	0,0	0,0
Se [µg/kg]	3,2	2,0	0,0	0,0
Si [mg/kg]	6,1	9,7	218,6	223,6
Zn [mg/kg]	0,0	0,0	0,0	0,0
Sn [µg/kg]	5,9	5,7	16,2	22,2

**Schüttelversuche (Material fein gemahlen) mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis und Langzeit-Standtest (Originalkorngröße) mit den Materialien RCL 1 und 2:  
pH, elektr. Leitfähigkeit, Konzentration Haupt- und Spurenelemente, Ionenbilanz**

Proben bei Wasser/Feststoff-Verhältnis 100:1, 200:1, 300:1 stammen aus anderer Probencharge als Proben mit kleinerem Wasser/Feststoff-Verhältnis;

leeres Feld = nicht bestimmt

Material RCL 1									
Wasser/Feststoff-Verhältnis	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Fehler Ionenbilanz [%]
2:1	11,9	1868	83,1	49,9	0,0	44,6	24,9	114,4	0,5
4:1	11,8	1622	83,3	34,4	0,0	22,2	15,7	112,0	1,4
10:1	11,7	1296	71,4	32,4	0,0	9,1	5,9	92,4	2,2
20:1	11,6	993	56,5	27,3	0,0	5,0	3,5	65,8	5,1
100:1*	11,5	810				0,6	0,0	17,0	
200:1*	10,9	185				0,0	0,0	10,5	
300:1*	10,5	175				0,0	0,0	7,9	
Langzeit-Standtest	9,8	2460	0,7	25,0	0,0	118,5	2,8	1198,0	-6,7

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
2:1	78,4	90,4	101,0	0,06
4:1	43,0	58,6	117,0	0,03
10:1	18,5	27,6	116,4	0,04
20:1	10,8	16,6	92,9	0,04
100:1*	2,2	3,2	73,7	
200:1*	1,3	2,2	53,8	
300:1*	1,0	1,6	42,4	
Langzeit-Standtest	160,1	60,9	451,0	1,80

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]
2:1	1,72	<0,5	1,6	0,8	<0,5	59,8	0,05	20,6
4:1	1,46	<0,5	1,1	<0,5	<0,5	32,5	<0,03	9,9
10:1	1,51	0,8	1,1	<0,5	<0,5	16,9	<0,03	3,5
20:1	1,48	0,8	1,0	1,8	<0,5	10,1	<0,03	1,6
100:1*	1,39	<0,5	1,0	868,0	<0,5	6,4	<0,03	37,1
200:1*	0,65	<0,5	1,5	284,0	<0,5	2,0	<0,03	19,2
300:1*	<0,04	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	<0,03	<0,5
Langzeit-Standtest	<0,04	1,5	5,1	0,6	<0,5	51,1	<0,03	10,1

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
2:1	25,0	4,1	14,2	4,5	<5,0	10,9	<0,03	<0,5
4:1	15,2	<0,5	8,1	2,9	<5,0	10,5	<0,03	<0,5
10:1	9,7	<0,5	4,2	2,5	<5,0	11,3	<0,03	<0,5
20:1	7,5	<0,5	2,3	2,3	<5,0	12,7	<0,03	<0,5
100:1*	2,6	<0,5	0,9	1,2	7,4	14,2	0,05	<0,5
200:1*	2,2	1,1	<0,5	<1,0	<5,0	11,6	<0,03	<0,5
300:1*	<1,0	<0,5	<0,5	<1,0	<5,0	<0,1	<0,03	<0,5
Langzeit-Standtest	24,9	1,3	50,1	5,7	12,9	21,2	<0,03	3,6

**Fortsetzung Schüttelversuche (Material fein gemahlen) mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis und Langzeit-Standtest (Originalkorngröße) mit den Materialien RCL 1 und 2:  
pH, elektr. Leitfähigkeit, Konzentration Haupt- und Spurenelemente, Ionenbilanz**

Proben bei Wasser/Feststoff-Verhältnis 100:1, 200:1, 300:1 stammen aus anderer Probencharge als Proben mit kleinerem Wasser/Feststoff-Verhältnis;

leeres Feld = nicht bestimmt

<b>Material RCL 2</b>									
Wasser/Feststoff-Verhältnis	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	OH <sup>-</sup> [mg/l]	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	Cl [mg/l]	NO <sub>3</sub> [mg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]	Fehler Ionenbilanz [%]
2:1	12,0	2110	124,43	103,01	0,00	43,1	14,5	89,0	21,6
4:1	12,0	1765	91,28	54,52	0,00	23,1	7,5	84,8	3,5
10:1	11,9	1492	86,72	36,11	0,00	8,9	3,7	95,4	4,6
20:1	11,8	1179	69,56	31,62	0,00	4,8	2,8	70,0	5,5
100:1*	11,4	548				0,7	0,0	16,5	
200:1*	10,7	273				0,0	0,0	10,7	
300:1*	10,3	175				0,0	0,0	8,2	
Langzeit-Standtest	10,9	2020	5,4	28,1	0,0	106,1	4,7	788,0	-9,1

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]
2:1	79,8	132,9	88,1	0,00
4:1	45,2	80,5	107,4	0,00
10:1	18,0	35,3	129,9	0,00
20:1	10,1	19,7	110,0	0,00
100:1*	1,8	3,0	51,0	
200:1*	1,0	2,1	36,5	
300:1*	0,8	1,6	28,9	
Langzeit-Standtest	171,9	79,2	264,0	0,00

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Al [mg/l]	Sb [µg/l]	As [µg/l]	Pb [µg/l]	Cd [µg/l]	Cr [µg/l]	Fe [mg/l]	Co [µg/l]
2:1	2,64	<0,5	1,1	0,5	<0,5	114,0	<0,03	22,6
4:1	2,19	<0,5	0,8	0,7	<0,5	65,7	<0,03	11,6
10:1	2,06	<0,5	0,7	0,5	<0,5	27,2	0,05	4,5
20:1	1,84	<0,5	0,7	0,8	<0,5	17,4	<0,03	2,1
100:1*	1,36	<0,5	1,3	1450,0	<0,5	7,1	<0,03	43,9
200:1*	0,73	<0,5	1,6	517,0	<0,5	1,6	<0,03	13,2
300:1*	<0,04	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<1,5	<0,03	<0,5
Langzeit-Standtest	0,08	0,9	5,8	0,6	<0,5	152,0	0,06	13,6

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cu [µg/l]	Mn [µg/l]	Mo [µg/l]	Ni [µg/l]	Se [µg/l]	Si [mg/l]	Zn [mg/l]	Sn [µg/l]
2:1	23,7	<0,5	12,5	5,2	<5,0	7,6	<0,03	<0,5
4:1	14,3	<0,5	9,1	12,1	<5,0	7,5	<0,03	<0,5
10:1	9,3	1,8	3,5	3,6	<5,0	8,0	<0,03	<0,5
20:1	7,4	1,3	1,8	2,6	<5,0	10,7	<0,03	<0,5
100:1*	9,8	1,5	0,5	1,4	<5,0	15,2	0,07	<0,5
200:1*	3,6	1,4	<0,5	<1,0	<5,0	9,3	<0,03	<0,5
300:1*	<1,0	<0,5	<0,5	<1,0	<5,0	<0,1	<0,03	<0,5
Langzeit-Standtest	40,6	1,1	36,1	13,7	12,9	27,0	<0,03	0,7

**Schüttelversuche (Material fein gemahlen) mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis und Langzeit-Standtest (Originalkorngröße) mit den Materialien RCL 1 und 2:  
Massenanteil Haupt- und Spurenelemente**

\*Proben bei Wasser/Feststoff-Verhältnis 100:1, 200:1, 300:1 stammen aus anderer Probencharge als Proben mit kleinerem Wasser/Feststoff-Verhältnis

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

<b>Material RCL 1</b>							
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]
2:1	89	50	229	157	181	202	0,1
4:1	89	63	448	172	234	468	0,1
10:1	91	59	924	185	276	1164	0,4
20:1	99	69	1317	216	331	1859	0,8
100:1*	64		1696	220	320	7366	
200:1*			2100	264	430	10760	
300:1*			2370	285	480	12720	
Langzeit-Standtest	27	1	276	37	14	104	0,4

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]
2:1	3		3	2		120	0,1	41
4:1	6		4			130		40
10:1	15	8	11			169		35
20:1	30	16	20	36		202		32
100:1*	139		95	86800		643		3710
200:1*	130		300	56800		398		3840
300:1*								
Langzeit-Standtest		0,4	1	0,1		12		2

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
2:1	50	8	28	9		22		
4:1	61		32	12		42		
10:1	97		42	25		113		
20:1	151		45	46		254		
100:1*	258		87	117	735	1420	5	
200:1*	438	222				2320		
300:1*								
Langzeit-Standtest	6	0,3	12	1	3	5		0,8

**Fortsetzung Schüttelversuche (Material fein gemahlen) mit ansteigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis und Langzeit-Standtest (Originalkorngröße) mit den Materialien RCL 1 und 2:  
Massenanteil Haupt- und Spurenelemente**

\* Proben bei Wasser/Feststoff-Verhältnis 100:1, 200:1, 300:1 stammen aus anderer Probencharge als Proben mit kleinerem Wasser/Feststoff-Verhältnis

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

<b>Material RCL 2</b>							
Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]
2:1	86	29	178	160	266	176	0,0
4:1	93	30	339	181	322	430	0,0
10:1	89	37	954	180	353	1299	0,0
20:1	97	56	1400	202	395	2199	0,0
100:1*	65		1653	180	298	5100	
200:1*			2130	208	418	7300	
300:1*			2460	225	477	8664	
Langzeit-Standtest	24	1	182	40	18	61	0,0

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]
2:1	5		2	1		228		45
4:1	9		3	3		263		46
10:1	21		7	5		272	0,5	45
20:1	37		14	16		348		41
100:1*	136		132	145000		706		4390
200:1*	146		312	103400		326		2640
300:1*								
Langzeit-Standtest	0,02	0,2	1	0,1		35	0,01	3

Wasser/Feststoff-Verhältnis	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
2:1	47		25	10		15		
4:1	57		36	48		30		
10:1	93	18	35	36		80		
20:1	147	25	37	52		214		
100:1*	981	149	52	136		1520	7	
200:1*	724	288				1856		
300:1*								
Langzeit-Standtest	9	0,2	8	3	3	6		0,2

**Röntgen-Fluoreszenz-Analyse der Einzelkomponenten aus Material RCL 1**

von der Einzelkomponente Asphalt waren nur Spurenelemente bestimmbar;

leeres Feld = Gehalt kleiner Bestimmungsgrenze

<b>Bezeichnung Einzelkomponenten Material RCL 1</b>	Si [g/kg]	Al [g/kg]	Fe [g/kg]	Mn [g/kg]	Mg [g/kg]	Ca [g/kg]	Na [g/kg]	K [g/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff	354	12	8	0	4	58	2	4
Beton-gebrochener Zuschlagstoff	265	20	21	1	32	102	5	5
Beton-dunkler Zuschlagstoff	261	20	12	1	14	104	4	6
Zementputz	342	10	6	0	4	70	2	5
Ziegel	334	33	17	1	8	24	2	11
Schlacke	348	23	16	1	8	29	2	7
Kacheln, Glas, Fliesen	319	38	3	0	9	31	17	8
Vulkanite	161	37	8	7	34	253	4	5
sonstige Natursteine	308	26	23	1	31	37	8	8

	Zn [mg/kg]	Co [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	As [mg/kg]	Sn [mg/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff	39	52	48	14	22	6	5	2
Beton-gebrochener Zuschlagstoff	61	71	191	11	113	25	2	2
Beton-dunkler Zuschlagstoff	103	62	103	18	64	21	2	4
Zementputz	29	63	33	12	15	7	4	1
Ziegel	91	102	109	38	51	21	12	4
Asphalt	68	109	200	31	109	32	5	5
Schlacke	35	126	116	7	42	11	2	2
Kacheln, Glas, Fliesen	1001	168	88	2101	26	19	3	156
Vulkanite	25	40	47	5	12		1	1
sonstige Natursteine	67	102	219	16	111	33	2	4

	Cd [mg/kg]	Sb [mg/kg]	Ba [mg/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff			223
Beton-gebrochener Zuschlagstoff			401
Beton-dunkler Zuschlagstoff	1,0		447
Zementputz	0,5		250
Ziegel	0,5		729
Asphalt	1,5	2,5	380
Schlacke			268
Kacheln, Glas, Fliesen	1,0		956
Vulkanite	1,0	2	892
sonstige Natursteine	1,0		384

**Schüttelversuche mit fein gemahlten Einzelkomponenten aus Material RCL 1:  
 pH, elektr. Leitfähigkeit, Ionenbilanz, Massenanteil Haupt- und Spurenelemente**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

Bezeichnung Einzelkomponenten Material RCL 1	pH	Leitfähigkeit [µS/cm]	Fehler Ionenbilanz [%]	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff	11,8	1767	2,3	136	51	451	154	335	1367
Beton-gebrochener Zuschlagstoff	12,4	6330	3,8	81	37	26	472	605	4780
Beton-dunkler Zuschlagstoff	12,4	6880	-7,3	184	63	19	221	511	6350
Zementputz	11,2	714	30,3	104	46	1009	198	250	653
Ziegel	11,6	1170	8,5	68	14	704	76	159	1058
Asphalt	9,3	128	3,6	20	4	152	140	72	55
Schlacke	8,9	173	3,9	15	2	299	55	133	140
Kacheln,Glas,Fliesen	11,3	708	12,1	42	20	542	619	61	314
Vulkanite	11,0	992	-41,5	17	18	1584	185	371	1289
sonstige Natursteine	9,6	165	4,8	101	5	43	243	112	14

	Mg [mg/kg]	Al [mg/kg]	Sb [µg/kg]	As [µg/kg]	Pb [µg/kg]	Cd [µg/kg]	Cr [µg/kg]	Fe [mg/kg]	Co [µg/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff		24					259		27
Beton-gebrochener Zuschlagstoff		8			9		114		53
Beton-dunkler Zuschlagstoff		5			17		109		45
Zementputz		2	5	15			762		13
Ziegel		16		21			446		33
Asphalt	10	2	29	298			93		8
Schlacke	31	2	6	66					19
Kacheln,Glas,Fliesen		7	6	19			317		36
Vulkanite	0,1	9			7		24		6
sonstige Natursteine	3	8	9	138	5		19	5	142

	Cu [µg/kg]	Mn [µg/kg]	Mo [µg/kg]	Ni [µg/kg]	Se [µg/kg]	Si [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Sn [µg/kg]
Beton-fluviatiler Zuschlagstoff	24		51	34		49		
Beton-gebrochener Zuschlagstoff	30		27	93		4		
Beton-dunkler Zuschlagstoff	112	10	27	128	78	3		
Zementputz	120		38	22		350		
Ziegel	34		33	21		130		
Asphalt	69	15	137	26		56		
Schlacke	41	48	136	11		38		
Kacheln,Glas,Fliesen	38		23	14		328		
Vulkanite	39	15	26	20		99		
sonstige Natursteine	36	154	60	24		72		

**S4-Test mit unterschiedlichen Probenchargen aus Material RCL 1 und 2 zur Untersuchung der Materialheterogenität:****pH, elektr. Leitfähigkeit, Ionenbilanz, Massenanteil Hauptelemente**

leeres Feld = Konzentration kleiner Bestimmungsgrenze

<b>Material RCL 1</b>										
	pH	Leitfähigkeit [μS/cm]	Fehler Ionen- bilanz [%]	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]
Probe 1 - Charge 1	11,3	739	12,3	59	42	724	90	85	679	0,0
Probe 2 - Charge 1	11,3	644	3,9	46	45	735	92	84	678	0,0
Probe 3 - Charge 1	11,2	656	9,9	56	39	954	91	86	743	0,0
Probe 4 - Charge 1	11,3	650	12,1	64	50	767	91	83	702	0,0
Probe 5 - Charge 1	11,3	664	10,2	55	46	1010	87	81	781	0,0
Probe 6 - Charge 1	11,2	637	12,3	54	54	812	93	84	695	0,5
Probe 1 - Charge 2	11,7	1146	8,5	40	57	468	89	99	1059	0,0
Probe 2 - Charge 2	11,7	1044	8,8	35	13	488	88	98	981	0,0
Probe 3 - Charge 2	11,7	1080	6,7	35	14	561	86	103	1032	0,0
Probe 4 - Charge 2	11,6	940	9,4	38	13	483	81	90	886	0,0
Probe 5 - Charge 2	11,6	1012	7,2	44	16	962	106	104	1071	0,0
Probe 6 - Charge 2	11,6	923	9,1	42	16	511	91	100	876	0,0

<b>Material RCL 2</b>										
	pH	Leitfähigkeit [μS/cm]	Fehler Ionen- bilanz [%]	Cl [mg/kg]	NO <sub>3</sub> [mg/kg]	SO <sub>4</sub> [mg/kg]	Na [mg/kg]	K [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Mg [mg/kg]
Probe 1 - Charge 1	11,4	778	8,6	40	15	907	83	99	810	0,0
Probe 2 - Charge 1	11,4	719	9,4	35	16	896	76	93	787	0,0
Probe 3 - Charge 1	11,4	732	7,3	32	10	835	78	97	764	0,0
Probe 4 - Charge 1	11,4	851	7,2	43	14	1649	79	97	1076	0,0
Probe 5 - Charge 1	11,4	729	10,6	42	15	951	84	98	780	0,0
Probe 6 - Charge 1	11,4	718	8,9	39	13	957	84	97	775	0,0
Probe 1 - Charge 2	10,8	514	9,6	35	10	1412	86	91	693	1,6
Probe 2 - Charge 2	10,9	548	10,6	34	10	1410	86	92	717	1,1
Probe 3 - Charge 2	10,9	531	8,9	41	15	1490	78	97	728	1,4
Probe 4 - Charge 2	10,8	385	10,0	31	9,18	786	62	76	466	1,2
Probe 5 - Charge 2	11,1	501	10,6	39	14	967	71	86	601	0,5
Probe 6 - Charge 2	11,2	544	13,2	37	9,04	814	64	78	606	0,0