Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Univ. Prof. DI Dr. Raimund Haberl

ENTWICKLUNG EINER METHODE ZUR KAPAZITÄTSPRÜFUNG VON FILTERMATERIAL ZUR REINIGUNG VON STRASSENABWÄSSERN

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieurin

eingereicht von:

MAGNET, SONJA

Betreuer: Fürhacker, M.

Mitbetreuer: Measho Haile, T.

Matrikelnummer 0807560

26.01.2014

Vorwort

Diese Masterarbeit wurde am Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt, am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz unter der Leitung von Frau Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Maria Fürhacker durchgeführt. Sie entstand im Rahmen eines ÖNORM Projektes zur Entwicklung einer Prüfmethode für technische Filtermaterialien.

Besonders möchte ich Frau Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Maria Fürhacker für die Ermöglichung dieser Arbeit und die Unterstützung, sowie Begutachtung danken.

Außerdem möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Tadele Measho Haile danken, welcher mich bei der Versuchsdurchführung vollstens unterstützt hat und mir bei allen Fragen immer zur Seite stand.

Weiters gilt mein Dank dem Labor des Institutes, unter der Leitung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Roza Allabashi, für die Unterstützung bei der Laborarbeit und für die Analyse von über 130 Proben. Auch dem Leiter des Technikums, Herrn Friedrich Kropitz, sei für seine Hilfe im Technikum gedankt.

Von meinen Studienkollegen möchte ich vor allem Herrn Alexander Lins danken. Er hat mich bei der Versuchsdurchführung, sowie fachlich sehr unterstützt. Ebenso Herrn Fabian Vanas, der zeitgleich am Institut Versuche durchgeführt hat, möchte ich für seine Hilfe und Freundschaft danken.

Besonders möchte ich auch meiner Schwester Nina fürs Korrekturlesen und den Druck der Arbeit danken.

Ein großes Dankeschön geht an meine Familie und meinen Freund Jonathan für die seelische Unterstützung während der gesamten Arbeit.

Kurzfassung

Straßenabwässer von Verkehrsflächen können Spurenstoffe in Konzentrationen enthalten, die über den dafür vorgesehenen Schwellenwerten liegen. Dazu zählen vor allem Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe.

Zum Schutz des Grundwassers bestehen in Österreich Gewässerschutzanlagen, welche diese Abwässer vor der Versickerung reinigen. Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit dieser Anlagen soll eine Prüfmethode entwickelt werden. Im Zuge eines ÖNORM Projektes wurden dazu Anforderungen bezüglich Prüfkriterien und Versuchsdurchführung gegeben. Es sollte eine Methode im Labor erarbeitet werden, mit der geprüft werden kann, ob die Kapazität von Filtermaterial aus bestehenden oder zukünftigen Anlagen noch mind. weitere 4 Jahre ausreicht.

Vorrangig wurden Säulenversuche zur Prüfung des Schwermetallrückhaltes durchgeführt. Durch Variation von Säulendurchmesser (13,4/22/32 mm), Flussrate (5-60 ml/min), Filtermaterial (technische Materialien, Sand, Boden), Filterschichthöhe (20/30 cm), Zulaufparameter (Pb, Cr, Cu, Ni, Zn/Pb, Cu, Zn), Zulaufkonzentrationen (50-400 µg/l) und Beschickungsart (von unten/oben) konnte eine geeignete Methode ermittelt werden. Des Weiteren wurden Batchtests (je 5 g Material und 50 ml Schwermetalllösung unterschiedlicher Konzentrationen) durchgeführt, um die Ergebnisse mit jenen von Säulenversuchen zu vergleichen. Zuletzt wurden Säulenversuche zur Prüfung des Mineralölrückhaltes mittels Toluol arrangiert.

Die Versuchsdurchführung mit Säulendurchmesser 32 mm, Beschickung von unten, Durchflussrate entsprechend dem kf-Wert des Materials und Filterschichthöhe 20 cm schnitt dabei am besten ab. Als Zulauflösung empfiehlt sich ein Gemisch aus Pb, Cr, Cu, Ni, Zn mit realitätsnahen Konzentrationen.

Batchtests können als Vorabschätzung bezüglich Einsatzfähigkeit des Materials dienen, für die Prüfung werden aber Säulenversuche aufgrund der Nähe zur Realität bevorzugt. Für die Toluolversuche konnte aufgrund von Ausführungsschwierigkeiten keine Prüfmethode entwickelt werden.

Abstract

Stormwater runoff from highly trafficked areas contains several contaminants in a concentration which is higher than given critical values. Especially heavy metals and hydrocarbons are main contaminants.

To protect groundwater in Austria there are filtration treatment systems with the function of cleaning stormwater runoff before percolation process. To ensure the function of these treatment plants the challenge is to develop a testing method. Requirements concerning testing criteria and experimental procedures were given by a project of the Austrian Standards Institute. The experiments should lead to a testing method in laboratory scale which ensures that the capacity of filter substrate from existing or future plants are able to be in use for minimum further more four years.

The main experiments were made to test the removal of heavy metals in column flow experiments. A testing method was created by varying the column diameter (13,4/22/32 mm), flow rate (5-60 m/min), filter substrate (technical, sand, soil), bed height (20/30 cm), influent parameters (Pb, Cr, Cu, Ni, Zn/Pb, Cu, Zn), concentration of influent (50-400 µg/l) and flow modus (upflow/downflow). Furthermore batch experiments (5 g of material and 50 ml solution of different concentrations) were performed for comparing results of both experiments. At least column experiments for testing removal of mineral oil by using toluene were operated.

Best results were generated by column diameter of 32 mm, upflow modus, flow rate respectively to the coefficient of permeability and a bed height of 20 cm. A solution of Pb, Cr, Cu, Ni, Zn would be appropriate by using realistic concentrations.

Batch experiments are useful to estimate the utilisation of filter substrate in general but for testing the capacity column experiments should be preferred. For mineral oil removal no testing method was found due to problems in execution.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort I
Kurzfassung III
Abstract IV
Inhaltsverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 11
Abkürzungsverzeichnis 13
1. Einleitung 15
2. Zielsetzung und Aufgabenstellung 16
3. Allgemeine Grundlagen 18
3.1 Allgemeines 18
3.1.1 Straßenabwasserreinigung in Österreich 18
3.2 Spurenstoffe im Straßenabwasser 19
3.2.1 Herkunft 19
3.2.2 Spurenstoffe und deren Eigenschaften 20
3.2.3 Entfernung von Spurenstoffen im Straßenabwasser 21
3.3 Eingrenzung der Prüfparameter 22
3.4 Chemische und physikalische Eigenschaften bei der Entfernung von Schwermetallen 23
3.4.1 Einfluss pH-Wert 23
3.4.2 Komplexierungsverhalten 24
3.4.3 Sorptionsverhalten 24
3.5 Rechtsgrundlagen 27
3.5.1 Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser 28
3.5.2 Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer 29
3.6 Charakteristische Aufkommensdaten 30
3.6.1 Messungen des Institutes für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz 30
3.6.2 Aufkommensdaten aus der Literatur 32
3.7 Methoden zur Prüfung der Filterkapazität im Labor 34
3.7.1 Batchversuche 34
3.7.2 Säulenversuche 35
3.7.3 Säulen- und Batchversuche aus der Literatur 35
4. Material und Methoden 43
4.1 Standzeitprüfung 43
4.1.1 Standzeit für ÖNORM-Projekt 43
4.1.2 Standzeitbestimmung durch Ermittlung der Erschöpfung des Filtermaterials 44
4.2 Versuchsart 46
4.3 Säulenversuche 47
4.3.1 Materialien 47
4.3.2 Säulendurchmesser 50

4.3.3 Filterschichthöhe 50
4.3.4 Beschickungsart 50
4.3.5 Säulenaufbau 51
4.3.6 Säuleneinbau 52
4.3.7 Zulaufkonzentrationen 53
4.3.8 Durchflussraten 54
4.3.9 Beschickungsmenge 55
4.3.10 Versuchsvorbereitung 58
4.3.11 Versuchsverlauf und Probenahme 59
4.3.12 Versuchsreihen 60

4.4 Batchversuche 68
4.4.1 Materialien 68
4.4.2 Versuchsvorbereitung 68
4.4.3 Versuchsdurchführung 69

5. Ergebnisse und Interpretation 70

5.1 Ergebnisse 70
5.1.1 Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes 70
5.1.2 Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes 79
5.1.3 Batchversuche 79

5.2 Interpretation - Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes 80
5.2.1 Vergleich des Schwermetall-Rückhaltes durch verschiedene Filtersubstrate 80
5.2.2 Vergleich des Schwermetall-Rückhaltes bei verschiedenen Durchflussraten 82
5.2.3 Vergleich des Schwermetallrückhaltes bei verschiedenen Säulendurchmessern 87
5.2.4 Vergleich des Schwermetallrückhaltes durch verschiedene Beschickungsarten 94
5.2.5 Vergleich des Schwermetallrückhaltes anhand unterschiedlicher Flächenverhältnisse 97
5.2.6 Vergleich des Schwermetallrückhaltes anhand aller Versuchsreihen 100
5.2.7 Mögliche Einflüsse auf den Schwermetallrückhalt durch Unterbrechungen 107
5.2.8 Mögliche Einflüsse auf den Schwermetallrückhalt durch den pH-Wert 108
5.2.9 Vergleich mit Literaturdaten 109

5.3 Ergebnisse und Interpretation - Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes mit Toluol 111
5.3.1 Vergleich der Laborversuche 111
5.3.2 Vergleich mit Literaturdaten 112

5.4 Ergebnisse und Interpretation – Batchversuche 113
5.4.1 Darstellung der Adsorptionskurven 113
5.4.2 Anpassung an Adsorptionsisotherme 115
5.4.3 Vergleich Batchtests mit Säulenexperimenten 118

6. Schlussfolgerungen und Ausblick 122

6.1 Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes mittels Toluol 122

6.2 Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes 122

6.3 Batchversuche 125

6.4 Erfüllung der Ziele 126

6.5 Ausblick 126

7. Literaturverzeichnis 127

7.1 Internetverzeichnis 129

8. Anhang 130

8.1 Repräsentative mittlere Konzentrationen (Göbel et al., S.35) 130

8.2 Repräsentative Konzentrationen (Helmreich et al., 2010, S. 993) 131

8.3 Probenahmeprotokoll der Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes 132

8.4 Auswertungstabelle der Ergebnisse der Batchversuche zur Ermittlung des Schwermetallrückhaltes 142

8.5 Auswertungstabelle der Ergebnisse der Säulenversuche zur Ermittlung des Schwermetallrückhaltes 143

Lebenslauf ***182***

Eidesstattliche Erklärung ***183***

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Löslichkeiten einzelner Schwermetalle bei unterschiedlichen pH-Werten (Langhans, 1998) 23

Abbildung 3-2: Komplexbildung abhängig vom pH-Wert von (a) Kupfer und (b) Zink (Ludwig, 2007) 24

Abbildung 3-3: Typischer Verlauf einer Freundich-Isotherme 26

Abbildung 3-4: Typischer Verlauf einer Langmuir-Isotherme 27

Abbildung 3-5: Freundlich Adsorptionsisotherme für Blei (Dwivedi et al., 2008) 36

Abbildung 3-6: Ergebnisse der Säulenversuche nach unterschiedlicher Ausgangskonzentration nach Dwivedi et al. (2008) 37

Abbildung 3-7: Ergebnisse der Säulenversuche nach unterschiedlicher Flussrate nach Dwivedi et al. (2008) 38

Abbildung 3-8: Vergleich der Sorptionsisotherme der Materialien „RWE“ und „CSC“ bei pH-Wert 3 bzw. 5 (Hilliges, 2007) 40

Abbildung 3-9: Durchbruchkurven der Materialien bei der Beschickung mit Zink-Modelllösung (Hilliges, 2007) 40

Abbildung 3-10: Ablaufkonzentrationen einer Säule, die mit nächtlichen Unterbrechungen diskontinuierlich mit Modelllösung beschickt wurde (Hilliges, 2007) 41

Abbildung 4-1: Prüfsäulen mit d = 13,4/22 mm (eigene Abbildung) 49

Abbildung 4-2: Prüfsäulen mit d = 32 mm (eigene Abbildung) 49

Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Säule 51

Abbildung 4-4: Vorlagebehälter zur Aufbereitung des Beschickungswassers und Zuleitung zu den Versuchssäulen, Fassungsvermögen 100 l (eigene Abbildung) 52

Abbildung 4-5: Drehzahlgeregelte Schlauchquetschpumpe (eigene Abbildung) 53

Abbildung 4-6: Head-Space Flaschen für Toluolversuche (eigene Abbildung) 67

Abbildung 5-1: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Pb), Versuch 5 80

Abbildung 5-2: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Cu), Versuch 5 81

Abbildung 5-3: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Zn), Versuch 5 81

Abbildung 5-4: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 1) 82

Abbildung 5-5: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 3) 83

Abbildung 5-6: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 4) 84

Abbildung 5-7: Ablaufkonzentrationen für TFIc, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3) 84

Abbildung 5-8: Ablaufkonzentrationen für Sand, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3) 85

Abbildung 5-9: Ablaufkonzentrationen für TFIIb, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3) 85

Abbildung 5-10: Vergleich der Flussraten nach Jahresniederschlagsfrachten und Konzentration, d = 32 mm (Vers. 5) 86

Abbildung 5-11: Adsorbierte Schwermetallfracht für TFIIb (Vers. 4) mit d = 13,4 mm 88

Abbildung 5-12: Adsorbierte Schwermetallfracht für TFIIb (Vers. 5) mit d = 32 mm 89
Abbildung 5-13: Adsorbierte Schwermetallfracht für S (Vers. 4) mit d = 13,4 mm 90
Abbildung 5-14: Adsorbierte Schwermetallfracht für S (Vers. 5) mit d = 32 mm 91
Abbildung 5-15: Adsorbierte Schwermetallfracht für BA (Vers. 4) mit d = 22 mm 92
Abbildung 5-16: Adsorbierte Schwermetallfracht für BA (Vers. 5) mit d = 32 mm 93
Abbildung 5-17: Versuchsreihe 6 – Beschickung von oben 95
Abbildung 5-18: Versuchsreihe 7 – Beschickung von unten 95
Abbildung 5-19: Vergleich der Flächenverhältnisse S – Versuchsreihe 4 97
Abbildung 5-20: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIb – Versuchsreihe 7 98
Abbildung 5-21: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIIb – Versuchsreihe 5 98
Abbildung 5-22: Vergleich der Flächenverhältnisse BA – Versuchsreihe 5 99
Abbildung 5-23: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIc– Versuchsreihe 5 99
Abbildung 5-24: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Pb) – Vers. 3 101
Abbildung 5-25: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Cr) – Vers. 3 101
Abbildung 5-26: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Cu) – Vers. 3 102
Abbildung 5-27: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Ni) – Vers. 3 102
Abbildung 5-28: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Zn) – Vers. 3 103
Abbildung 5-29: Durchbruchkurven für Sand – Vers. 5 104
Abbildung 5-30: Durchbruchkurven für TFIc – Vers. 5 104
Abbildung 5-31: Durchbruchkurven für TFIIb – Vers. 5 105
Abbildung 5-32: Durchbruchkurven für BA – Vers. 5 105
Abbildung 5-33: Durchbruchkurven für TFIb – Vers. 7 106
Abbildung 5-34: Darstellung des Einflusses von Unterbrechungen anhand Versuchsreihe 6 (TFIb) 107
Abbildung 5-35: Adsorptionskurve für TFIc – Pb 113
Abbildung 5-36: Adsorptionskurve für TFIIb - Pb 113
Abbildung 5-37: Adsorptionskurve für TFIc – Zn 114
Abbildung 5-38: Adsorptionskurve für TFIIb – Zn 114
Abbildung 5-39: Adsorptionskurven für Blei und Kupfer (TFIc) 115
Abbildung 5-40: Adsorptionsisotherme für Pb, TFIc 115
Abbildung 5-41: Adsorptionsisotherme für Pb, TFIIb 116
Abbildung 5-42: Adsorptionsisotherme für Zn, TFIc 116
Abbildung 5-43: Adsorptionsisotherme für Zn, TFIIb 117
Abbildung 5-44: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Pb) 118
Abbildung 5-45: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Cu) 118
Abbildung 5-46: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Zn) 119
Abbildung 5-47: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Pb) 119
Abbildung 5-48: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Cu) 120

Abbildung 5-49: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Zn) 120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Einzelne Schwermetalle und deren Geringfügigkeitsschwellenwerte (Altmayer et al., 2004) 20

Tabelle 3-2: Schwellenwerte für ausgewählte Spurenstoffe (QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010) 28

Tabelle 3-3: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – zulässige Zusatzkonzentrationen ausgewählter Parameter (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010) 29

Tabelle 3-4: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – Hintergrundkonzentrationen ausgewählter Parameter (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010) 30

Tabelle 3-5: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – Summe aus zulässiger Zusatzkonzentration und Hintergrundkonzentration (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010) 30

Tabelle 3-6: Zu- und Ablaufwerte der GSA-H und GSA-W aus Einzelmessungen 2012 31

Tabelle 3-7: Zu- und Ablaufwerte der GSA-H aus einer Messreihe 2005-2007 (Maesho Haile, 2008) 31

Tabelle 3-8: Zu- und Ablaufwerte der GSA-A2 aus einer Einzelmessung 2012 (Lins, 2013) 32

Tabelle 3-9: Repräsentative mittlere Konzentrationen aus Göbel et al. (2006) 33

Tabelle 3-10: Aufkommenswerte aus Helmreich et al. (2010) 33

Tabelle 3-11: Vergleich der ermittelten Sorptionskapazitäten für beide Materialien; Ausgangskonzentrationen: 20 mmol/l für Isothermen, 10 mg/l für Säulenversuche (Hilliges, 2007) 41

Tabelle 4-1: Definierte Rückhaltewirkungsgrade für Kupfer und Zink (Schmitt et al., 2010) 45

Tabelle 4-2: Durchbruchswerte für Blei, Chrom und Nickel 46

Tabelle 4-3: Definierte Rückhaltewirkungsgrade für Kupfer und Zink für Prüfmethode 46

Tabelle 4-4: Eingesetzte Materialien und deren physikalisch-chemische Eigenschaften 48

Tabelle 4-5: Konzentrationen der Schwermetalllösung 54

Tabelle 4-6: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 13,4 mm) 54

Tabelle 4-7: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 22 mm) 55

Tabelle 4-8: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 32 mm) 55

Tabelle 4-9: Niederschlagsmengen pro Säule und Jahr nach Flächenverhältnis und Säulendurchmesser 56

Tabelle 4-10: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L1 57

Tabelle 4-11: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L2 57

Tabelle 4-12: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L3 58

Tabelle 4-13: Eigenschaften Versuchsreihe 1+2 (1) 61

Tabelle 4-14: Eigenschaften Versuchsreihe 1+2 (2) 61

Tabelle 4-15: Eigenschaften Versuchsreihe 3 (1) 62

Tabelle 4-16: Eigenschaften Versuchsreihe 3 (2) 62

Tabelle 4-17: Eigenschaften Versuchsreihe 4 (1) 62
Tabelle 4-18: Eigenschaften Versuchsreihe 4 (2) 63
Tabelle 4-19: Eigenschaften Versuchsreihe 5 (1) 64
Tabelle 4-20: Eigenschaften Versuchsreihe 5 (2) 64
Tabelle 4-21: Eigenschaften Versuchsreihe 6 (1) 65
Tabelle 4-22: Eigenschaften Versuchsreihe 6 (2) 65
Tabelle 4-23: Eigenschaften Versuchsreihe 7 (1) 65
Tabelle 4-24: Eigenschaften Versuchsreihe 7 (2) 66
Tabelle 4-25: Eigenschaften Toluolversuche 67
Tabelle 4-26: Eingesetzte Lösungen für die Batchversuche 69
Tabelle 5-1: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 1+2 73
Tabelle 5-2: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 1+2 73
Tabelle 5-3: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 1+2 73
Tabelle 5-4: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 3 74
Tabelle 5-5: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 3 74
Tabelle 5-6: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 3 74
Tabelle 5-7: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 4 75
Tabelle 5-8: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 4 75
Tabelle 5-9: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 4 76
Tabelle 5-10: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 5 76
Tabelle 5-11: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 5 77
Tabelle 5-12: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 5 77
Tabelle 5-13: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 6 77
Tabelle 5-14: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 6 78
Tabelle 5-15: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 6 78
Tabelle 5-16: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 7 78
Tabelle 5-17: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 7 78
Tabelle 5-18: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 7 79
Tabelle 5-19: Ergebnisse Toluolversuche Versuch 6-8 111
Tabelle 5-20: Ergebnisse Toluolversuche 9 und 10 111

Abkürzungsverzeichnis

AFS …	Abfiltrierbare Stoffe
A_v…	Flächenverhältnis
BA …	Bodenmaterial der Gewässerschutzanlage GSA-A2
Cd …	chemisches Elementsymbol für Cadmium
C_e …	Ablaufkonzentration, Gleichgewichtkonzentration
C_i …	Eingangskonzentration
C_{i_m} …	gemessene Zulaufkonzentration
C_{QZV} …	Schwellenwert QZV Chemie GW
Cr …	chemisches Elementsymbol für Chrom
C_S…	adsorbierte Schwermetallfracht
Cu …	chemisches Elementsymbol für Kupfer
d …	Durchmesser
DIN …	Deutsches Institut für Normung
GFS …	Geringfügigkeitsschwellenwert
GW …	Grundwasser
HNO_3 …	chemische Formel für Salpetersäure
JD-UQN …	Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm
JDTV …	Jährlicher durchschnittlicher täglicher Verkehr
JN …	Jahresniederschläge
k_f …	Durchlässigkeitsbeiwert
K_F …	Freundlich-Konstante
KFZ …	Kraftfahrzeug
K_L …	Langmuir-Sorptionskoeffizient
m …	Masse
MKW …	Mineralölkohlenwasserstoffe
n …	Freundlich-Exponent

NaOH …	chemische Formel für Natronlauge
Ni …	chemisches Elementsymbol für Nickel
NS …	Normschliff
ÖNORM …	nationale Norm, Herausgeber: Austrian Standards Institute
PAK …	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb …	chemisches Elementsymbol für Blei
PEHD …	Polyethylen, hohe Dichte
q …	Beladung
Q …	Durchflussrate
q_{ges} …	Gesamt-Beladung
Q_J …	Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr
Q_{kf} …	Faktor für das Vielfache von Q entsprechend dem k_f-Wert
QZV …	Qualitätszielverordnung
RO-Wasser…	Reinstwasser, hergestellt mittels Reversosmose Verfahren
S …	Quarzsand
SM …	Schwermetalle
SM-Fracht$_{ges}$ …	Schwermetallfracht gesamt
SM_{Jges} …	Schwermetall-Jahresfrachten
SMJF …	Schwermetallfracht pro Jahr
TF…	Technisches Filtermaterial
TS …	Trockensubstanz
U …	Ungleichförmigkeitszahl
V …	Volumen
V_{ges} …	gesamtes durchgesetztes Volumen
Zn …	chemisches Elementsymbol für Zink

1. Einleitung

Durch das urbane Wachstum nimmt der versiegelte Flächenanteil immer mehr zu. Das wirkt sich darauf aus, dass Niederschlagswasser weniger auf natürlichen Flächen versickert oder durch Oberflächenwasser abgeführt wird, sondern vermehrt auf versiegelten Flächen, wie zum Beispiel Verkehrsflächen und Dachflächen, abfließt. Dabei kommt es zur Aufnahme von Spurenstoffen im Niederschlagswasser, die sich dort anreichern können und zu durchaus toxikologisch relevanten Konzentrationen führen können. Diese Substanzen werden international in der EU-Wasserrahmenrichtlinie und national in den Qualitätszielverordnungen Chemie Grundwasser sowie Chemie Oberflächenwasser geregelt.

Um das Grund- und Oberflächenwasser in qualitativer Hinsicht zu schützen, gibt es in Österreich sogenannte Gewässerschutzanlagen, die das Abwasser vor der Einleitung oder Versickerung entsprechend der rechtlichen Grundlagen reinigen. Dies kann zum Beispiel durch bewachsene Bodenfilter erfolgen. Nicht überall ist der notwendige Platz für solche Bodenfilter vorhanden oder der Boden ist für die entsprechende Reinigung nicht geeignet. Daher wird versucht, zukünftig Anlagen zu entwickeln, welche auch mit technischen Filtermaterialien arbeiten.

Um bestehende oder zukünftige Anlagen auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüfen zu können, ist es notwendig, eine geeignete Prüfmethode dafür zu entwickeln. Im Zuge eines ÖNORM Projektes wird nun versucht, Methoden zu finden, um Filtersubstrate, welche in Anlagen eingesetzt sind bzw. werden, auf ihre restliche bzw. mögliche Kapazität zu prüfen. Die Durchführung dieser Prüfmethode sollte im Labor erfolgen, da regelmäßige Überwachungen oder Eigenkontrollen an jeder einzelnen Anlage nicht verwirklichbar sind.

Das Hauptaugenmerk wird bei dieser Arbeit bzw. bei diesem Projekt auf stark befahrene Straßen (Hauptstraßen, Schnellstraßen; JDTV < 5000) gelegt.

Im Laufe dieser Arbeit sollen nun Versuche durchgeführt werden, um der Entwicklung solch einer Methode näher zu kommen und die Ergebnisse untereinander, sowie mit Literaturdaten, zu vergleichen.

Im Zuge der Entwicklung der Prüfmethode, die Eingang in eine ÖNORM finden soll, wurden regelmäßige Treffen einer Expertengruppe (Ad-hoc-Gruppe der ÖNORM) veranstaltet, in denen die Ergebnisse der Untersuchungen vorläufig dargestellt wurden und weitere Schritte bzw. Anpassungen in der Versuchsdurchführung besprochen wurden.

Diese Masterarbeit wurde im November 2012 an der Universität für Bodenkultur angemeldet. Die Durchführung der Versuche erfolgte zwischen Jänner und August 2013. Die Zusammenstellung der Ergebnisse sowie die Interpretation fanden im Zeitraum zwischen Februar und November 2013 statt. Die gesamte Arbeit konnte im Jänner 2014 fertig gestellt werden.

2. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine geeignete Methode zu entwickeln, um bestehende sowie zukünftige Anlagen zur Reinigung von Straßenabwässern auf ihre Kapazität zu prüfen.

Um dieses Ziel zu erreichen, gilt es folgende Aufgaben zu erfüllen: Erhebung von Literaturdaten bezüglich Prüfmethoden, Durchführung von Versuchen zur Verifizierung der Ergebnisse aus der Literatur, sowie zur Anpassung an eine geeignete Prüfmethode, Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander sowie Vergleich mit Literaturdaten.

Das Ziel, eine Prüfmethode zu entwickeln, wird durch folgende Einschränkungen bzw. Anforderungen, festgelegt durch das ÖNORM-Projekt, spezifiziert:

- **Einfache und reproduzierbare Versuchsdurchführung**: Um die Durchführung der Prüfung an verschiedensten Anlagen zu gewährleisten, sollte diese sowohl möglichst einfach, als auch reproduzierbar sein.
- **Kostensparend**: Damit die Prüfung auch finanziell durchführbar ist, sollte möglichst an Material-, sowie Durchführungs- und sonstigen Kosten gespart werden. Das heißt, der Verbrauch an Filtersubstrat sowie Chemikalien sollte gering gehalten werden, die Versuchsbedingungen sollten möglichst einfach und der Versuchsaufbau möglichst Material sparend erfolgen.
- **Geringer Zeitaufwand**: Da die Entwicklung der Prüfmethode möglichst rasch (Personalkosten sparend, dringende Fertigstellung des Projektes) erfolgen sollte, wird darauf geachtet, die Prüfmethode so zu gestalten, dass diese in möglichst kurzer Zeit durchgeführt werden kann.
- **Vorgegebene Mindest-Filterkapazität**: Um eine Prüfung so zu gestalten, dass diese im zeitlich und finanziell durchführbaren Rahmen bleibt, ist es notwendig, ein zu erreichendes Ziel der Prüfung festzulegen. Hierbei sollte das Filtermaterial der Anlage eine gewisse Mindest-Filterkapazität aufweisen, welche durch die Ad-hoc-Gruppe der ÖNORM festgelegt wird.
- **Einhaltung der Reinigungsleistung**: Um die Prüfparameter festlegen zu können, muss an rechtliche Grundlagen angeknüpft werden. Die Vorgabe bei dieser Arbeit ist die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser. Sind für gewisse Parameter keine Grenzwerte, Schwellenwerte oder ähnliches vorhanden, soll ein vorher definierter Rückhaltewirkungsgrad festgelegt werden.

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche betrieben. Danach folgte die Durchführung mehrerer Versuchsreihen. Im Anschluss daran wurden die Ergebnisse ausgewertet, graphisch dargestellt und interpretiert. Im Folgenden wird nun der Aufbau der Arbeit näher beschrieben.

In „Allgemeine Grundlagen“ werden die im Straßenabwasser vorhandenen Spurenstoffe behandelt (Substanzen, Herkunft, toxikologische Wirkung), Aufkommenswerte dargestellt, Wirkmechanismen beschrieben, sowie die rechtlichen Vorgaben dazu näher erläutert. Nebenbei werden einige Verfahren zur Kapazitätsprüfung vorgestellt.

In „Material und Methoden“ wird der Schwerpunkt auf die Versuchsart, die Versuchsbedingungen, die Durchführung und den Aufbau, auf die jeweiligen Eigenschaften, sowie auf Probleme jeder Versuchsreihe eingegangen. Außerdem wird erörtert, wie die Standzeit bzw. die Kapazität für das jeweilige Filtermaterial zahlenmäßig festgelegt wird, bzw. welche Kriterien zum Austausch des Filtermaterials einer Anlage führen.

Anschließend werden in „Ergebnisse und Interpretation“ alle Ergebnisse tabellarisch aufgelistet, sowie einzelne Ergebnisse graphisch dargestellt. Diese werden untereinander verglichen und anschließend wird auf Literaturdaten und deren Zusammenhang mit den Versuchen eingegangen.

Erklärende und zusammenfassende Worte finden sich in „Schlussfolgerungen und Ausblick“.
Das komplette Excel-File, mit dem die Versuche protokolliert wurden, findet sich im „Anhang“.

3. Allgemeine Grundlagen

3.1 Allgemeines

Bei einer Fläche von ca. 84 000 km² entfallen in Österreich in etwa 4400 km² auf Bau- und Verkehrsflächen, wiederum 40% davon (also ca. 1760 km²) sind versiegelt. Der Verbrauch an Siedlungs- und Verkehrsfläche wird auf ca. 15 ha pro Tag geschätzt (Periode 2002-2007). Aufgerechnet kommen in etwa 524 m² an Bau- und Verkehrsfläche auf jeden Österreicher. Im Vergleich dazu waren es im Jahr 1950 nur 200 m² (Umweltanwaltschaft, 2009).
Diese Zunahme führt zu einem Anstieg an Abfluss von versiegelten Flächen, wie zum Beispiel Verkehrsflächen oder Dachflächen.

Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf stark befahrene Straßen (Hauptstraßen, Schnellstraßen; JDTV < 5000) gerichtet ist, wird auch die Prüfmethode auf die dort anfallenden Spurenstoffe und deren Aufkommenswerte ausgelegt (Punkt 3.2 und 3.6).
Durch die stetige Zunahme des motorisierten Verkehrs auf Österreichs Straßen ist auch trotz Fortschritten der Technologie im KFZ-Bereich mit erhöhten Emissionswerten zu rechnen.

Zu den Schadstoffquellen im Straßenabwasser zählen hauptsächlich Korrosionsprodukte von metallischen Werkstoffen der Fahrzeuge, Reifenabrieb, organische Produkte aus dem Verbrennungsprozess im Motor, Treibstoffzusätze, Schmiermittel und Öle. Vor allem Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Zink und organische Substanzen wie PAK (polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) und MKW (Mineralölkohlenwassersstoffe) sind als Hauptschadstoffgruppen zu nennen. Bei Regenereignissen können diese Stoffe gelöst und mobilisiert werden und mit dem anfallenden Straßenabwasser abgeführt werden (Langbein et al., 2006).

3.1.1 Straßenabwasserreinigung in Österreich

Grundsätzlich steht in der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung 1996: *„Niederschlagswasser (…) von stark frequentierten Verkehrsflächen (…) soll, sofern die Einleitung in ein Fließgewässer eine Veränderung der Wasserbeschaffenheit erwarten lässt, die das geringfügige Ausmaß übersteigt, mit Maßnahmen nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung der Forderung der Erhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit des betroffenen Fließgewässers gereinigt und eingeleitet werden“* (AAEV BGBl. II Nr. 186/1996).

Im städtischen Bereich erfolgt die Ableitung von Straßenabwasser über die öffentliche Kanalisation (Misch- oder Trennsystem). Kläranlagen sind auf den Abbau von Kohlenstoff und Stickstoff ausgelegt, nicht jedoch auf Spurenstoffe von Verkehrsflächen, wie PAK, Schwermetalle usw. Außerdem werden diese bei einer Überlastung des Kanalnetzes mittels Regenüberlaufbecken ungeklärt ins Gewässer eingeleitet. Gerade im Bereich von stark befahrenen Straßen, wie Autobahnen, wird jedoch oft nur über das Bankett entwässert und somit der straßennahe Boden stark belastet.
In Deutschland existieren zum Beispiel im Falle der Trennkanalisation Regenklärbecken, die zur Behandlung von Niederschlagswasser gedacht sind. Die Rückhalteleistungen liegen jedoch nur im Bereich von 20 bis 65%. Außerdem wird geschätzt, dass durch diese Methode mehr Schwermetalle ins Gewässer eingeleitet werden als bei einer Mischkanalisation (Hilliges, 2007).

Durch umfangreiche Studien zum Aufkommen der Spurenstoffe im Straßenabwasser und deren Konzentrationen wird klar, dass die Einleitung oder Versickerung ohne Behandlung zu ökologischen Problemen führen kann. Die Behandlungsmöglichkeiten sind je nach

Spurenstoffen unterschiedlich und können von zentralen, dezentralen, naturnahen bis hin zu technischen Systemen reichen (Langbein et al., 2006).

In Österreich legen die Qualitätszielverordnungen Chemie Grundwasser und Oberflächenwasser zum Schutz von Grund- und Oberflächengewässern sogenannte Schwellenwerte und Umweltqualitätsnormen fest, um den guten Zustand der Gewässer zu erreichen bzw. zu erhalten (QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010 und QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010). Näheres dazu unter Punkt 3.5.

Derzeit existieren in Österreich sogenannte Gewässerschutzanlagen, die das Abwasser vor der Einleitung oder Versickerung behandeln. Die Gewässerschutzanlagen bestehen meist aus einer mechanischen Vorreinigungsstufe (z.B. Absetzanlage), in der der Großteil der Partikel entfernt werden sollte, und einer anschließenden Filteranlage (z.B. Adsorptionsanlage) (ÖNORM B2506-2, 2012). Die Reinigung kann zum Beispiel durch bewachsene Bodenfilter erfolgen. Nicht überall ist der notwendige Platz für solche Bodenfilter vorhanden oder der Boden ist für die entsprechende Reinigung nicht geeignet. Daher wird versucht, zukünftig Anlagen zu entwickeln, welche auch mit technischen Filtermaterialien arbeiten.

Des Weiteren ist beim Einsatz von Boden als Filtermaterial zu beachten, dass z.B. pH-Wert oder Bindungsmechanismen des Bodens nicht genau bekannt sind, da jeder Boden unterschiedlich wirkt, je nach Zusammensetzung und Art des Bodens. Außerdem ist bekannt, dass neben dem größeren Platzbedarf die Kapazität von Boden wesentlich geringer ist als jene von technischen Materialien. Was auch zu beachten ist: Boden kann nach der Anreicherung von Spurenstoffen nicht regeneriert werden und fällt als Sondermüll an (Hilliges, 2007).

3.2 Spurenstoffe im Straßenabwasser

3.2.1 Herkunft

Die Belastung des Niederschlagwassers mit Spurenstoffen hängt stark von der Nutzung der Herkunftsfläche ab. Abflüsse von Verkehrsflächen (dazu zählen z.B. Straßen, Wege, Parkplätze usw.) sind dabei höher belastet als Dachabflüsse (ausgenommen Zink- und Kupferdächer). Es wird bei Dachabflüssen auch von einer Primärbelastung (Belastung von Staubemissionen) und einer Sekundärbelastung (durch das Dachmaterial) gesprochen (Schmitt et al., 2010).

In dieser Arbeit stehen Straßenabwässer von Verkehrsflächen im Mittelpunkt. Als **Verkehrsflächen** werden *„Flächen bis zu einer Belastung von 5000 JDTV“* bezeichnet (ÖNORM B2506-2). Dabei ist es wichtig zu wissen, dass die Höhe der Konzentrationen der einzelnen Spurenstoffe von vielzähligen Einflussfaktoren geprägt wird, wie zum Beispiel *„durch Straßenzustand, Witterung, Regenintensität, Dauer der Trockenperiode vor dem Regenereignis, Verkehrsaufkommen und Schwerverkehr, Fahrverhalten, Fahrgeschwindigkeit, seitliche Barrieren (Standspuren, Wände), Verwehungen, Entwässerungssystem, sowie Straßenlängs- und –quergefälle“* (Hürlimann, 2011).

Zu den **wichtigsten Emissionsquellen** im Straßenverkehr zählen Abgas, Abrieb, Tropfverluste und Korrosion.
Über Abgase werden vor allem PAK aber auch monozyklische Aromate (z.B. Benzol, Toluol usw.), Chrom, Zink, Kupfer, Nickel und Cadmium freigesetzt.
Beim Reifenabrieb und beim Abrieb von Bremsbelägen ist vor allem mit Zink, Cadmium, Blei, Kupfer, Chrom und Nickel zu rechnen. Beim Straßenabrieb finden sich gleiche Spurenstoffe, sowie PAK.
MKW stammen hauptsächlich aus dem Kraftstoff und der Kühlflüssigkeit.
Korrosionen von Autoteilen emittieren Cadmium, Zink und Kupfer (BÖL, 2004).

3.2.2 Spurenstoffe und deren Eigenschaften

In diesem Unterkapitel werden die Hauptvertreter der Spurenstoffe im Straßenabwasser beschrieben.

Abfiltrierbare Stoffe (AFS)

Dazu zählen alle Feststoffe, die auf einem Membranfilter mit Porengröße 0,45 µm zurückgehalten werden.
AFS haben keine direkten Wirkungen auf Organismen in Gewässern oder Böden, sie sind jedoch Trägersubstanz für andere Spurenstoffe. Besonders bis zu einer Kornfraktion von 200 µm lagern sich viele Spurenstoffe (vor allem PAK und Schwermetalle) an (Schmitt et al., 2010).

Schwermetalle

Unter den Begriff Schwermetalle fallen alle Metalle mit einer Dichte von > 5 g/cm³ (Wikipedia, 2013). Einige Schwermetalle, die von Verkehrsflächen stammen, können unter bestimmten Bedingungen durchaus als problematisch angesehen werden. Sie können sowohl ökotoxische, als auch humantoxische Wirkungen zeigen. Ihre Toxizität ist vor allem von der Verfügbarkeit abhängig, für welche sowohl die Bindungsform, als auch der pH-Wert ausschlaggebend sind. Eine weitere Eigenschaft ist die hohe Persistenz von Schwermetallen (Schmitt et al., 2010).
Altmayer et al. (2004) definiert sogenannte Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS). Diese repräsentieren eine *„Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten (…)“* (Altmayer et al., 2004). In Tabelle 3-1 finden sich die wichtigsten, im Straßenabwasser vorkommenden Schwermetalle mit deren GFS wieder.

Tabelle 3-1: Einzelne Schwermetalle und deren Geringfügigkeitsschwellenwerte (Altmayer et al., 2004)

Schwermetall	GFS (µg/l)
Blei (Pb)	7
Cadmium (Cd)	0,5
Chrom (Cr)	7
Kupfer (Cu)	14
Nickel (Ni)	14
Zink (Zn)	58

Aber auch für den Menschen können gewisse Konzentrationen zu Vergiftungserscheinungen führen. So kann Blei Blut, Nerven und Nieren angreifen, Cadmium belastet die Leber und Nieren. Kupfer kann vor allem bei Säuglingen Leberschäden verursachen (Schmitt et al., 2010). Chromverbindungen und Nickel können kanzerogen wirken (Lenntech, 2013).

Unter Punkt 3.6 werden Aufkommenswerte für die unterschiedlichen Schwermetalle aufgelistet.

Laut *Schmitt et al. (2010)* wird Zink in Zukunft wegen der erhöhten Mobilität und dem Gehalt von Zink in Leitplanken eine höhere Bedeutung zugesprochen, während Blei und Cadmium aufgrund von Reduktionsmaßnahmen (z.B. Benzin bleifrei) eher zurückgehen.

Polycyclische, aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

PAK ist ein Summenparameter, der eine Vielzahl von Einzelstoffen repräsentiert. In der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser werden für die Festlegung des Schwellenwertes für PAK gewisse Referenzstoffe herangezogen. Zu diesen zählen Benzo(a)pyren, Fluoranthen,

Benzo(b)-fluoranthen, Benzo(k)-fluoranthen, Benzo(ghi)-perylen und Indeno(1,2,3-cd)pyren) (QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010).

Wichtige Eigenschaften von PAK sind sowohl geringe Wasserlöslichkeit, leichte Flüchtigkeit und Lipophilie, als auch der bevorzugte Transport an Partikeln. Der partikuläre Transport im Straßenabwasser wird auf über 90% geschätzt. Die Ökotoxizität liegt im Bereich zwischen 200 und 10000 µg/l. Beim Menschen sind langfristige Wirkungen, die Erbmaterialveränderungen oder Krebs bewirken können, bekannt (Schmitt et al., 2010).

PAK sind hauptsächlich Nebenprodukte bei unvollständigen Verbrennungen. So liegt ihr Auftreten überwiegend im Winter (durch das Heizen). Aber auch im Fahrbahnabrieb, Reifenabrieb und in Treibstoffen finden sich PAK. Im Niederschlagsabfluss finden sich am ehesten Flouranthen, Phenanthren, Benzoperylen und Pyren (Schmitt et al., 2010).

Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

MKW sind vor allem in Diesel und Benzin enthalten und finden sich in Verkehrsflächenabflüssen aufgrund von Tropfverlusten aus Treibstoffen und Motoröl. Das Hauptproblem bei MKW stellen vor allem Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen dar. Außerdem kann durch das Verhindern des Gasaustausches zwischen Wasser und Luft ein Sauerstoffdefizit entstehen. MKW können sich auch an Atemorgane von Wasserorganismen anlegen und somit deren Sauerstoffzufuhr verhindern.

MKW werden hauptsächlich an der absetzbaren Partikelfraktion adsorbiert. *Schmitt et al. (2010)* nennt als repräsentativen Wert in Verkehrsflächenabflüssen 1 mg/l.

Chlorid

Durch die Salzstreuung im Winter ist der Chloridgehalt zu dieser Jahreszeit besonders hoch. Durch hohe Konzentrationen kann es zu einer Abänderung der Besiedlung in Fließgewässern kommen. Außerdem können erhöhte Konzentrationen in Behandlungsanlagen zur Remobilisierung von bereits sorbierten Stoffen, wie zum Beispiel Schwermetallen, führen. *Schmitt et al. (2010)* gibt einen Wert von 7000 mg/l als Spitzenbelastung im Winter vor.

3.2.3 Entfernung von Spurenstoffen im Straßenabwasser

Zu den häufigsten Methoden zur Entfernung von den unter Punkt 3.2.2 genannten Spurenstoffen zählen Filtration, Adsorption, Ionenaustausch, Fällung, sowie biologischer Abbau (BÖL, 2004).

AFS werden durch Filtration mit definierter Porengröße entfernt, sowie durch Sedimentation in Absetzbecken. Dadurch werden gleichzeitig der größte Teil der PAK und viele MKW entfernt, da diese hauptsächlich an Partikel gebunden im Abwasser vorkommen (siehe dazu auch Punkt 3.3).

Zu den wichtigsten Techniken zur Entfernung von Schwermetallen zählen chemische Fällung, Ionenaustausch, Adsorption, Filtration und Trennung durch Membranverfahren. Viele dieser Methoden sind allerdings sehr teuer oder ineffektiv. Adsorption dagegen ist eine hoch effektive, leicht durchführbare Methode, bei der die Kosten im Vergleich eher gering bleiben (Popuri et al., 2009).
Für die Mobilität und auch das chemische Verhalten von Schwermetallen in Wasser sind Adsorptionsvorgänge, Löse- und Fällungsprozesse, sowie Komplexierungsreaktionen

verantwortlich (Ludwig, 2007). Näheres zum Verhalten von Schwermetallen ist unter Punkt 3.4 zu finden.

3.3 Eingrenzung der Prüfparameter

Um sowohl die Prüfmethode möglichst einfach zu gestalten, als auch Kosten und Zeit zu sparen, bedarf es einer geeigneten Reduktion der Spurenstoffe auf relevante Prüfparameter. Im Folgenden wird nun auf die in Punkt 3.2.2 genannten Spurenstoffe eingegangen und ihre Relevanz bezüglich Aufkommen, Wirkung und Versuchspraxis überprüft.

- **AFS**: Durch die vorgeschalteten Absetzbecken von Gewässerschutzanlagen wird ein Großteil der absetzbaren Feststoffe bereits zurückgehalten. Außerdem erweist sich eine Prüfung zum AFS-Rückhalt im Labormaßstab als schwierig, da Säulen mit geringem Durchmesser (im Falle dieser Arbeit reichen die Durchmesser bis zu 32 mm) leichter zu Kolmationen durch das Prüfmaterial neigen (geprüft wurde z.B. in *BÖL (2004)* mit Quarzsand als Vergleichsmaterial zu AFS). Daher wird auf diesen Parameter in der Prüfmethode verzichtet.

- **Schwermetalle**: Da Schwermetalle durchaus in hohen Konzentrationen auftreten können (Punkt 3.6) und die Schwellenwerte der Qualitätszielverordnung im Verhältnis dazu niedrig liegen (Punkt 3.5.1), wird empfohlen, vereinzelte Schwermetalle als Prüfparameter heranzuziehen. Die hauptsächlich im Straßenabwasser gemessenen Schwermetalle beschränken sich auf Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink. Charakteristische Aufkommensdaten für Cadmium sind sehr gering und liegen unter dem Schwellenwert von 4,5 µg/l (QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010). In *Göbel et al. (2007)* liegt der, auf einer großen Datengrundlage basierende, Wert für Cadmium bei 1,9 µg/l (Hauptstraße/Schnellstraße), in *Helmreich et al. (2010)* bei unter 0,5 µg/l. Auch in der Gewässerschutzanlage H (Punkt 3.6.1) wurden Zu- und Ablaufkonzentrationen gemessen, die meist unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen und somit die Rückhalteeffizienz nicht messbar war. Daher wird auf Cadmium als Prüfparameter verzichtet. Die Prüfung erfolgt also mit realen Konzentrationen an Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink.

- **PAK**: Diese sind wegen ihrer mutagenen und kanzerogenen Wirkung äußerst relevant. Jedoch nicht unerwähnt bleiben sollte, dass durch neue Technologien bei Reifen die Konzentration im Straßenabwasser die Tendenz hat zu sinken. Außerdem werden sie, wie in Punkt 3.2.2 erwähnt, hauptsächlich partikelgebunden transportiert, d.h. der Großteil der PAK wird bereits im Absetzbecken zurückgehalten. Ein entscheidender Aspekt gegen PAK als Prüfparameter ist die Herstellung einer Lösung, die Arbeit mit solch gesundheitsschädlichen Stoffen und die damit aufwändige Entsorgung von kontaminiertem Abwasser. Außerdem wäre eine weitere Herausforderung eine Auswahl für die zu prüfenden Einzelstoffe zu treffen, da nicht genau bekannt ist, welcher Stoff und in welcher Menge dieser in Straßenabwässern genau vorkommt (Schmitt et al., 2010).

- **MKW**: *Schmitt et al.* (2010) nennt als repräsentativen Wert in Verkehrsflächenabflüssen 1 mg/l. Bei Untersuchungen an der Gewässerschutzanlage H wurden Zu- und Ablaufwerte über 18 Monate gemessen. Die Konzentrationen für MKW lagen dabei zwischen 0,1 und 4,4 mg/l, im Mittel 2 mg/l (Fürhacker et al., 2011). Da das Kriterium für MKW bei einem Wert von 0,3 mg/l liegt (Punkt 4.1.1), werden MKW als Prüfparameter berücksichtigt.

- **Chlorid**: Da Chlorid durch Adsorption nicht entfernbar ist, wird auf Chlorid als Prüfparameter verzichtet.

Die **Prüfparameter** für die Kapazitätsprüfung von Filtermaterial zur Reinigung von Straßenabwasser beschränken sich auf die **Schwermetalle Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink**, sowie auf **MKW**. Das Hauptaugenmerk richtet sich jedoch auf die Entfernung von Schwermetallen, die Prüfung auf MKW wird aufgrund geringer Aufkommenswerte eher nebensächlich behandelt. Die gesamte Arbeit ist auf dieser grundlegenden Einschränkung aufgebaut.

3.4 Chemische und physikalische Eigenschaften bei der Entfernung von Schwermetallen

Ein wichtiger Aspekt bei der Entfernung von Schwermetallen ist, ob diese gelöst oder partikulär vorliegen. Laut *Schmitt et al. (2010)* wird z.B. Blei zu über 90% an Feststoffen gebunden transportiert. Gesamt betrachtet wird an der Feinfraktion bis 200 µm ca. 75 – 80% der Schwermetallfracht transportiert (Schmitt et al., 2010).

3.4.1 Einfluss pH-Wert

Der typische pH-Wert-Bereich, in dem Verkehrsabflüsse vorliegen, liegt zwischen 7 und 8 (Hilliges, 2007).
Ob Schwermetalle gelöst oder als Feststoffe vorliegen, hängt vom pH-Wert ab. Abbildung 3-1 zeigt eine Darstellung der Löslichkeiten einzelner Schwermetalle bei unterschiedlichen pH-Werten (Langhans, 1998).

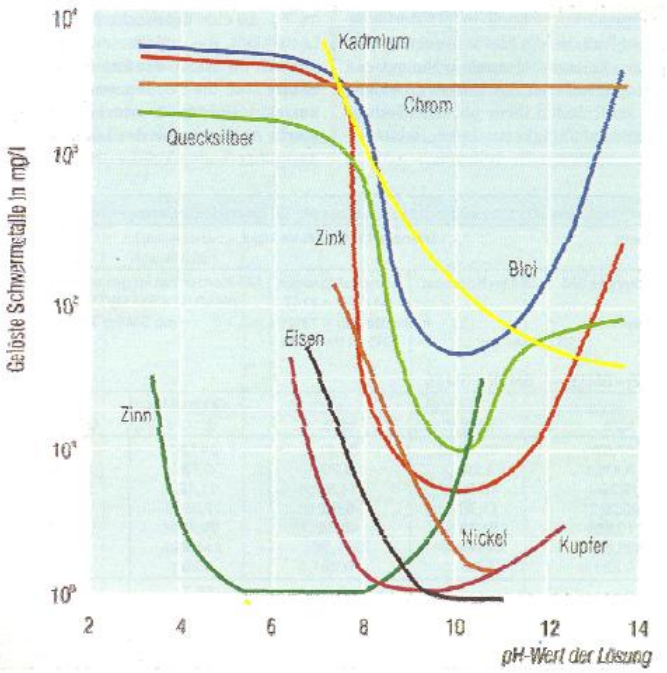


Abbildung 3-1: Löslichkeiten einzelner Schwermetalle bei unterschiedlichen pH-Werten (Langhans, 1998)

Wie in Abbildung 3-1 ersichtlich, liegen Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink bei einem pH-Wert unter 6 großteils gelöst vor. Um die Aufnahmekapazität für Schwermetalle von Filtermaterial möglichst genau zu erfassen, ist es nun von Vorteil, wenn der Großteil der Schwermetalle in gelöster Form vorliegt. Ansonsten erweist sich die Bilanzierung, welche Stoffe

durch Feststoffe angelagert transportiert und zurückgehalten werden und welche durch Absorptionsmechanismen aufgenommen werden, als äußerst schwierig. Bei der Versuchsdurchführung ist es daher unbedingt notwendig, die Zulauflösung auf einen gewissen pH-Wert einzustellen und diesen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren.

3.4.2 Komplexierungsverhalten

Schwermetalle haben eine gewisse Affinität dazu, Komplexe zu bilden. Sie können z.B. mit Hydroxid-, Cabonat-, Chlorid- und Sulfationen Komplexe bilden. In Abbildung 3-2 sind die möglichen Komplexe von Kupfer und Zink als Beispiel dargestellt, abhängig vom pH-Wert Ludwig, 2007).

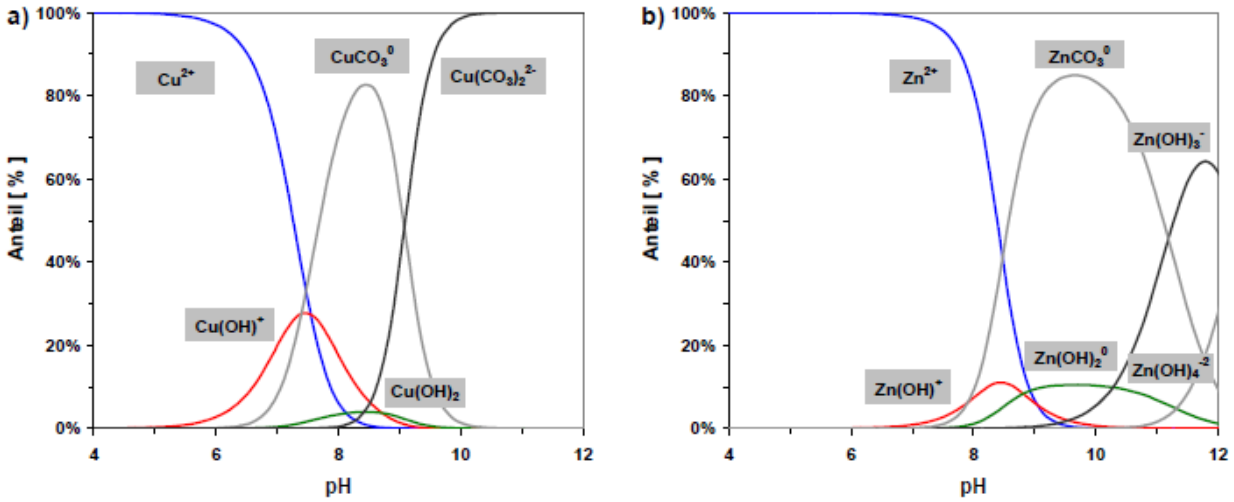


Abbildung 3-2: Komplexbildung abhängig vom pH-Wert von (a) Kupfer und (b) Zink (Ludwig, 2007)

Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass ein pH-Wert unter 6 optimal für die Versuchsdurchführungen wäre, damit eine mögliche Komplexbildung zu einem hohen Prozentsatz ausgeschlossen werden kann (siehe Abbildung 3-2).

Auch Fällungsreaktionen durch Bindung der Metallkationen mit z.B. Karbonaten oder Hydroxiden sind mögliche Prozesse.

3.4.3 Sorptionsverhalten

Eine weitere, wichtige Eigenschaft ist das Adsorptionsverhalten von Schwermetallen. Adsorption ist eine der vielversprechendsten Methoden zur Entfernung von Blei, sowie anderer Schwermetalle aufgrund der hohen Effizienz, der leichten Handhabung, der Verfügbarkeit von viele Adsorptionsmaterialien und die dadurch einhergehende Kostenersparnis (Dwivedi et al., 2008).

Beladung

Ein wichtiger Begriff, mit welchem sich das Sorptionsverhalten von Schwermetallen beschreiben lässt, ist die Beladung. Sie charakterisiert das Adsorptionsverhalten von gelösten

Stoffen, dem Adsorptiv, und quantifiziert die Adsorptionskapazität von Feststoffen, dem Adsorbens (Ludwig, 2005).
Die Beladung kann nach folgender Gleichung beschrieben werden (Formel 3-1).

$$q = \frac{(C_i - C_e) * V}{m} \quad (3\text{-}1)$$

q … Beladung (mg/g)

C_i … Eingangskonzentration der Lösung (mg/l)

C_e … Gleichgewichtskonzentration der Lösung (mg/l)

V … Volumen der Flüssigkeit (Adsorptiv) (l)

m … Masse des Feststoffes (Adsorbens) (g)

Der Austausch zwischen den gelösten Teilchen in der Flüssigkeit und denen, die sich an der Feststoffoberfläche anhaften, findet dabei so lange statt, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Bei Batchversuchen wird dieses Gleichgewicht zum Beispiel als statisches Gleichgewicht bezeichnet, weil es sich nicht weiter mit der Zeit ändert. In Säulenversuchen lässt sich aufgrund der ständigen Zufuhr neuer Lösung nie ein komplettes Gleichgewicht einstellen, es wird in diesem Fall von einem dynamischen Gleichgewicht gesprochen (Dwivedi et al., 2008).

Adsorptionsisothermen

Als Adsorptionsisotherme wird laut *Ludwig (2005)* die Abhängigkeit der Gleichgewichtsbeladung von der Gleichgewichtskonzentration bei konstanter Temperatur bezeichnet. Adsorptionsisothermen werden meist für empirische Modelle genutzt, mit denen Prognosen für die Verlagerung von Stoffen erstellt werden (Kluge, 2010). Um experimentell ermittelte Werte durch Adsorptionsisothermen darstellen zu können, finden sich in der Literatur verschiedenste Modelle. Die geläufigsten Modelle sind die von Langmuir und Freundlich (Dwivedi et al., 2008). Auf diese beiden Modelle wird im Folgenden näher eingegangen.

Die **Freundlich-Isotherme** berücksichtigt, dass die sorbierte Menge mit steigender Konzentration des Sorbats in der Gleichgewichtslösung unterproportional wächst. Grund dafür ist die zunehmende Sättigung der Oberfläche, welche zur Verringerung der weiteren Sorption führt. Die Isotherme basiert auf empirischem Zusammenhang. Dieser beschreibt eine exponentielle Abhängigkeit der Oberflächenbeladung von der Gleichgewichtskonzentration der Lösung (Kluge, 2010).

Die Freundlich-Gleichung wird normalerweise wie folgt dargestellt (Formel 3-2).

$$q = K_F * {C_e}^n \quad (3\text{-}2)$$

q … Beladung (mg/g)

K_F … Freundlich-Konstante (l/g)

C_e … Gleichgewichtkonzentration der Lösung (mg/l)

n … Freundlich-Exponent (-)

Zur Bestimmung der Parameter kann die folgende Form der Freundlich-Gleichung herangezogen werden (Formel 3-3).

$$\ln q = \ln K_F + n * \ln C_e \quad (3\text{-}3)$$

Beim Freundlich-Modell wird von mehrmolekularen Schichten ausgegangen (Sonnenberg, 2003).
In Abbildung 3-3 wird ein typischer Verlauf einer Freundlich-Isotherme dargestellt.

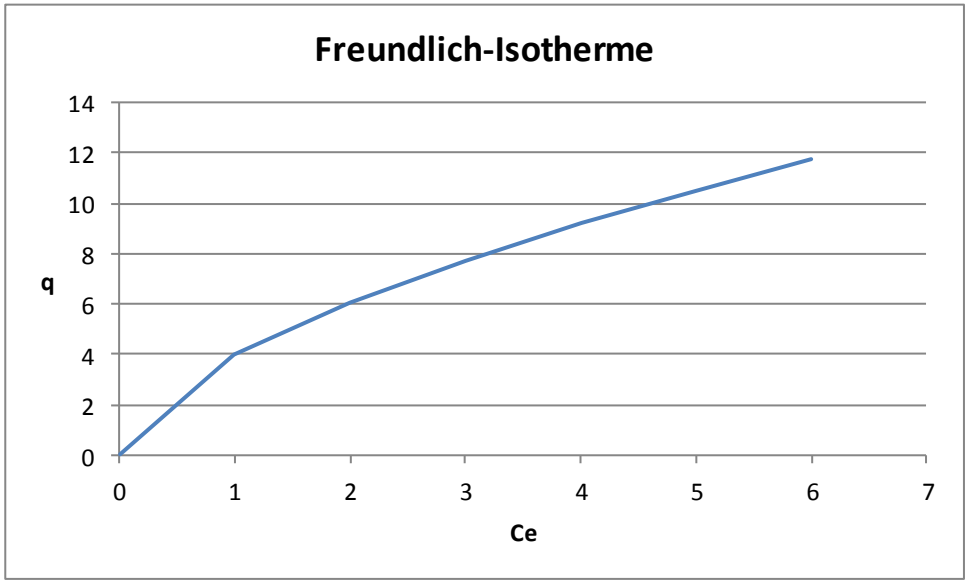


Abbildung 3-3: Typischer Verlauf einer Freundich-Isotherme

Dabei ist n = 0,6 und K_F = 4. Durch Kurve wurde durch die Darstellung in Excel nicht geglättet.

Ein zweites, oft angewandtes Modell ist das von **Langmuir**. Es beschreibt ein Sorptionsmodell, das folgende Punkte berücksichtigt: Die Adsorption findet einschichtig statt, alle Sorptionsplätze sind gleichwertig, die Oberfläche ist gleichmäßig und es bestehen keine Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Teilchen (Sonnenberg, 2003).

Die Langmuir-Isotherme lässt sich mit folgender Gleichung darstellen (Formel 3-4).

$$q = \left(\frac{K_L q_{max} C_e}{1 + K_L C_e}\right) \quad (3\text{-}4)$$

q … Beladung (mg/g)

C_e … Gleichgewichtkonzentration der Lösung (mg/l)

K_L … Langmuir-Sorptionskoeffizient (-)

q_{max} … maximale Beladung (mg/g)

Abbildung 3-4 zeigt wiederum einen typischen Verlauf einer Langmuir-Isotherme.

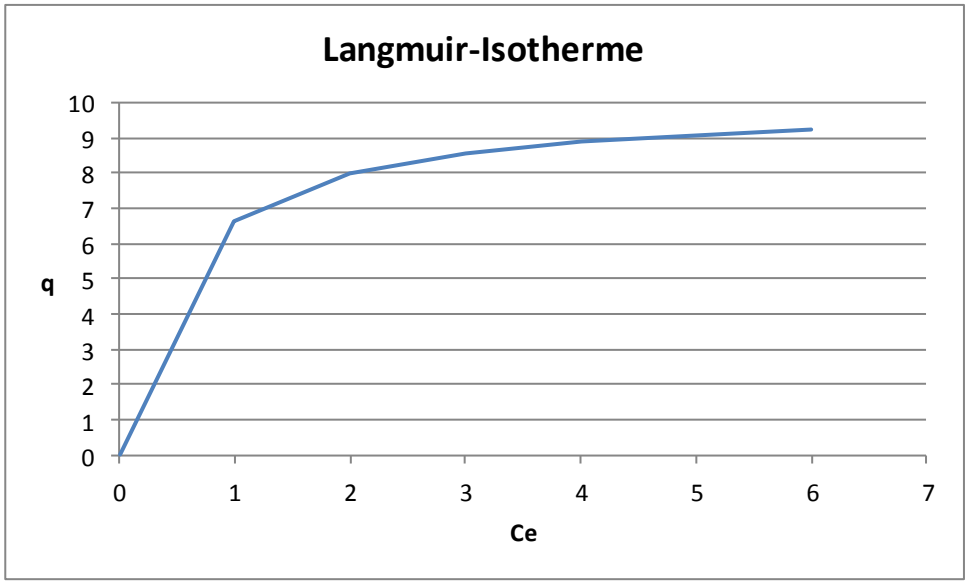


Abbildung 3-4: Typischer Verlauf einer Langmuir-Isotherme

K_L wurde mit 2 gewählt und q_{max} mit 10. Die Kurve wurde abermals nicht geglättet. Der Unterschied der beiden Kurven ist deutlich zu erkennen: Beim Langmuir-Modell ist ein deutlich steilerer Anstieg der Kurve sichtbar, welcher dann allmählich abflacht. Beim Freundlich-Modell hingegen erfolgt der Anstieg weniger steil, dafür homogener.

Das Sorptionsverhalten wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Einerseits von den Eigenschaften des Adsorbens sowie des Adsorptivs, als auch von Randbedingungen. Dabei sind die Oberfläche des Adsorbens, die Affinität zur Adsorption, das Lösungsmittel, der pH-Wert und die Temperatur zu nennen, aber auch die Höhe der Anfangskonzentration.

In Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 ist ein konvexer Verlauf der Kurven erkennbar. Bei Adsorptionsisothermen existieren unterschiedliche Typen von Kurvenverläufen. Dazu zählen konvexe und konkave Verläufe, sowie Kombinationen aus beiden. Ein konvexer Verlauf deutet meist auf gute Aufnahmeeigenschaften für gelöste Stoffe hin. Hingegen werden aus konkaven Verläufen eher ungünstige Sorptionseigenschaften interpretiert und es kann mit Wechselwirkungen zwischen Adsorbens und Oberfläche gerechnet werden (Hilliges, 2007).

Im Zuge dieser Arbeit wurden Batchversuche durchgeführt und dessen Ergebnisse durch Adsorptionsisothermen dargestellt. Näheres dazu ist unter Material und Methoden, Punkt 4.4 zu finden.

3.5 Rechtsgrundlagen

Nach der Behandlung der Straßenabwässer in einer geeigneten Filteranlage soll das gereinigte Wasser, wenn möglich, versickert werden. Das heißt, es gelangt ins Grundwasser. Aber auch Ableitungen in Oberflächengewässer zählen zu den Möglichkeiten der Abführung des gereinigten Wassers. Um Gewässer vor zu hohen Schadstoffbelastungen zu schützen, wurde in Österreich über die Wasserrahmenrichtlinie Qualitätszielverordnungen, sowohl für Grundwasser, als auch für Oberflächengewässer, bezogen auf chemische und ökologische Qualität, verordnet (Punkt 3.5.1 und 3.5.2). Da das Straßenabwasser vor allem chemisch hoch belastet sein kann (Punkt 3.2) und die Ableitung vorwiegend über Versickerung erfolgt (Punkt

3.1.1), werden die Anforderungen an das Reinigungsziel zur Kapazitätsprüfung von Filtermaterial an die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser angelehnt.

3.5.1 Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser

(QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010)

Ein Ziel der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW) ist es, den guten Zustand des Grundwassers in Bezug auf seine chemische Beschaffenheit mittels festgelegter Werte zu erhalten bzw. zu erreichen. Ein weiteres Ziel ist die Festlegung von Kriterien und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers (Verschlechterungsverbot).

Grundsätzlich sollten Grundwasser und Quellwasser so rein gehalten werden, dass sie als Trinkwasser verwendet werden können.

Zur Beschreibung des guten chemischen Zustandes des Grundwassers wurden so genannte **Schwellenwerte** festgelegt, ausgedrückt als Konzentration eines bestimmten Schadstoffes, welche in einem Grundwasserkörper langfristig nicht überschritten werden dürfen.

Die herangezogenen Parameter zur Beschreibung des guten Zustandes finden sich in der QZV Chemie GW in der Anlage 1. Die festgelegten Schwellenwerte entsprechen 90% der Trinkwassergrenzwerte (aus Vorsorgegründen). Bei Pestiziden und Metaboliten wurden die Schwellenwerte aus der bestehenden Grundwasserschwellenwertverordnung (1991 in Kraft getreten, 2010 außer Kraft getreten) übernommen.

Angelehnt an jene Schwermetalle, welche zur Prüfung der Kapazität zum Einsatz kamen (Punkt 4.3.7), finden sich für Blei, Chrom, Kupfer und Nickel in der QZV Chemie GW folgende Schwellenwerte (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Schwellenwerte für ausgewählte Spurenstoffe (QZV Chemie GW BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010)

Parameter	**Pb**	**Cr**	**Ni**	**Cu**
Schwellenwert (µg/l)	9	45	18	1800

Für Zink gibt es in Anlage 1 keinen Schwellenwert. Allerdings findet sich Zink in Anlage 3 wieder.

In Anlage 2 werden Schadstoffe angeführt, deren direkte Einbringung ins Grundwasser verboten ist (z.B. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe). Unter direkter Einbringung wird jede dauernde oder zeitweilige Einbringung von Schadstoffen in das Grundwasser ohne Bodenpassage verstanden.

In Anlage 3 werden Schadstoffe angeführt, die weder direkt noch indirekt eingebracht werden dürfen. Sollte dies doch erfolgen, so ist eine wasserrechtliche Bewilligung erforderlich. In beiden Fällen ist die zulässige Schadstofffracht so zu begrenzen, dass eine Verschlechterung und Verschmutzung des Grundwassers verhindert wird.

Bei Anlage 1 ist eine Verschmutzung dann nicht gegeben, wenn der Schwellenwert beim Eintritt ins Grundwasser eingehalten wird.

Der Schwellenwert für Kupfer laut QZV Chemie GW liegt weit über den mittleren Aufkommenswerten aus den Literaturangaben (siehe Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10). Für Zink wird kein Schwellenwert angegeben.

Überlegungen zur Festlegung eines Prüfkriteriums zur Kapazitätsprüfung anhaltend an die Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG) wurden unternommen, jedoch kann nicht direkt auf diese verwiesen werden, da sich die Kapazitätsprüfung auf Emissionswerte bezieht, die QZV Chemie OG jedoch Immissionswerte betrachtet. Im Folgenden wird der Vollständigkeit halber kurz auf die QZV Chemie OG eingegangen.

3.5.2 Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer

(QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010)

Die Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG) definiert den guten Zustand von Oberflächengewässern in Form von Umweltqualitätsnormen. Dies sind zahlenmäßig definierte Konzentrationen eines Parameters, die den zu erreichenden guten chemischen Zustand bzw. eine chemische Komponente des zu erreichenden guten ökologischen Zustandes beschreibt.

Im Folgenden wird nur auf die **Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm** (JD-UQN) eingegangen.

Die Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnorm errechnet sich aus der Summe der zulässigen Zusatzkonzentration, welche ökotoxologisch abgeleitet ist, und einer Hintergrundkonzentration, welche geogen bedingt ist.

Manchmal sind Umweltqualitätsnormen von gewissen Hilfsparametern abhängig. Bei Kupfer und Zink ist der Wert z.B. von der Wasserhärte abhängig.

Die Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen für die Parameter Kupfer, Zink, Blei, Chrom und Nickel finden sich in Tabelle 3-3, Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5.

Tabelle 3-3: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – zulässige Zusatzkonzentrationen ausgewählter Parameter (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010)

Parameter	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Ni (µg/l)	Zn (µg/l)
Zulässige Zusatzkonzentration	7,2	8,5	-	20,0	-
Für $CaCO_3$/l < 50 mg	-	-	1,1	-	7,8
Für 50 < $CaCO_3$/l < 100 mg	-	-	4,8	-	35,1
Für $CaCO_3$/l > 100 mg	-	-	8,8	-	52,0

Tabelle 3-4: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – Hintergrundkonzentrationen ausgewählter Parameter (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010)

Parameter	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
Hintergrundkonzentration (µg/l)	0,2	0,5	0,5	0,3	1,0

Tabelle 3-5: Jahresdurchschnitts-Umweltqualitätsnormen – Summe aus zulässiger Zusatzkonzentration und Hintergrundkonzentration (QZV Chemie OG BGBl. II Nr. 96/2006 idFd. BGBl. 461/2010)

Parameter	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Cu (µg/l)	Ni (µg/l)	Zn (µg/l)
Summe	7,4	9,0	-	20,3	-
Für $CaCO_3$/l < 50 mg	-	-	1,6	-	8,8
Für 50 < $CaCO_3$/l < 100 mg	-	-	5,3	-	36,1
Für $CaCO_3$/l > 100 mg	-	-	9,3	-	53,0

3.6 Charakteristische Aufkommensdaten

Es existieren viele verschiedene Studien, welche Aufkommensdaten zu Konzentrationen von Schwermetallen aus Straßenabwässern zur Verfügung stellen. Dabei werden unterschiedliche Entnahmestellen, Herkunftsbereich der Spurenstoffe, sowie Datenverfügbarkeit gegeneinander abgewogen und daraus plausible Werte zusammengefasst.

3.6.1 Messungen des Institutes für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Hinsichtlich mehrerer, am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz laufender, Projekte bezüglich Straßenabwasserreinigung wurden bestehenden Gewässerschutzanlagen Zulauf-, sowie Ablaufproben entnommen und analysiert. In Tabelle 3-6 bis Tabelle 3-8 befinden sich Ergebnisse von Messungen aus Gewässerschutzanlagen mit Standorten bei Wien.

Um die Aufkommenswerte der Spurenstoffe im Straßenabwasser zu vergleichen, sollten lediglich die Zulaufwerte betrachtet werden.

Tabelle 3-6: Zu- und Ablaufwerte der GSA-H und GSA-W aus Einzelmessungen 2012

Parameter	**GSA-H 2012**		**GSA-W 2012**	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
Pb (µg/l)	<4	<4	4,3	<4
Cr (µg/l)	5	<2,5	7,7	<2,5
Cu (µg/l)	14,2	14,8	39,1	10,8
Ni (µg/l)	5,3	4,8	4,8	4,2
Zn (µg/l)	81,3	7,7	331	20,7

Die angegebenen Werte stammen aus einer Einzelmessung an beiden Gewässerschutzanlagen H und W (Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, 2012).

Tabelle 3-7: Zu- und Ablaufwerte der GSA-H aus einer Messreihe 2005-2007 (Maesho Haile, 2008)

Parameter	**GSA-H 12/2005 – 5/2007**	
	Zulauf Min-Max (Mittel)	Ablauf Min-Max (Mittel)
Cu (µg/l)	11-430 (205)	19-55 (35)
Zn (µg/l)	55-1000 (360)	19-217 (72)

Die Messwerte stammen aus einer Messreihe zwischen Dezember 2005 und Mai 2007. Dabei wurden Proben bei 11 unterschiedlichen Regenereignissen gezogen und analysiert (Maesho Haile, 2008).

Tabelle 3-8: Zu- und Ablaufwerte der GSA-A2 aus einer Einzelmessung 2012 (Lins, 2013)

Parameter	GSA-A2 (Juni 2012)	
	Zulauf	Ablauf Min-Max (Mittel)
Pb (µg/l)	<4	<4-6,5 (-)
Cr (µg/l)	12,3	6,5-12,8 (9,4)
Cu (µg/l)	11,0	5,8-12 (9,2)
Ni (µg/l)	13,4	5,6-30,9 (17,2)
Zn (µg/l)	19,9	30,9-51,4 (38,4)

Beide Probenahmen (Zu- und Ablauf) wurden innerhalb von 24 Stunden genommen. Bei den Ablaufwerten wurde zu 3 unterschiedlichen Tageszeitpunkten je eine Probe genommen (Lins, 2013).

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Messungen bzw. Messreihen wird klar, dass die Werte zum Teil große Unterschiede aufweisen. Dies hängt vor allem vom jeweiligen Regenereignis ab. Da die Messreihe in Tabelle 3-7 die größere Datenlage aufweist, sollte diese als Bezug herangezogen werden. Zu beachten ist aber, dass diese Messungen trotzdem als standortbezogen zu betrachten sind und nicht für ganz Österreich repräsentativ ist. Daher wird im folgenden Punkt auf veröffentlichte Studien eingegangen, welche sich mit dem Aufkommen der Spurenstoffe im Straßenabwasser beschäftigen und repräsentative Werte hervorbringen.

3.6.2 Aufkommensdaten aus der Literatur

Angelehnt an verschiedene Oberflächen, Straßentypen und an unterschiedliche Herkunftsbereiche hat *Göbel et al.* (2006) eine Tabelle mit den repräsentativen mittleren Konzentrationen von verschiedensten, im Straßenabwasser vorkommenden Spurenstoffen erstellt (siehe Anhang, Punkt 8.1). Diese Werte orientieren sich an den verschiedensten Studien und wurden aus über 1300 Daten ermittelt.

Göbel et al. (2006) hat diese Daten drei Klassen zugeordnet: Regenwasser, Dachabfluss und Verkehrsabfluss. Diese Klassen lassen sich wiederum in Unterklassen einteilen. Im Falle von Verkehrsabfluss sind Rad- und Fußweg („Pedestrian and cycle way yard“), Parkplatz („car park“), Anlieger- bzw. Nebenstraße („service road“), Schnellstraße („main road“) und Autobahn („motorway“) erwähnt.

In dieser Arbeit wird auf stark befahrene Straßen (Hauptstraßen, Schnellstraßen; JDTV < 500) Bezug genommen. Tabelle 3-9 zeigt einen Auszug der repräsentativen mittleren Konzentrationen für die wichtigsten Schwermetalle für den jeweils relevanten Straßentyp (Göbel et al., 2006), die als mögliche Bezugswerte für Lösungsausgangskonzentrationen in Frage kommen. Als Straßentyp wurde, soweit verfügbar, „Schnellstraße“ gewählt.

Tabelle 3-9: Repräsentative mittlere Konzentrationen aus Göbel et al. (2006)

Parameter	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
Konzentration (µg/l)	137	11	97	27	407
Straßentyp	Anlieger- bzw. Nebenstraße	Haupt- /Schnellstraße	Haupt- /Schnellstraße	Autobahn	Haupt- /Schnellstraße
Verfügbare Daten	>15	5-15	>15	>15	>15

Göbel et al. (2006) hat die Konzentration für Blei (Straßentyp: „Haupt-/Schnellstraße“) mit 170 µg/l angesetzt. Da dieser Wert zu hoch erscheint (vergleiche z.B. aus Werten von Tabelle 3-10), wird hier auf den niedrigeren Wert für den Straßentyp „Neben- bzw. Anliegerstraße“ Bezug genommen. Bei Nickel (Ni) wird der Wert für Straßentyp „Autobahn“ herangezogen, da hier eine deutlich höhere Anzahl von Daten verfügbar war. Für Chrom (Cr) sind allgemein wenige Daten verfügbar.

Helmreich et al. (2010) hat eine ähnliche Studie durchgeführt, bei der 63 Abflussproben über zwei Jahre an einer stark befahrenen Straße in Deutschland entnommen und analysiert wurden. Auch hier wurde eine Tabelle erstellt, aus der Datenanzahl, Maximal- und Minimalkonzentrationen, sowie der jeweilige Mittel- und Medianwert ersichtlich sind (siehe Anhang, Punkt 8.2). Tabelle 3-10 zeigt einen Auszug, der gemittelte Werte repräsentiert und für mögliche Lösungsausgangskonzentrationen zu Hilfe genommen werden kann (Helmreich et al., 2010).

Tabelle 3-10: Aufkommenswerte aus Helmreich et al. (2010)

Parameter	Pb	Cu	Ni	Zn
Konzentration (µg/l)	56	191	55	847

Es ist ersichtlich, dass der Wert sowohl für Zink (Zn) als auch für Kupfer (Cu) deutlich höher liegt als *Göbel et al.* (2006). Aufgrund der größeren Datenverfügbarkeit bei *Göbel et al.* (2006) werden die dort angeführten Werte als repräsentativer gesehen. Bei der Konzentration für Blei liegen beide Werte in einem realistischen Bereich. Es muss aber erwähnt werden, dass sich der Wert für Blei in den letzten Jahren deutlich verringert hat, vorangegangen durch die Entfernung von Blei in Kraftstoffen (Schmitt et al., 2010). Bei den Versuchen in Zusammenhang mit dieser Arbeit wurde sowohl mit 50 µg/l, als auch mit 100 µg/l, angelehnt an beide Werte der Literaturangaben, gearbeitet.

Für die Säulenversuche, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurden Modelllösungen im Labor hergestellt, die sich an den angegebenen Literaturstudien orientieren. Die genauen Werte sind in Material und Methoden unter Punkt 4.3.7 zu finden.

3.7 Methoden zur Prüfung der Filterkapazität im Labor

3.7.1 Batchversuche

Allgemeine Versuchsbeschreibung

Die einfachste Methode, die Aufnahmekapazität von Filtermaterial zu prüfen, sind Batchversuche. Dabei wird eine bestimmte Masse Sorbens (= das Filtermaterial) und ein gewisses Volumen einer Sorptivlösung (= Modelllösung aus Schwermetallen) mit bekannter (Eingangs-) Konzentration C_i in einem Gefäß geschüttelt. Während der Versuchsdurchführung wird weder Lösung oder Sorbens hinzugegeben noch abgeführt. Unter Kontaktlösung wird die direkt am Sorbens befindliche Lösungsmenge verstanden. Diese gibt Sorptiv an das Sorbens ab, wodurch sich die Konzentration der Lösung verringert und gleichzeitig das Sorbens beladen wird. Durch das Schütteln wird die Kontaktlösung vom Sorbens verdrängt und diese vermischt sich mit der übrigen Lösung. Die Gesamtkonzentration verringert sich und ein neuerlicher Kontakt zwischen Sorbens und Sorptiv entsteht. Dieser Kreislauf wiederholt sich so oft, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Beladung und Lösungskonzentration eingestellt hat, d.h. die gesamte Lösung im Gefäß, sowie die Kontaktlösung haben nun die gleiche Konzentration, die sogenannte Gleichgewichtskonzentration C_e. Die korrespondierende Beladung dazu heißt q_e.

Durch Batchversuche können einerseits die Sorptionskinetik, als auch Sorptionsisothermen ermittelt werden.

Batchversuche zur Untersuchung der Sorptionskinetik

Um die Sorptionskinetik näher zu untersuchen, werden Materialproben mit einer wässrigen Lösung aus z.B. Schwermetallen (definierter Konzentration) versetzt und diese durch Schütteln in Kontakt gebracht. Dabei werden meist realistische Konzentrationen verwendet. Nach definierten Zeitintervallen wird die Restkonzentration in der wässrigen Lösung gemessen. Dadurch ergibt sich eine Kurve, die anfangs stark ansteigt (Aufnahme von Schwermetallen hoch) und nach der Zeit durch das Erreichen der Gleichgewichtskonzentration abflacht (Aufnahme gering).

Batchversuche zur Ermittlung der Adsorptionsisotherme

Bei Batchversuchen zur Ermittlung der Adsorptionsisothermen werden die Materialproben mit verschiedenen Lösungen unterschiedlicher Ausgangskonzentrationen vermischt. Damit die theoretisch maximal erreichbare Sorptionskapazität ermittelt werden kann, liegen diese Konzentrationen über jenen typischer Aufkommenswerte im Abwasser. Es werden pro Ausgangslösung zwei Proben angesetzt und danach aus dem Analyseergebnis der Mittelwert gebildet. Nach dem Schüttelvorgang wird die Lösung filtriert und die Restkonzentration (im besten Fall die Gleichgewichtskonzentration) der Lösung ermittelt. Durch die Darstellung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen ergibt sich eine Adsorptionsisothermenkurve, die sich den unter Punkt 3.4.3 genannten Isothermen-Modellen angleichen lässt.

3.7.2 Säulenversuche

Allgemeine Versuchsbeschreibung

Bei Säulenversuchen wird eine bestimmte Menge an Sorbensmaterial (= Filtermaterial) in eine Säule eingebaut, welche dann von einer Sorptivlösung (=Modelllösung aus Schwermetallen) mit bekannter Konzentration C_i kontinuierlich durchflossen wird. Die im Ablauf austretende Lösung wird der Säule nicht neuerlich zugeführt, d.h. das Material kommt ständig mit neuer Ausgangslösung C_i in Kontakt. Es folgt also keinem Kreislaufprinzip. Bei Säulenversuchen kann das Gleichgewicht zwischen Lösungskonzentration und Beladung dann definiert werden, wenn von der zugebenen Lösung nichts mehr sorbiert wird, d.h. die austretende Lösung C_e entspricht C_i. Die Ausgangskonzentration bestimmt also die Beladung im Gleichgewicht q_e und repräsentiert gleichzeitig die Gleichgewichtskonzentration C_e.

Oft wird die Kapazität nicht dadurch bestimmt, wann bzw. nach welchem Volumen oder nach welcher Schwermetallfracht die Ablaufkonzentration der Säule wieder die Ausgangskonzentration erreicht hat, sondern es wird die sogenannte Filtererschöpfung definiert (Punkt 4.1.2). Das heißt, es könnte also festgelegt werden, dass z.B. die Erschöpfung dann erreicht ist, wenn die Ablaufkonzentration 50% der Eingangskonzentration erreicht hat. Eine andere Möglichkeit ist die Festlegung eines Konzentrationsgrenzwertes. Näheres dazu unter Material und Methoden, Punkt 4.1.2.

3.7.3 Säulen- und Batchversuche aus der Literatur

Batch- und Säulenversuche werden über ihr Sorptionsverhalten verglichen. Das heißt, es wird der Verlauf der Beladungskurve beider Varianten betrachtet und anschließend können daraus Schlüsse über das Adsorptionsverhalten gezogen werden. Unter Interpretation und Ergebnisse, Punkt 5.1.3, wurde ein direkter Vergleich zwischen durchgeführten Versuchen von Säulen und Batchtests im Labor unternommen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Experimente, die sowohl Batch- als auch Säulenversuche beschreiben. In den folgenden Punkten wird nun auf Auszüge aus der Literatur näher eingegangen.

(1) Dwivedi et al. (2008)

Dwivedi et al. (2008) hat zum Beispiel Versuche im Batch Modus als auch Säulenversuche durchgeführt. Beide Male wurde als Adsorbens ein Aktivkohle-Granulat mit Kokosnussfasern und als Ausgangslösung Blei in wässriger Lösung verwendet.

Die **Batch**versuche wurden bei unterschiedlichen Konzentrationen, jedoch bei gleichem pH-Wert (pH-neutral) und gleicher Temperatur durch einen Schüttelvorgang von 24 h und 120 U/min durchgeführt. Gemessen wurde die Restkonzentration von Blei nach gewissen Zeitabständen in jeder Probe. Es wurde jeweils 0,1 g des Materials mit 200 ml wässriger Bleilösung in Verbindung gebracht. Dabei wurden Ausgangskonzentrationen von 20, 30, 40 und 60 mg/l verwendet. Auf eine mögliche Änderung des pH-Wertes nach den Versuchen wird in der Literatur nicht näher eingegangen.

Die Ergebnisse wurden der Freundlich Gleichung angepasst (Abbildung 3-5).

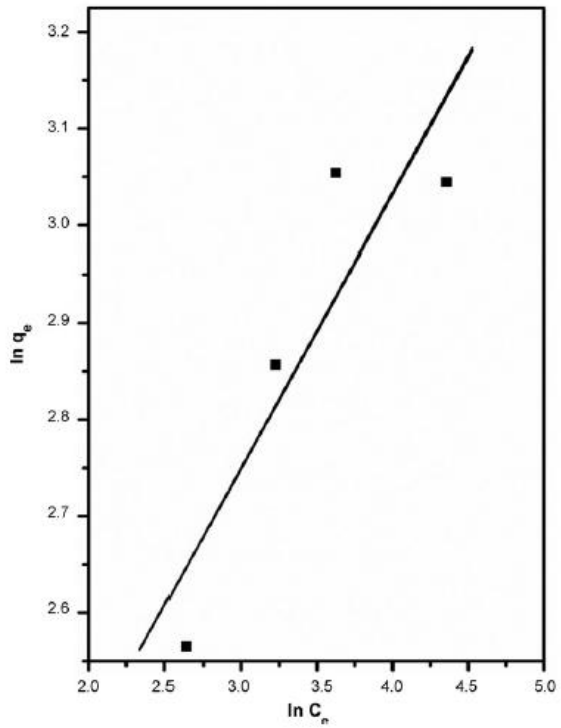


Abbildung 3-5: Freundlich Adsorptionsisotherme für Blei (Dwivedi et al., 2008)

Zur Überprüfung, ob das Modell die Daten gut repräsentiert, wurde das Bestimmtheitsmaß ermittelt. Demnach passt das Freundlich Modell gut mit den Daten zusammen (R^2 = 0,89).

Es wurde auch eine Anpassung an die Langmuir-Adsorptionsisotherme durchgeführt, mit welcher die maximale Aufnahmekapazität ermittelt werden kann. Diese belief sich auf einen Wert von ca. 27 mg Pb/g Material.

Die **Säulen** waren mit 60 cm Filtermaterial befüllt und wiesen einen Durchmesser von 4 cm auf. Die Beschickung durch die Bleilösung erfolgte von oben nach unten. In regelmäßigen Zeitabständen wurden Proben gezogen und durch die jeweilige Bleikonzentration dieser die Restkapazität des Feststoffes analysiert. Anschließend wurden Durchbruchkurven erstellt (siehe Punkt 4.1.2) und der Durchbruchpunkt (also der Punkt, bei dem der Filter als erschöpft betrachtet wurde) auf C_e/C_i = 0,5 gesetzt. Die Berechnung der Adsorptionskapazität erfolgte nach folgender Formel:

$$Q_{0,5} = \frac{t_b Q C_i}{m} \qquad (3\text{-}5)$$

$Q_{0,5}$… Adsorptionskapazität ausgedrückt durch C_e/C_i = 0,5 (mg/g)

C_i … Ausgangskonzentration (mg/l)

C_e … Ablaufkonzentration (mg/l)

t_b … Zeit bis zum Durchbruchpunkt (h)

Q … Flussrate ($m^3/(h*m^2)$)

m … Masse des Adsorbens (g)

In Abbildung 3-6 sind typische Kurvenverläufe zu den Säulenexperimenten dargestellt.

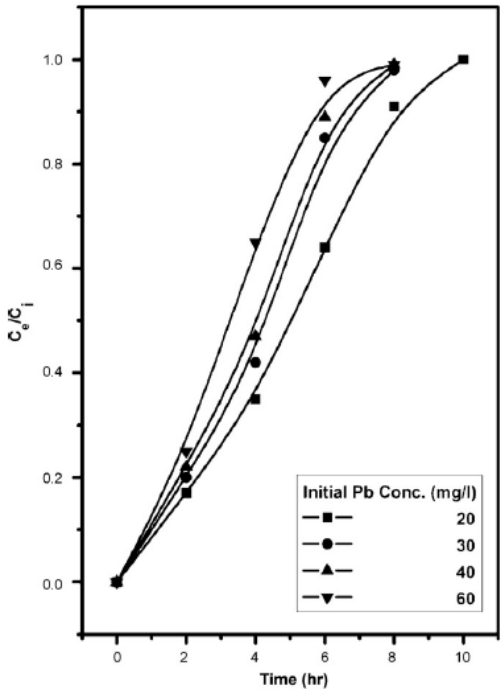


Abbildung 3-6: Ergebnisse der Säulenversuche nach unterschiedlicher Ausgangskonzentration nach Dwivedi et al. (2008)

In Abbildung 3-6 sind die Kurven der Ablaufkonzentrationen bei unterschiedlichen Eingangskonzentrationen (20, 30, 40 und 60 mg/l) und einer Flussrate von 12m³/(h*m²) (entspricht in etwa 260 ml/min) dargestellt. Sie zeigen einen steilen Anstieg und flachen bis zum Erreichen der Eingangskonzentration etwas ab. Je steiler die Kurve verläuft, desto schneller ist der Durchbruch erreicht. Das heißt in diesem Fall, je niedriger die Ausgangskonzentration, desto langsamer wird der Durchbruchpunkt erreicht.

Auch unterschiedliche Flussraten wurden bei einer Ausgangskonzentration von 60 mg/l miteinander verglichen (siehe Abbildung 3-7).

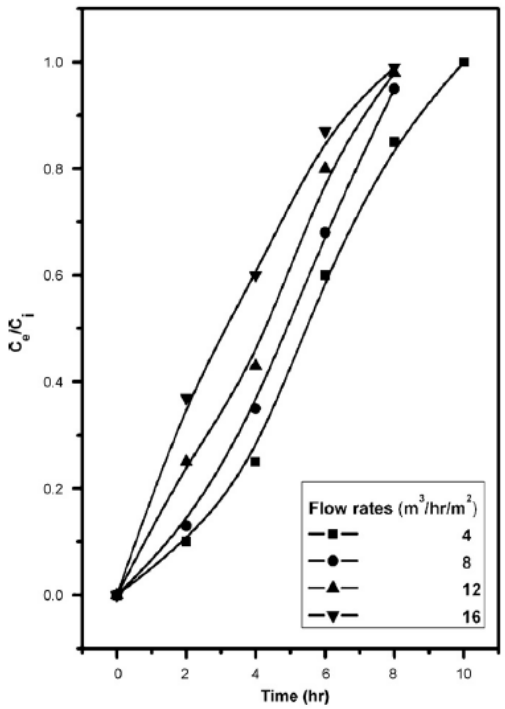


Abbildung 3-7: Ergebnisse der Säulenversuche nach unterschiedlicher Flussrate nach Dwivedi et al. (2008)

Bei der Berechnung der Adsorptionskapazität nach Formel 3-5 ergab sich, dass die höchste Kapazität bei einer Ausgangskonzentration von 60 mg/l und einer Flussrate von 12 m³/(h*m²) erreicht wurde. Die daraus errechnete Kapazität betrug ca. 2 mg Pb/g Material.

Werden nun die ermittelten Kapazitäten **beider Versuche** miteinander verglichen, wird deutlich, dass die Kapazität in den Batchversuchen signifikant höher liegt. Der Grund dafür liegt vermutlich in der Irreversibilität des Sorptionsprozesses bei Säulenversuchen, sowie dem unterschiedlichen Ansatz bezüglich Adsorptionsgleichgewicht in beiden Experimenten.

(2) Popuri et al. (2009)

Popuri et al. (2009) hat im Zuge von Batch- und Säulenversuchen den Rückhalt von Kupfer- und Nickelionen durch Chitosan (Biopolymer, Summenformel $C_6H_{11}NO_4$) getestet und hat dabei den Einfluss auf den Adsorptionsprozess untersucht (durch Variation von Eingangs-pH-Wert, Kontaktzeit, Masse des Adsorbens und Schwermetallkonzentrationen). Neben den Batchversuchen, welche zur Anpassung des Adsorptionsverhaltens an Adsorptionsisotherme durchgeführt wurden, wurden Säulenversuche zur Erfassung der Adsorptionskapazität unter dynamischem Fluss durchgeführt und Durchbruchkurven erstellt.

Für die **Batchversuche** wurden jeweils 100 ml einer Kupfer- oder Nickellösung in verschiedenen Konzentrationen (100 – 500 mg/l) mit einer bestimmten Menge an Adsorbens (Menge unbekannt) in einem 125 ml Erlenmayerkolben vermengt und anschließend bei Raumtemperatur für eine vorher definierte Zeit geschüttelt (120 U/min). Nach Erreichen der Gleichgewichtskonzentration wurde die wässrige Lösung vom Adsorbens getrennt und auf Schwermetallkonzentration analysiert. Jedes Experiment wurde drei Mal durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet. Zur Analyse des Einflusses durch den pH-Wert wurde das Experiment bei unterschiedlichen pH-Werten durchgeführt (genaue Werte unbekannt, jedoch jedenfalls bei pH 4 und 5, siehe unten).

Bei den **Säulenversuchen** wurden Glassäulen mit einem Durchmesser von 2,5 cm und einer Höhe von 10 cm verwendet. Das Material wurde beim Einfüllen der Säulen verdichtet, um Raumausbildungen zu vermeiden. Die Säulen wurden mit einer konstanten Flussrate von 2

ml/min beschickt und die Ablaufkonzentrationen in gewissen Zeitabständen gemessen. Die Durchbruchkurven für die Adsorption von Kupfer und Nickel ergaben sich durch Auftragen von C_e/C_i in Abhängigkeit vom Volumen.

Die besten Ergebnisse bei den **Batchversuchen** bezüglich des Eingangs-pH-Wertes lieferte bei Nickel ein pH-Wert von 5 und bei Kupfer ein pH-Wert von 4. Die Adsorptionskapazität steigerte sich, je niedriger der pH-Wert. Bei nochmals niedrigeren pH-Werten wurde allerdings festgestellt, dass sich die Aufnahme verringert hat. Das hat damit zu tun, dass bei niedrigerem pH-Wert mehr H+-Ionen vorhanden sind. Diese führen zur allgemeinen Postivladung der Oberfläche. Die meisten Schwermetall-Ionen sind ebenfalls positiv geladen, weshalb sich die Adsorption in diesem Fall verringert. Bei höheren pH-Werten kommt es dafür zur Konkurrenz mit anderen Ionen, wie zum Beispiel Carboxyl-, Hydroxy- und Aminogruppen.

Bezüglich der Schütteldauer ergab sich, je länger der Schüttelvorgang, desto mehr wird adsorbiert. Nach Erreichen der Gleichgewichtskonzentration verändert sich die Konzentration allerdings nicht mehr signifikant (nach ca. 210 – 240 min).

Die Masse des Adsorbens variierte zwischen 0,05 und 0,5 g. Sowohl bei Kupfer, als auch bei Nickel erhöhte sich die Aufnahmekapazität mit steigender Masse von Adsorbens. Jedoch muss gesagt werden, dass sich die Kapazität der Metallionen pro Masseneinheit von Adsorbens (ausgedrückt in mg/g) durch Erhöhung der Masse verringert hat, was auf die geringere Nutzung von Adsorptionskapazität bei höherer Dosis zurückzuführen ist.

Zur Modellierung der Adsorptionsisothermen wurden die Modelle von Freundlich und Langmuir verwendet. Beide Modelle repräsentierten die Daten relativ gut. Nach Langmuir lag die maximale Adsorptionskapazität bei ca. 88 mg/g für Kupfer und bei ca. 121 mg/g bei Nickel.

Bei den **Säulenversuchen** betrug die Kontaktzeit in etwa 5,3 Minuten. Die Ablaufkonzentrationen zeigten eine hoch effektive Aufnahme zu Beginn. Nach und nach wurde der Schwermetallrückhalt kontinuierlich verringert, bis das Material gesättigt war. Nach ca. 300 ml Lösung (das entspricht in etwa 6 Bettvolumina) war das Material in der Säule gesättigt.

(3) Hilliges (2007)

Hilliges (2007) hat im Zuge einer Dissertation zwei Materialien auf ihre Einsetzbarkeit als Filtermaterial in einer Behandlungsanlage getestet. Dafür wurden sowohl Batchversuche, für die Beschreibung der Sorptionskinetik und zur Ermittlung von Sorptionsisothermen, als auch Säulenversuche durchgeführt. Die Säulenversuche wurden sowohl mit Modellwässern (im Labor hergestellt), als auch mit realen Verkehrsflächenabflüssen durchgeführt, um weitere wichtige Erkenntnisse über die Kapazität von Filtern zu liefern.

Die **Batchexperimente** dienten vorrangig zur Ermittlung der maximalen Sorptionskapazität beider Materialien („CSC“, steinkohlehältig, und „RWE“, braunkohlehältig). Sie wurden mit unterschiedlichen Lösungen (Kupfer, Blei oder Zink) bei zwei unterschiedlichen pH-Werten (3 und 5; diese lagen deshalb so niedrig um möglichen Ausfällungen entgegen zu wirken) durchgeführt. Die Anfangskonzentrationen lagen über jenen Werten, die in Verkehrsflächenabflüssen typisch sind (um eine maximale Kapazität ermitteln zu können). Die Reaktionszeit wurde auf 24 h gesetzt. Jeweils 1 g des Materials wurde für die Batchtests verwendet.

Es ergaben sich für beide Materialien ähnliche Sorptionskapazitäten (die Ausgangskonzentration lag bei 1 mmol/l) bedingt durch die geringe Ausgangskonzentration und die großen Oberflächen, unabhängig vom pH-Wert (geringe Konkurrenz der Metallionen mit H^+-Ionen). Die Sorptionsisotherme beider Materialien ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

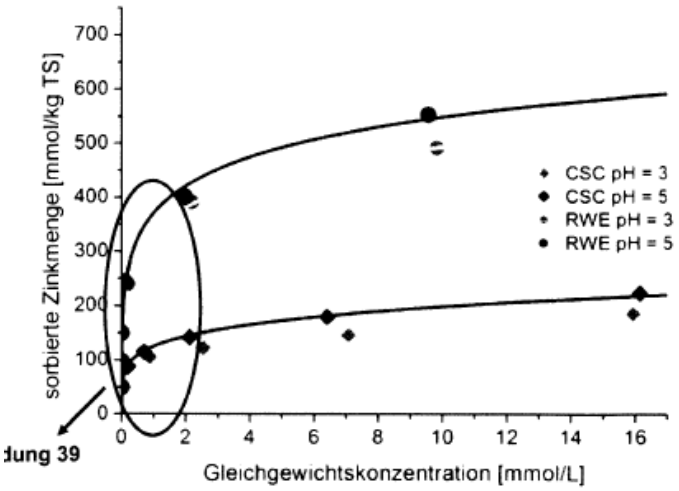


Abbildung 3-8: Vergleich der Sorptionsisotherme der Materialien „RWE“ und „CSC“ bei pH-Wert 3 bzw. 5 (Hilliges, 2007)

Die Sorptionskapazitäten lagen für beide Materialien bei ca. 50 mmol/kg TS. Bei Erhöhung der Ausgangskonzentration auf 20 mmol/l ergaben sich schon deutlichere Unterschiede beider Materialien, die Sättigung schien dennoch noch nicht erreicht (kein deutliches Plateau in Abbildung 3-8 zu erkennen). Der Einfluss des pH-Wertes schien dennoch gering. Im direkten Vergleich beider Materialien erkennbar ist die deutlich höhere Sorptionskapazität von „RWE“ gegenüber „CSC“ (Abbildung 3-8).

Die **Säulenversuche** erfolgten sowohl mittels Modelllösungen aus Zink (Konzentration = 10 mg/l, pH-Wert = 7) als auch mit realen Straßenabwässern (pH-Wert zwischen 6,8 und 7,6). *Hilliges* (2007) definiert dabei den Filterdurchbruch mit dem 10%igen Erreichen der Eingangskonzentration. Die Versuche wurden jedoch so lange weiter geführt, bis eine definierte Sättigung (80%) erreicht war. Die Flussrate betrug 96 ml/min.

In Abbildung 3-9 werden die Resultate aus den Versuchen mit der Modelllösung beider Materialien erkennbar. Dabei ist auf der Ordinate das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ablaufkonzentration dargestellt und auf der Abszisse die Bettvolumina. Als Bettvolumen wird jenes Volumen bezeichnet, das der Filterkörper samt Poren einnimmt. Das durchgesetzte Volumen wird somit durch durchflossene Bettvolumina ersetzt.

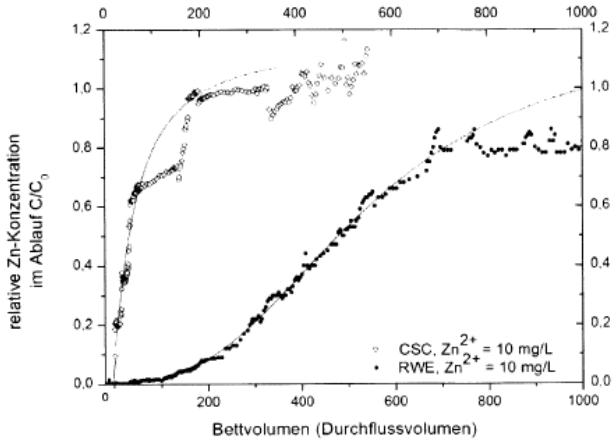


Abbildung 3-9: Durchbruchkurven der Materialien bei der Beschickung mit Zink-Modelllösung (Hilliges, 2007)

Der steilere Verlauf des Materials „CSC“ deutet auf eine geringere Sorptionsfähigkeit und somit auf ein schnelleres Erreichen des Durchbruchpunktes hin.

In Tabelle 3-11 ist nun ein direkter Vergleich bezüglich der Sorptionskapazität zwischen den Säulen- und Batchtest tabellarisch dargestellt.

Tabelle 3-11: Vergleich der ermittelten Sorptionskapazitäten für beide Materialien; Ausgangskonzentrationen: 20 mmol/l für Isothermen, 10 mg/l für Säulenversuche (Hilliges, 2007)

	Zn-Sorptionskapazität (mmol/kg TS)				
	Sorptionsisotherme		Säulenversuche		
				Sättigungskapazität (80%)	Durchbruchpunkt (10%)
RWE	pH = 3	492	pH = 7	162	71,2
	pH = 5	553			
CSC	pH = 3	187	pH = 7	14,8	0,3
	pH = 5	224			

Klar zu erkennen ist die deutlich höhere Kapazität bei den Batchversuchen. Dies ist auf die höhere Kontaktzeit bei den Batchexperimenten zurückzuführen (24 h gegenüber ein paar Minuten), als auch durch den Schüttelvorgang, was eine bessere Erreichbarkeit der Sorptionsplätze mit sich bringt. Batchtests spiegeln jedoch optimale Bedingungen wieder, welche in der Realität kaum vorkommen. Sie sind geeignet, um festzustellen, ob Materialien allgemein zur Adsorption von Spurenstoffen geeignet sind, zur Ermittlung der Kapazität sind Säulenversuche jedoch unbedingt anzuschließen.

Bei der Beschickung mit realen Straßenabwässern (getestet an RWE) hat sich die Kapazität von 162 mmol/kg TS (Versuche mit Modelllösung) auf einen Wert von 92,5 mmol/kg TS verringert. Dies lässt sich auf die vorhandene Feststofffracht, auf das Vorkommen mehrerer Schwermetalle usw. zurückführen.

Hilliges (2007) hat außerdem in einer Vorversuchsphase anhand von Säulenversuchen (Aufbau wie bei den eben genannten Säulenversuchen) untersucht, ob nächtliche Unterbrechungen in der Beschickung Einfluss auf die Ablaufkonzentrationen haben können. Diese sind in Abbildung 3-10 dargestellt.

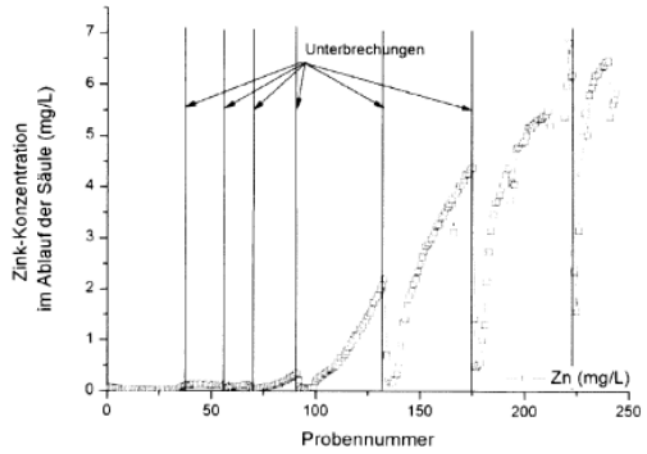


Abbildung 3-10: Ablaufkonzentrationen einer Säule, die mit nächtlichen Unterbrechungen diskontinuierlich mit Modelllösung beschickt wurde (Hilliges, 2007)

In Abbildung 3-10 ist erkennbar, dass die Ablaufkonzentrationen nach der Unterbrechung geringer ausfallen als vor der Unterbrechung. *Hilliges* (2007) führt dies darauf zurück, dass sich bei Unterbrechungen Gleichgewichte einstellen können und somit Konzentrationsunterschiede

durch langsame Diffusionsprozesse ausgeglichen werden können, was bei kontinuierlicher Beschickung nicht der Fall ist. Es ist daher mit einer erhöhten Kapazität zu rechnen, da auch innere Porenoberflächen belegt werden, die sonst nicht belegt werden würden.

Da in der Realität jedoch von Unterbrechungen von Niederschlagsereignissen auszugehen ist, ist anzunehmen, dass dadurch auch die Kapazität der Filteranlage erhöht ist.

4. Material und Methoden

4.1 Standzeitprüfung

Um das Ziel dieser Arbeit, eine Methode für die Kapazitätsprüfung von Filtermaterialien zu entwickeln, zu erreichen, bedarf es der Festlegung, was unter dem Begriff „Standzeit“ verstanden wird.

4.1.1 Standzeit für ÖNORM-Projekt

Da die Ergebnisse dieser Arbeit unter anderem dazu dienen, eine ÖNORM (nationale Norm, welche vom Austrian Standards Institute veröffentlicht wird) für die Kapazitätsprüfung von Filtermaterial bestehender Gewässerschutzanlagen zu entwickeln, wird vor allem an deren Vorgaben angeknüpft. Dabei wurde sich darauf geeinigt, eine Prüfmethode zu entwickeln, mit der nachgewiesen werden kann, ob in einer Anlage befindliches Filtermaterial noch mindestens weitere **vier Jahre** einsetzbar ist (als ÖNORM B2506-3). Darunter wird die Einhaltung definierter Prüfkriterien nach Durchsetzen einer 4-Jahresfracht verstanden. Die Ermittlung dieser 4-Jahresfracht findet sich unter „Erforderliche Beschickungsmenge für Prüfmethode“. Die Prüfung bezieht sich sowohl auf frisch eingebautes Filtermaterial, als auch auf jenes in bestehenden Anlagen.

Die Kapazität des Filtermaterials gilt dann als noch ausreichend, wenn gewisse Kriterien erfüllt sind.

Festlegung der Kriterien

Zur Prüfung der Kapazität auf Schwermetallrückhalt wird mit Modelllösungen aus dem Labor gearbeitet, welche sich aus unterschiedlich hohen Konzentrationen an Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink zusammensetzen (Punkt 4.3.7). Als Prüfkriterium, nach welchem das Filtermaterial noch weitere vier Jahre einsetzbar ist, wird das Unterschreiten des sensibelsten Wertes festgelegt. Für diesen Wert wurde an den Schwellenwerten der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser angeknüpft (Punkt 3.5.1). Als sensibelster Wert gilt Blei mit 9 µg/l. Da nicht in jedem Straßenabwasser mit hohen Bleikonzentrationen zu rechnen ist, werden zusätzlich mögliche Kriterien in Form von Entfernungsraten für Kupfer und Zink definiert.

In der ÖNORM B2506-2 (2012) wird für technische Bodenfilter ein Rückhaltevermögen von > 90% für Kupfer und > 50% für Zink gefordert.

Angelehnt an diese Vorgaben wurden in der Ad-hoc-Gruppe folgende (leicht abgeänderte) Kriterien festgelegt: Entfernungsrate von **Kupfer ≥ 80%**, Entfernungsrate von **Zink ≥ 50%**, Prüfkriterium für **Blei ≤ 9 µg/l**. Vorerst wurde jedoch nur Blei als Haupt-Prüfkriterium herangezogen.

Für die Kapazitätsprüfung bezüglich Mineralölkohlenwasserstoffrückhalt wurde Toluol als Referenzsubstanz für MKW verwendet. Von der Ad-hoc-Gruppe wurden diesbezüglich folgende Werte genannt: Prüfkriterium für **MKW < 0,3 mg/l**, Entfernungsrate von **≥ 95 %**.

Kommt es zum Erreichen bzw. zum Überschreiten des Prüfkriteriums bzw. zum Unterschreiten der Entfernungsrate, gilt das Filtermaterial als beladen und muss getauscht werden.

Erforderliche Beschickungsmenge für Prüfmethode

Zur Ermittlung jener Beschickungsmenge, die mindestens zur Durchführung der Versuche eingesetzt werden muss, um die vier Jahre Standzeit zu repräsentieren, kann die **4-Jahresniederschlagsmenge (4 Jahresniederschläge)** herangezogen werden. Sie ist abhängig vom Säulendurchmesser, der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge und dem Flächenverhältnis A_v. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge wurde mit 700 mm/a angesetzt. Sie beruht auf institutseigenen Messungen an Gewässerschutzanlagen (Alland: 824 mm/a; Groisbach: 742 mm/a; Weißenbach: 743 mm/a) und soll das nördliche Gebiet von Österreich repräsentieren. Das Flächenverhältnis entspricht dem Verhältnis der Einzugsfläche zur Filterfläche der Gewässerschutzanlage.

Die Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr berechnet sich nach folgender Formel.

$$Q_J = NS * \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * A_v \qquad (4\text{-}1)$$

Q_J … Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr (l/a)

NS … mittlerer jährlicher Niederschlag (mm/a) bzw. (l/m²)

d … Durchmesser Säule (m)

A_v … Flächenverhältnis (-)

Je nach Durchmesser und Flächenverhältnis ergeben sich unterschiedliche Niederschlagsmengenwerte. Da bei verschiedenen Gewässerschutzanlagen mit unterschiedlichen Flächenverhältnissen zu rechnen ist, wurde der Ad-hoc-Gruppe der ÖNORM eine **Prüfung auf die Flächenverhältnisse 1:15 und 1:200** vorgeschlagen. Zusätzlich wurden die Werte für ein Flächenverhältnis von 1:100 ermittelt. Die Niederschlagsmengen sind in Tabelle 4-9 (Punkt 4.3.9) zu finden.

Die 4-Jahresniederschlagsmenge wird vorerst sowohl für die Prüfung des Schwermetallrückhaltes, als auch für die des Mineralölrückhaltes herangezogen um die erforderlichen 4 Jahre Standzeit zu repräsentieren.

Hinweis zu den Flächenverhältnissen: Die Prüfung wird auf ein bestimmtes Flächenverhältnis ausgelegt. Im Labor wird mit Modelllösungen, in denen Schwermetalle nur in *gelöster* Form vorkommen, gearbeitet und auch die Prüfung sollte im Labormaßstab durchgeführt werden. Es wird also klar, dass die Prüfung auch auf größere Flächenverhältnisse ausgelegt werden kann, da in der Realität (also in den Anlagen), ein Großteil der Schwermetalle *partikelgebunden* zurückgehalten wird und somit der Anteil der gelösten Schwermetalle viel kleiner ist als in der Prüfmethode angenommen.

4.1.2 Standzeitbestimmung durch Ermittlung der Erschöpfung des Filtermaterials

Die Standzeit von Filtermaterialien kann auch über die Erschöpfung des Filtermaterials definiert werden. In der Literatur finden sich zur Definition, wann diese Filtererschöpfung eintritt, unterschiedliche Ansätze:

(1) Filterdurchbruch nach *Dwivedi et al.* (2008)

Hier wurde der Erschöpfungspunkt durch den so genannten Filterdurchbruch festgelegt. Der Durchbruchspunkt eines Filtermaterials ist dann erreicht, wenn die Ablaufkonzentration (C_e) im Bezug zur Zulaufkonzentration (C_i) einen gewissen Wert erreicht bzw. überschritten hat. Der zeitliche Verlauf ist in so genannten Durchbruchskurven dargestellt und die Durchbruchszeit ist jene Zeit, die vergeht, bis der Durchbruchpunkt erreicht ist.

Dwivedi et al. (2008) definiert den Filterdurchbruch für Blei zum Beispiel als dann erreicht, wenn die Ausgangskonzentration 50% von der Eingangskonzentration erreicht hat, also bei C_e/C_i = 0,5.

(2) Unterschreiten der Rückhaltewirkungsgrade nach Schmitt et al. (2010)

Schmitt et al. (2010) definiert bei der Einleitung von Straßenabwässern von Verkehrsflächen ins Grundwasser Rückhaltewirkungsgrade für Kupfer und Zink. Diese Werte ergeben sich aus der Relation des mittleren Aufkommens und den Geringfügigkeitsschwellenwerten aus dem Entwurf der Grundwasserverordnung Deutschlands. Die Wirkungsgrade für Kupfer und Zink wurden demnach wie folgt festgelegt (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Definierte Rückhaltewirkungsgrade für Kupfer und Zink (Schmitt et al., 2010)

Parameter	Cu	Zn
Rückhaltewirkungsgrad (%)	80	70

Auch *DIBt* (2011) definiert Mindest-Rückhaltewerte für Zink und Kupfer im selben Prozentbereich.

Die Filtererschöpfung gilt als gegeben, wenn diese Rückhaltwirkungsgrade unterschritten werden.

Durch diese Ansätze wird die Filtererschöpfung in dieser Arbeit wie folgt festgelegt:

(3) Filtererschöpfung nach Schwellenwerten und Rückhaltevermögen

Der Grenzwert für die Filtererschöpfung (hier als Durchbruch bezeichnet) kann für Blei, Chrom und Nickel durch den Schwellenwert aus der QZV Chemie GW definiert werden (Punkt 3.5.1). Dabei ergibt sich der Durchbruchpunkt, indem die Konzentration lt. Schwellenwert durch die Zulaufkonzentration dividiert wird (Formel 4-2).

$$\left(\frac{C_e}{C_i}\right)_D = \frac{C_{QZV}}{C_i} \qquad (4\text{-}2)$$

C_i … Konzentration im Zulauf (µg/l)

C_e… Ablaufkonzentration (µg/l)

C_{QZV} … Schwellenwert QZV Chemie GW (µg/l)

$(C_e/C_i)_D$ … Durchbruch

Wird nun die Eingangskonzentration durch die Ablaufkonzentrationen dividiert, ergibt sich ein Wert, der kleiner als der soeben errechnete Wert für den Durchbruch sein sollte (Formel 4-3). Ist dies der Fall, hat der Filter den Durchbruchspunkt noch nicht erreicht.

$$C_e/C_i < (C_e/C_i)_D \quad (4\text{-}3)$$

In Tabelle 4-2 sind für Blei, Chrom und Nickel Beispielswerte für den Durchbruchspunkt aufgelistet. Als Eingangskonzentrationen werden dieselben Konzentrationen angegeben, die in den Modelllösungen bei den Versuchen verwendet wurden (Punkt 4.3.7)

Tabelle 4-2: Durchbruchswerte für Blei, Chrom und Nickel

Parameter	Pb	Cr	Ni
Eingangswert C_i (µg/l)	100	50	50
Schwellenwert C_{QZV} (µg/l)	9	45	18
Durchbruchswert $(C_i/C_e)_D$	0,09	0,9	0,36

Für die Parameter Kupfer und Zink wird nicht auf die Qualitätszielverordnung eingegangen, stattdessen werden Rückhaltewirkungsgrade festgelegt.

In dieser Arbeit werden die Rückhaltewirkungsgrade (bzw. Entfernungsraten), angelehnt an die Vorgaben der ÖNORM B2506-2 von Punkt 4.1.2 und von der Ad-hoc-Gruppe abgeändert, wie in Tabelle 4-3 festgelegt.

Tabelle 4-3: Definierte Rückhaltewirkungsgrade für Kupfer und Zink für Prüfmethode

Parameter	Cu	Zn
Rückhaltewirkungsgrad (%)	80	50

4.2 Versuchsart

Zur Prüfung der Kapazität wurden Versuche an Säulen durchgeführt. Zusätzlich wurden Batchversuche zur Beschreibung der Sorptionskapazität arrangiert, welche als Vergleich zu den Ergebnissen der Säulenversuche zu sehen sind.

4.3 Säulenversuche

Es wurden sowohl Versuche mit **Schwermetall**lösungen zur Prüfung des Schwermetallrückhaltes, als auch solche zur Prüfung des Mineralölkohlenwasserstoffrückhaltes anhand von **Toluol** durchgeführt.

Bei Säulenversuchen können die Säulen als kleine Filterelemente betrachtet werden. Die Vorteile der Versuchsdurchführung im Labor ist die geringe Produktion an mit Schwermetallen belasteten Wassers, die Unabhängigkeit von örtlichen Randbedingungen und die gute Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen, wodurch sich die Versuche untereinander besser vergleichen lassen. Als nachteilig erweist sich, dass sich sowohl die Sorptions- und Ionenaustauscheigenschaften, als auch die Strömungsrandeffekte anders als in der Realität verhalten, zusammenfassend, eine gewisse Entfernung von der Realität mit sich bringen (Schmitt et al., 2010).

4.3.1 Materialien

Zur Kapazitätsprüfung wurden Materialien verwendet, die im Zuge des Projektes „Methodenentwicklung für die Prüfung von Filtersubstraten“ des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz bereits bei Versuchen an Säulen mit größerem Durchmesser erprobt wurden. Dadurch sind k_f-Wert (Durchlässigkeitsbeiwert des Materials), Korndurchmesser und Zusammensetzung bereits bekannt.

Eingesetzt wurden:

- **Quarzsand (S)**, welcher als Vergleichsmaterial (herkömmlichen Sandfilter) dienen sollte.
- **Sandiges Bodenfiltermaterial** einer bestehenden Gewässerschutzanlage **(BA)**, um die Kapazität von Boden als Filtermaterial zu prüfen. Der Boden wurde der bestehenden Gewässerschutzanlage GSA-A2 vom Institut für Siedlungswasserbau entnommen.
- **Technische Filtermaterialien (TF)**:

Die technischen Filtermaterialien dienen dazu, gewisse Eigenschaften von natürlichen Komponenten so zu vereinen, dass die Rückhaltewirkung optimiert wird. Es handelt sich um Gemische aus anorganischen Geomineralien (z.B. zeolithische Mineralien) bzw. organischen Bestandteilen (z.B. Kokosfasern). Die exakte Zusammensetzung bleibt aus Gründen des Produktschutzes in dieser Arbeit unerwähnt.

Je nach Zusammensetzung werden die Materialien unterschiedlich bezeichnet. Dabei bestehen die Materialien der Reihe TFI hauptsächlich aus anorganischen Geomineralien und die Materialien der Reihe TFII großteils aus natürlichen Bestandteilen des Bodens.

Das technische Filtermaterial **TFIc** setzt sich aus einer feinkörnigeren, mineralischen Zeolith-Mischung und einer grobkörnigeren, mineralischen Schicht zusammen. Die Verteilung der Schichten erfolgt im Verhältnis 1:1. Zusätze für erhöhte Pufferkapazität waren teilweise enthalten.

Das technische Filtermaterial **TFIb** besteht aus gleicher Zusammensetzung wie TFIc, nur mit Zusätzen zur Erhöhung der Adsorptionskapazität.

Das technische Filtermaterial **TFIIb** setzt sich aus einer Mischung von mineralischen Zeolithen, Kokosfasern, Kies, Sand und organischem Material zusammen. Es handelt sich hierbei um eher feinkörnigere Materialien.

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Materialien lassen sich aus folgender Tabelle 4-4 entnehmen.

Tabelle 4-4: Eingesetzte Materialien und deren physikalisch-chemische Eigenschaften

Filtermaterial	k_f-Wert (m/s)	pH (-)	Korn-Ø Min (mm)	Korn-Ø Max (mm)	Karbonatgehalt (als $CaCO_3$) (%)	U (d_{60}/d_{10})
Quarzsand S	$3,15*10^{-3}$	7,1	0,71	1,25	-	
Technisches Filtermaterial TFIb	$1,6*10^{-3}$	8,9	0,50	5,6	40,5	2,3
Technisches Filtermaterial TFIc	$1,6*10^{-3}$	8,9	0,50	5,6	16,8	2,3
Technisches Filtermaterial TFIIb	$1,19*10^{-3}$	8,1	0,063	2,50	24,8	6,7
Bodenmaterial BA	$4,7*10^{-4}$	8,4	0,063	11,20	15,9	14,3

Der k_f-Wert wurde im Zuge von Infiltrationsversuchen des Projektes „Methodenentwicklung für die Prüfung von Filtersubstraten“ des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz ermittelt.

Die Ungleichförmigkeitszahl (U) wurde durch Trockensiebung (Siebe der Größen 0,063-11,2 mm) bestimmt.

In Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 sind die Prüfsäulen mit den entsprechenden Materialien dargestellt.

Abbildung 4-1: Prüfsäulen mit d = 13,4/22 mm (eigene Abbildung)

Abbildung 4-2: Prüfsäulen mit d = 32 mm (eigene Abbildung)

In Abbildung 4-1 sind entsprechende Versuchssäulen mit den unterschiedlichen Materialien zu sehen. Von links nach rechts zu sehen ist S, TFIIb, BA (d = 22 mm), S, TFIc, TFIc. Außer bei BA beträgt der Säulendurchmesser 13,4 mm.

In Abbildung 4-2 von links nach rechts zu sehen ist TFIb, BA, TFIc, TFIIb, BA (d = 22 mm), S (d = 13,4 mm). Bis auf die letzten zwei Säulen entspricht der Säulendurchmesser 32 mm.

4.3.2 Säulendurchmesser

Die Anforderung ist hierbei, so wenig Material wie möglich, in Bezug auf das Filtermaterial, das Beschickungswasser usw., zu verwenden.

Ein Mindest-Größenverhältnis von Korndurchmesser zu Säulendurchmesser lautet 1:10, um Randeffekte minimal zu halten (Hilliges, 2007). Das heißt, bei einem Größtkorn von 2 mm, sollte der Durchmesser der Säule mindestens 20 mm betragen. Die Korndurchmesser der Materialen, die zur Prüfung verwendet wurden, sind in Tabelle 4-4 zu finden. Es wären also Säulendurchmesser im Bereich von mindestens 12,5 mm bis 112 mm (bezogen auf Größtkorn) erforderlich. Um den Materialverbrauch möglichst gering zu, wurden anfangs Glassäulen mit einem Innendurchmesser von **13,4 mm** und **22 mm** bestellt (Normgrößen des Glasbläsers) (Abbildung 4-1). Dies entspricht zwar nicht ganz dem optimalen Verhältnis, da aber in der Literatur ebenfalls Versuche mit z.B. einem Verhältnis von 1:5 durchgeführt wurden (Schmitt et al., 2010) und plausible Ergebnisse lieferten, wurde vorerst ein geringerer Durchmesser gewählt.

Im Laufe der Versuchsreihen fiel aufgrund der Ergebnisse die Entscheidung für eine Erhöhung des Innendurchmessers auf **32 mm** (Abbildung 4-2).

4.3.3 Filterschichthöhe

Das Mindestverhältnis von Säulendurchmesser zu Filterschichthöhe beträgt ebenfalls 1:10 (Hilliges, 2007). Die Filterschichthöhe der Säulen sollte außerdem jener der Anlage entsprechen, um möglichst an reale Bedingungen anzuknüpfen (Schmitt et al., 2010). Als Bezugsanlage wird in dieser Arbeit die Gewässerschutzanlage GSA-A2 herangezogen, die mit einer Filterschichthöhe von **30 cm** arbeitet (Abbildung 4-1). Die ersten Versuchsreihen wurden bei dieser Filterschichthöhe durchgeführt, bei den Säulen mit Durchmesser 32 mm wurde auf eine Höhe von h = **20 cm** verringert (Abbildung 4-2). Hiermit soll die Versuchszeit, die durch das größere Bettvolumen (das Bettvolumen bei d =13,4 mm und h = 30 cm beträgt in etwa 42 cm^3, bei d = 32 mm und h = 20 cm ca. 160 cm^3) deutlich erhöht werden würde, reduziert werden, da der Versuch mit möglichst geringem Zeitaufwand verbunden sein soll (siehe Punkt 2).

4.3.4 Beschickungsart

Die Beschickung der Säulen erfolgte in fast allen Versuchsreihen von **unten nach oben**, um die Durchflussrate regulieren zu können. Bei der vorletzten Versuchsreihe erfolgte die Beschickung von **oben nach unten**, um die Prüfung wiederum möglichst realitätsnah zu gestalten, da sich hierbei der Durchfluss entsprechend dem k_f-Wert einstellt. Bei den Toluolversuchen wurde die Beschickung von oben nach unten eingestellt.

4.3.5 Säulenaufbau

In Abbildung 4-3 ist der Aufbau einer Säule schematisch dargestellt.

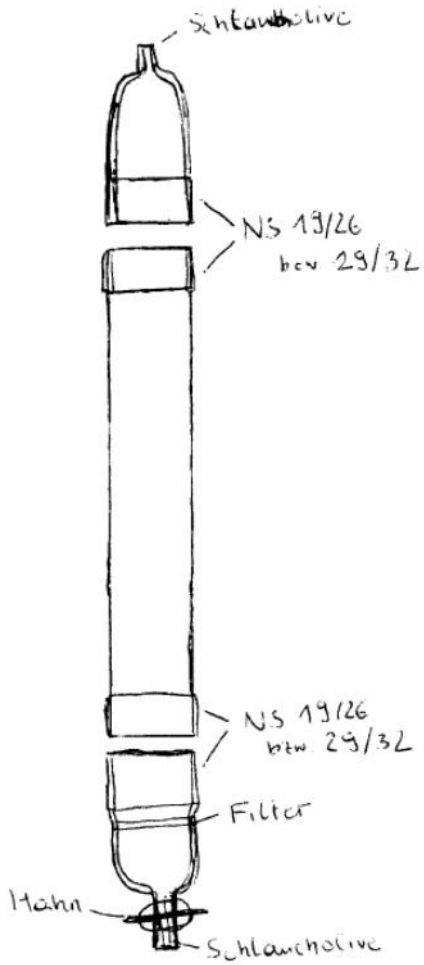


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Säule

Jede Glassäule bestand aus drei Teilen. Der unterste Teil mit der Schlaucholive diente zur Verteilung des Zulaufs (bei Beschickung von unten nach oben), hatte eine Länge von 10 cm bzw. 3 cm und wurde mit Glasperlen (Durchmesser 4 mm) oder Glasringen (Größe 5x5 mm) befüllt. Der nächste Teil, welcher vom unteren durch eine Filterfritte (nicht aktives Trenngewebe) getrennt wurde, repräsentierte die eigentliche Filtersäule, welche mit 30 cm bzw. 20 cm Filtersubstrat angefüllt wurde. Dieser Teil wurde in den unteren verankert und durch eine Klemme fixiert. Anschließend wurde der verbleibende, nicht mit Filtermaterial befüllte, Überstand ebenfalls mit Glasperlen befüllt, um dem Auftrieb des gesättigten Filtermaterials entgegenzuwirken. Der dritte Teil, ebenfalls mit Schlaucholive (die Höhe betrug ebenfalls 10 cm bzw. 3 cm), wurde aufgesetzt, diente zur Ableitung des Filtrates und wurde ebenso durch eine Klemme fixiert. Bei der Beschickung von oben nach unten wurden die Säulen analog zusammengebaut, jedoch erfolgte der Zulauf von oben und der unterste Teil der Säule diente als Ablauf. Um zu gewährleisten, dass die Säulen auch in Versuchspausen gegebenenfalls nicht trocken fallen konnten, befand sich am untersten Teil der Säule ein Regulierungshahn aus Glas oder Teflon. Die Bezeichnung NS bedeutet Normschliff (nach DIN) und meint die Verbindung der Glaselemente. Die erste Zahl gibt dabei den oberen Durchmesser in Millimetern an und die zweite jeweils die Länge in Millimetern.

4.3.6 Säuleneinbau

Vor der Befüllung der Säulen wurde das jeweilige Material gut durchmischt, um die vom Hersteller erforderliche Korngrößenverteilung zu erreichen. Es wurde portionsweise und möglichst vorsichtig, sowie lufttrocken in die senkrecht gehaltenen Säulen eingebracht und nicht zusätzlich verdichtet.

Vor und nach der Befüllung der Säulen wurde das Substrat gewogen, um die Masse des eingebauten Filtermaterials zu ermitteln.

Jede Säule wurde auf einem Versuchsstand, welcher sich im Technikum des Instituts für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz befand, montiert (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Weitere, für den Versuch verwendete Materialien, finden sich in Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5.

Abbildung 4-4: Vorlagebehälter zur Aufbereitung des Beschickungswassers und Zuleitung zu den Versuchssäulen, Fassungsvermögen 100 l (eigene Abbildung)

In Abbildung 4-4 ist der für den Zulauf für die **Schwermetallversuche** verwendete Vorlagebehälter aus Glas mit 100 bzw. 160 l Fassungsvermögen zu sehen.

Abbildung 4-5: Drehzahlgeregelte Schlauchquetschpumpe (eigene Abbildung)

Abbildung 4-5 zeigt eine drehzahlgeregelte Schlauchquetschpumpe der Firma Ismatec, ISM 444, die das Beschickungswasser über Kunststoffschläuche durch die einzelnen Säulen pumpte. Dabei konnte zwar nur eine Drehzahl eingestellt werden, es war aber möglich, gleichzeitig mehrere Zulaufschläuche anzuschließen.

Um unterschiedliche Flussraten einstellen zu können, wurden Schläuche mit unterschiedlichen Innendurchmessern verwendet.

Nach Einbau der Säulen wurden diese mit RO-Wasser (reines Wasser, hergestellt mittels Reversosmose-Verfahren) von unten nach oben gesättigt, um Porenluft aus dem Filter entweichen zu lassen, und anschließend gesättigt. Erst danach wurde mit der Beschickung der Modelllösung begonnen. Nach jeder Versuchsreihe wurden die Säulen entleert, gespült und neu befüllt.

Für die **Toluolversuche** wurden bei einigen Versuchen die bereits mit Schwermetallen belasteten Säulen verwendet, da nur auf den Toluolrückhalt geprüft wurde und dabei die Schwermetallbelastung keinerlei Auswirkung auf das Ergebnis hatte.

Der Zulauf erfolgte teils aus einem Glasbehälter mit einem Fassungsvermögen von 11,2 l, teils aus einem Plastikbehälter mit Fassungsvermögen ca. 10 l. Dabei war es wichtig, dass das Behältnis möglichst gegen die Luft abgedichtet sein musste, um einem möglichen Verdampfen des Toluols entgegen zu wirken.

Der restliche Versuchsaufbau erfolgte analog zu den Schwermetallversuchen.

Der Ablauf der Säulen wurde in einem Sammelbehälter (100 l) aufgefangen.

4.3.7 Zulaufkonzentrationen

Für den Zulauf für die **Schwermetallversuche** wurde im Labor eine Modelllösung angesetzt. Je nach Versuch wurden unterschiedliche Konzentrationen an Schwermetallen eingesetzt, welche sich an realen Konzentrationen im Straßenabwasser orientierten. In der Modelllösung wurden die Schwermetalle Blei, Kupfer, Zink, Chrom und Nickel eingesetzt, da diese als relevante

Prüfparameter betrachtet werden (Punkt 3.3). In folgender Tabelle 4-5 sind die unterschiedlichen Lösungen zu den Versuchen aufgelistet.

Tabelle 4-5: Konzentrationen der Schwermetalllösung

Lösungsbezeichnung	**Konzentrationen in (µg/l)**				
	Pb	**Cu**	**Zn**	**Cr**	**Ni**
Lösung 1 (L1)	100	100	100	50	50
Lösung 2 (L2)*	500	500	500	100	100
Lösung 3 (L3)	50	100	400	-	-
Lösung 4 (L4)	50	100	400	50	50

* Die Ergebnisse der Versuche mit Lösung L2 wurden in der Auswertung bzw. Interpretation aufgrund der hohen Ablaufkonzentrationen (welche nicht im Bereich der im Straßenabwasser vorkommenden Werte liegen und daher nicht vergleichbar sind) nicht berücksichtigt.

Die erste Lösung (L1) wurde aufgrund von Aufkommenswerten aus der Literatur (Punkt 3.6) angesetzt. Die Konzentrationen wurden deshalb auf die von Lösung L2 erhöht, um zu überprüfen, ob die Ablaufkonzentrationen auf solch eine Änderung reagieren, d.h. ob der Versuch richtig funktioniert. Die Einschränkung von L3 auf 3 Prüfparameter erfolgte auf Wunsch der Ad-hoc-Gruppe, sowie die jeweiligen Konzentrationsänderungen (Anpassung an aktuelle Aufkommensdaten), wie auch in L4. Nähere Erläuterungen finden sich etwas später, unter Punkt 4.3.12.

Zur **Prüfung mit Toluol** wurde eine Lösung, bestehend aus RO-Wasser und Toluol, hergestellt. Die Toluolkonzentration wurde auf 25 mg/l eingestellt.

4.3.8 Durchflussraten

In allen **Schwermetallversuchen** wurde mit unterschiedlichen Durchflussraten gearbeitet, um zu untersuchen, ob eine mögliche Abhängigkeit der Kapazität des Filtermaterials von der Durchflussrate vorliegt. Da jedes Filtermaterial einen anderen k_f-Wert aufwies, wurden die Säulen mit einem Vielfachen des Durchflusses, entsprechend dem k_f-Wert, betrieben. Zur ersten Orientierung dienen Tabelle 4-6, Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8.

Tabelle 4-6: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 13,4 mm)

Material	**Q entsprechend k_f-Wert (ml/min)**
S	26,7
TFIc	10,1
TFIIb	10,0

Tabelle 4-7: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 22 mm)

Material	Q entsprechend k_f-Wert (ml/min)
BA	9,5

Tabelle 4-8: Durchflussraten entsprechend dem k_f-Wert nach Material (für d = 32 mm)

Material	Q entsprechend k_f-Wert (ml/min)
BA	20,0
S	152,0
TFIb	57,9
TFIIb	57,4
TFIc	56,9

In Tabelle 4-6 bis Tabelle 4-8 sind die unterschiedlichen Filtermaterialien, je nach Säulendurchmesser, mitsamt dem Durchfluss entsprechend dem k_f-Wert aufgelistet. Das heißt, bei einer Durchströmung von oben nach unten, würden sich die angeführten Flussraten einstellen.

In den Tabellen wurden nur jene Materialien angeführt, die beim jeweiligen Durchmesser in der Versuchsdurchführung eingesetzt wurden.

Die Einstellung der optimalen Durchflussraten erwies sich als schwierig, da die Pumpe nur mit einer Drehzahl betrieben werden konnte und nur zwei Schläuche mit unterschiedlichem Innendurchmesser zur Verfügung standen. Daher ergaben sich bei den tatsächlichen Durchflussraten entsprechende Abweichungen von den optimalen Werten. Außerdem kam es oft zu unerwarteten Veränderungen der Flussraten, bedingt durch Versuchsdauer, Probleme mit Luftblasen in Schläuchen, Undichtwerden der Schläuche und Kolmationen.

Bei den **Toluoltests** wurde die Flussrate so eingestellt, dass diese möglichst dem Durchfluss entsprechend dem k_f-Wert entsprach.

4.3.9 Beschickungsmenge

Die Beschickungsmenge für die **Schwermetallprüfung** richtete sich nach der jeweiligen Fragestellung. Einerseits musste die Beschickungsmenge mindestens der 4-Jahres-Niederschlagsmenge entsprechen, da dies die minimal erforderliche Filterstandzeit repräsentiert (Punkt 4.1.1), andererseits wurden die Versuche solange durchgeführt, bis das Kriterium des Filteraustausches erreicht wurde. In dieser Arbeit wurde als Austauschkriterium der Schwellenwert der Qualitätszielverordnung Grundwasser Chemie für Blei herangezogen, dieser beträgt 9 µg/l (BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010). Gegebenfalls wurde solang erprobt, bis das Material 95% der Spurenstoffe nicht mehr aufnehmen konnte.

Für den **Mineralölrückhalt** wurden die Versuche solange durchgeführt, bis die 4-Jahres-Niederschlagsmenge erreicht bzw. überschritten wurde.

Die 4-Jahres-Niederschlagsmenge, welche sowohl vom Säulendurchmesser, als auch vom Flächenverhältnis abhängt, ist in Tabelle 4-9 ersichtlich. Zur Ermittlung der angegeben Werte wird auf Punkt 4.1.1 verwiesen.

Tabelle 4-9: Niederschlagsmengen pro Säule und Jahr nach Flächenverhältnis und Säulendurchmesser

d (mm)	A_v	Q_J (1 Jahr) (l)	Q_J (2 Jahre) (l)	Q_J (3 Jahre) (l)	Q_J (4 Jahre) (l)
13,4	1:15	1,48	2,96	4,44	5,92
	1:100	9,87	19,74	26,62	39,49
	1:200	19,74	39,49	59,23	78,97
22	1:15	3,99	7,98	11,97	15,97
	1:100	26,61	53,22	79,83	106,44
	1:200	53,22	106,44	159,66	212,87
32	1:15	8,44	16,89	25,33	33,78
	1:100	56,30	112,59	168,89	225,19
	1:200	112,59	225,19	337,78	450,38

In Tabelle 4-9 sind nun pro Säulendurchmesser die Jahresniederschläge aufgelistet. Dabei handelt es sich lediglich um die Menge des anfallenden Niederschlages pro Jahr. Die anfallenden Frachten an Schwermetallen sind von Schwermetall zu Schwermetall unterschiedlich, als auch von der jeweilig gewählten Eingangskonzentration abhängig. In Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-12 sind die Jahresfrachten für die einzelnen Schwermetalle je nach Eingangskonzentration aufgelistet.

Tabelle 4-10: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L1

Jahresfrachten für Eingangskonzentrationen 50 µg/l Pb,Cr,Ni und 100 µg/l Cu, Zn (L1)						
d (mm)	**A_v**	**SM-JF Pb (mg)**	**SM-JF Cr (mg)**	**SM-JF Cu (mg)**	**SM-JF Ni (mg)**	**SM-JF Zn (mg)**
13,4	1:15	1,48	0,74	1,48	0,74	1,48
	1:100	9,87	4,94	9,87	4,94	9,87
	1:200	19,74	9,87	19,74	9,87	19,74
22	1:15	3,99	2,00	3,99	2,00	3,99
	1:100	26,61	13,31	26,61	13,31	26,61
	1:200	53,22	26,61	53,22	26,61	53,22
32	1:15	8,45	4,22	8,45	4,22	8,45
	1:100	56,30	28,15	56,30	28,15	56,30
	1:200	112,60	56,30	112,60	56,30	112,60

Tabelle 4-11: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L2

Jahresfrachten für Eingangskonzentrationen 100 µg/l Pb,Cr,Ni und 500 µg/l Cu, Zn (L2)						
d (mm)	**A_v**	**SM-JF Pb (mg)**	**SM-JF Cr (mg)**	**SM-JF Cu (mg)**	**SM-JF Ni (mg)**	**SM-JF Zn (mg)**
13,4	1:15	740	148	740	148	740
	1:100	4936	987	4936	987	4936
	1:200	9872	1974	9872	1974	9872
22	1:15	1996	399	1996	399	1996
	1:100	13305	2661	13305	2661	13305
	1:200	26609	5322	26609	5322	26609
32	1:15	4222	845	4222	845	4222
	1:100	28149	5630	28149	5630	28149
	1:200	56297	11260	56297	11260	56297

Tabelle 4-12: Schwermetall-Jahresfrachten nach Säulendurchmesser und Flächenverhältnis, Lösung L3

Jahresfrachten für Eingangskonzentrationen 50 µg/l Pb,Cr,Ni 100 µg/l Cu 500 µg/l Zn (L3)						
d (mm)	**A_v**	**SM-JF Pb (mg)**	**SM-JF Cr (mg)**	**SM-JF Cu (mg)**	**SM-JF Ni (mg)**	**SM-JF Zn (mg)**
13,4	1:15	74,0	74,0	148	74,0	592
	1:100	494	494	987	494	3949
	1:200	897	897	1974	897	7898
22	1:15	200	200	399	200	1597
	1:100	1331	1331	2661	1331	10644
	1:200	2661	2661	5322	2661	21287
32	1:15	422	422	845	422	3378
	1:100	2815	2815	5630	2815	22519
	1:200	5630	5630	11260	5630	45038

Die Werte in Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-12 wurden nach Formel 5-6 (siehe Punkt 5.1.1) berechnet. Zu sehen ist der Frachtmengenunterschied der verschiedenen Schwermetalle. Eine Betrachtung der Jahresniederschläge zur Festlegung der 4-Jahresfracht für die Kapazitätsprüfung wird vorerst vorgezogen, da das Durchlaufen der Jahresniederschlagsmenge auch leichter zu überprüfen ist als die Schwermetallfracht jedes Schwermetalls.

4.3.10 Versuchsvorbereitung

1) Prüfung auf Schwermetallrückhalt

Vor jeder Versuchsreihe wurden die Säulen gründlich ausgewaschen und mit HNO_3 (Salpetersäure) gespült, um mögliche Verunreinigungen der vorhergehenden Versuche zu verhindern. Nach der Befüllung und Montage am Versuchsstand wurden die Säulen gesättigt. Anschließend wurde der Durchfluss durch Regulierung der Drehzahl entsprechend eingestellt.

Für den Zulauf wurde der Vorlagebehälter vorerst mit RO-Wasser befüllt und anschließend die Modelllösung mit den entsprechenden Chemikalien hinzugegeben. Die Einstellung des pH-Wertes erfolgt auf 5,8 (±0,2), um das Vorliegen der Schwermetallionen in gelöster Form zu gewährleisten (Punkt 3.4). Zum Erreichen dieses Wertes wurden jeweils ein paar Tropfen HNO_3 zur Senkung, und NaOH (Natronlauge) zur Hebung des pH-Wertes in den Behälter getropft. Zur Kontrolle des pH-Wertes wurde eine pH-Sonde verwendet. Außerdem wurde der pH-Wert auch im Ablauf regelmäßig kontrolliert.

Zur Vorbereitung der Probeflaschen wurden diese mit HNO_3 und anschließend erneut mit RO-Wasser gespült. Es handelte sich hierbei entweder um 100 ml Steilbrustflaschen (Weithals) aus Klarglas mit PEHD-Stopfen oder um 100 ml Steilbrustflaschen (Enghals) aus Braunglas mit Schraubverschluss.

2) Prüfung auf Mineralölrückhalt

Wie bereits oben erwähnt, wurden sowohl vorbelastete, wie auch neu befüllte Säulen für den Versuch verwendet. Zur Einstellung der Flussrate wurden die Säulen mit RO-Wasser gespült.

Das Gemisch aus Toluol und RO-Wasser wurde im Labor des Institutes für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz entsprechend aufbereitet und aufbewahrt.

Da sich die Methode und die eingesetzten Behältnisse während der Versuchsphase mehrmals geändert haben, wird für die nähere Versuchsbeschreibung auf den Punkt 4.3.12 unter 2) verwiesen.

4.3.11 Versuchsverlauf und Probenahme

1) Prüfung auf Schwermetallrückhalt

Nach pH-Wert Einstellung wurden die Zulaufschläuche der Pumpe in den Vorlagebehälter gelegt und der Versuch wurde gestartet.

Geprüft wurde die Schwermetallkonzentration nach Durchlauf der Filtersäule. Dazu wurde aus dem direkten **Ablauf** der Säule **alle 2 bis 3 Stunden** eine Probe entnommen. Zusätzlich wurden gezielt Proben gezogen, sobald das 1/2/3/4-Jahresniederschlagsvolumen die Säule passiert hatte (Toleranzbereich ± 20%).

Zulaufproben wurden **nach jeder Behälterfüllung** genommen.

Bei jeder Probenahme wurde die Probeflasche vorerst mit ca. 5 ml befüllt, verschlossen, geschüttelt und entleert. Erst dann wurde die Flasche mit ca. 50 ml Probe befüllt. Bei den Zulaufproben belief sich die Probemenge auf jeweils ca. 100 ml.

Die Proben wurden zur Stabilisierung innerhalb von 24 Stunden mit HNO_3 versetzt und in einem Kühlraum im Labor bis zur Analyse gelagert.

Die Beschickung erfolgte kontinuierlich und wurde nur über das Wochenende und Feiertage und bei besonderen Vorkommnissen unterbrochen, wie die Auffüllung des Vorlagebehälters, ein gegebenenfalls erforderlicher Wechsel der Pumpenschläuche, die neuerliche Einstellung des Durchflusses usw. Im Probenahmeprotokoll (siehe Anhang, Punkt 8.3) sind diese Unterbrechungen ersichtlich.

Die gesamte Versuchsanlage wurde regelmäßig kontrolliert und Auffälligkeiten protokolliert. Probleme gab es vor allem mit der Pumpe bzw. den Pumpenschläuchen, da diese des Öfteren beschädigt wurden. Dadurch kam es zur ungewollten Luftblasenbildung sowie zur Verringerung des Durchflusses. Bei Erkennung der Schäden wurde der Pumpenschlauch sobald wie möglich ausgewechselt.

Die gesammelten Proben wurden vom Labor des Institutes für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz in regelmäßigen Abständen analysiert. Nach Erhalt der Ergebnisse konnte entschieden werden, ob eine Fortführung der Versuchsreihe als sinnvoll erscheint. Dies war dann der Fall, wenn das Prüfkriterium für Blei noch nicht erreicht bzw. überschritten war oder das Material noch mehr als 5% der Schwermetalle aufnehmen konnte.

Da aus Kosten- und Zeitgründen nicht alle Proben analysiert werden konnten, gab es eine Einigung, jeweils die **erste und letzte Probe eines jeden Tages, sowie besondere Proben** (z.B. Probe nach Durchlaufen des 4-Jahres-Niederschlagsvolumens) untersuchen zu lassen. Welche Proben jeweils analysiert wurden, kann im Anhang entnommen werden (siehe Anhang, Punkt 8.3).

Die gesamte Versuchsdurchführung erfolgte im Zeitraum zwischen 23.01.2013 und 08.08.2013.

2) Prüfung auf Mineralölrückhalt

Die Versuche konnten pro Säule innerhalb eines Tages durchgeführt werden, wodurch es zu keinerlei Unterbrechungen während der Versuchsdurchführung kam. Teilweise wurden auch zwei Säulen parallel betreiben. Die Beschickung erfolgte kontinuierlich.

Erprobt wurde sowohl der Zulauf als auch der Ablauf der Säulen, um feststellen zu können, ob bereits im Zulauf ein Teil des Toluoles verdampft war. Die Proben wurden in regelmäßigen Zeitabständen in unterschiedliche Probeflaschen abgefüllt (siehe dazu Punkt 4.3.12 unter 2)). Dabei wurden pro Versuch innerhalb von 4-5 h ca. 14 Probenflaschen (jeweils 7 für Zu- und Ablauf) befüllt.

Der Versuch galt dann als abgeschlossen, sobald die 4-Jahres-Niederschlagsmenge die Säulen passiert hatte. Dabei wurde die Menge für ein Flächenverhältnis von 1:15 verwendet.

Anschließend wurden die Probeflaschen so gut wie möglich verschlossen und direkt zur Analyse ins Labor gebracht.

Die Durchführung der Toluolversuche fand im Mai, sowie Anfang Juni statt.

4.3.12 Versuchsreihen

Im Folgenden wird jede einzelne Versuchsreihe genauer beschrieben. Weitere Angaben befinden sich im Anhang.

1) Versuchsreihen zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes

Versuchsreihe 1 und 2

Durchführung: 23.01.2013 – 01.02.2013

Versuchsreihe 1 und 2 wurden deshalb zusammengefasst, da zwar mit **unterschiedlichen Zulaufkonzentrationen** gearbeitet wurde, jedoch dieselben Säulen mit demselben Material verwendet wurden. Anfangs wurde mit einer etwas höheren Flussrate von 18-20 ml/min gearbeitet, welche am Ende der Versuchsreihe (nach ca. 4000 Bettvolumina bzw. 180 l Lösung pro Säule) auf 9 ml/min reduziert wurde. Ebenso wurden gegen Ende der Versuchsreihe (nach ca. 4500 Bettvolumina bzw. 200 l pro Säule) die Zulaufkonzentrationen erhöht, um zu testen, ob die Ablaufkonzentrationen auf die Erhöhung reagieren, d.h. ob der Versuch richtig funktioniert.

Der Versuch an der Säule, welche mit BA befüllt war, musste bereits am folgenden Tag nach dem Start unerwartet abgebrochen werden, da es zu große Kolmationen gab und die Flussrate nahezu gegen null ging.

Probleme gab es kaum, nur anfangs mit der Pumpe, welche neu kalibriert werden musste. Die Durchflussrate hat sich über die Zeit relativ konstant gehalten.

Die **Beschickung** erfolgte von **unten nach oben**.

In Tabelle 4-13 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-13: Eigenschaften Versuchsreihe 1+2 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
S	13,4	30	22.01.2013	67
TFIc	13,4	30	23.02.2013	30
TFIIb	13,4	30	24.01.2013	28
BA	22	30	24.01.2013	188

Tabelle 4-14 zeigt Durchflussrate (Q), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-14: Eigenschaften Versuchsreihe 1+2 (2)

Material	Q (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
S	9 – 20	0,3 – 0,8	L1/L2*	217	5121	214
TFIc	9 – 20	0,9 – 2,0	L1/L2*	209	4944	214
TFIIb	9 – 19	0,9 – 1,9	L1/L2*	186	4390	191
BA	-	-	L1	-	-	17

* Die Ergebnisse der Versuche mit Lösung L2 wurden in der Auswertung bzw. Interpretation aufgrund der hohen Ablaufkonzentrationen (welche nicht im Bereich der im Straßenabwasser vorkommenden Werte liegen und daher nicht vergleichbar sind) nicht berücksichtigt.

Versuchsreihe 3

Durchführung: 07.02.2013 – 13.02.2013

Die gesamte Versuchsreihe wurde bei einem Durchfluss von 4,8 ml/min durchgeführt, nur kurzzeitig (einige Stunden) wurde die Flussrate auf ca. 11 ml/min erhöht. Es gab keine besonderen Vorkommnisse und Probleme.

Die **Beschickung** erfolgte von **unten nach oben**.

In Tabelle 4-15 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-15: Eigenschaften Versuchsreihe 3 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
S	13,4	30	06.02.2013	70
TFIc	13,4	30	06.02.2013	30
TFIIb	13,4	30	06.02.2013	30

Tabelle 4-16 zeigt Durchflussrate (Q), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-16: Eigenschaften Versuchsreihe 3 (2)

Material	Q (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
S	4,8 – 10,8	0,2 – 0,4	L1	36	849	95
TFIc	4,8 – 10	0,5 – 1,0	L1	35	822	95
TFIIb	4,8 – 11	0,5 – 1,1	L1	36	856	95

Versuchsreihe 4

Durchführung: 20.02.2013 – 01.03.2013

Anfangs wurde nur mit S, TFIc und TFIIb gearbeitet, später wurde auch eine Säule mit BA gefüllt und in Betrieb genommen. Die Versuche wurden aufgrund von Abwesenheit nicht vom Autor betreut.

Es gab keine besonderen Vorkommnisse und Probleme.

Die **Beschickung** erfolgte von **unten nach oben**.

In Tabelle 4-17 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-17: Eigenschaften Versuchsreihe 4 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
S	13,4	30	18.02.2013	67
TFIc	13,4	30	18.02.2013	29
TFIIb	13,4	30	19.02.2013	29
BA	22	30	25.02.2013	292

Tabelle 4-18 zeigt Durchflussrate (Q), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-18: Eigenschaften Versuchsreihe 4 (2)

Material	Q (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
S	22	0,8	L1	67	1576	51
TFIc	6 – 7	0,7	L1	33	779	80
TFIIb	6 – 7	0,7	L1	33	779	80
BA	6	0,7	L1	30	262	95

Versuchsreihe 5

Durchführung: 04.04.2013 – 03.05.2013

Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, je länger die Kontaktzeit, desto besser die Adsorption. Da bei den Säulen mit 13,4 mm Durchmesser dies nicht immer der Fall war und vermutlich mit Randeffekten zu rechnen war, wurde der **Säulendurchmesser auf 32 mm erhöht**.

Die **Zulauflösung** wurde auf die erforderlichen Prüfparameter, auf die Schwermetalle **Blei, Kupfer und Zink reduziert**.

Auch die jeweiligen Zulaufkonzentrationen wurden ein wenig verändert: Der Wert für **Blei** wurde **auf 50 µg/l erniedrigt**, da laut Ad-hoc-Gruppe dieser Wert zu hoch angesetzt wurde. Auch **Zink** wurde **auf eine Konzentration von 400 µg/l erhöht**, da dieser Wert zu niedrig angesetzt erschien, wenn mit den Aufkommenswerten aus Tabelle 3-7, Tabelle 3-9, sowie Tabelle 3-10 verglichen wird. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Werte für die Schwermetall-Jahresfrachten durch diese Konzentrationsänderung verändern.

Es wurde gezielt versucht, die Säulen mit einer **Flussrate entsprechend ½×k_f-Wert** zu betreiben. Es erwies sich jedoch als schwierig, für jedes Material den entsprechenden Durchfluss genau einzustellen, da nur eine Pumpe zur Verfügung stand. Aufgrund dieser Tatsache streuten die eingestellten Flussraten in einem gewissen Bereich um den optimalen Wert.

Die Sandsäule wurde etwas später eingebaut und betrieben und aus Mangel an vorhandenen Schwermetallpräparaten im Labor nach ca. 63 h vorzeitig abgedreht. Wegen des großen Zulaufmengenverbrauchs (Betrieb von 4 Säulen gleichzeitig) musste der Behälter zwischendurch öfters angefüllt werden, womit gewisse Konzentrationsunterschiede in der Zulauflösung nicht ausgeschlossen werden können.

Probleme gab es vorangehend mit den Zulaufschläuchen der Pumpe, da diese nach einiger Zeit im Betrieb beschädigt wurden und es zur ungewollten Luftblasenbildung kam. Außerdem hat sich die Durchflussrate zum Teil ebenso etwas verringert. Das Problem konnte nur durch ständige Überwachung und Austausch der defekten Schläuche möglichst vermieden werden.

Die **Beschickung** erfolgte von **unten nach oben**.

In Tabelle 4-19 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-19: Eigenschaften Versuchsreihe 5 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
S	32	20	08.04.2013	250
TFIc	32	20	03.04.2013	120
TFIIb	32	20	03.04.2013	147
BA	32	20	03.04.2013	292

Tabelle 4-20 zeigt Durchflussrate (Q), Durchflussrate gemittelt (Q gemittelt; aufgrund der unterschiedlichen Durchflussraten wurden diese arithmetisch gemittelt), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-20: Eigenschaften Versuchsreihe 5 (2)

Material	Q (ml/min)	Q gemittelt (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
S	55 – 76	61,9	0,4	L3	260	1617	63
TFIc	22 – 35	28,3	0,5	L3	660	4103	386
TFIIb	19 – 39,5	26,0	0,5	L3	614	3819	386
BA	7,25 – 12,75	10,0	0,5	L3	215	1334	368

Versuchsreihe 6

Durchführung: 14.05.2013 –08.08.2013

Nach einer Gruppenbesprechung bezüglich der geplanten ÖNORM wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- **Erweiterung der Zulauflösung um** die Schwermetalle **Nickel und Chrom**, da diese auch in realen Abwässern vorkommen und auch für Adsoptions- bzw. Desorptionsprozesse sorgen bzw. die anderen Schwermetalle bei der Adsorption behindern, wie auch unter realen Bedingungen.
- Einstellung der **Durchflussrate entsprechend dem k_f-Wert** und **Beschickung** von **oben nach unten** (um mehr an reale Bedingungen anzuknüpfen).

Geprüft wurde nur anhand eines technischen Filtermaterials. Gleichzeitig wurde eine zweite Säule, welche mit Zeolithmaterial befüllt war, betrieben. Diese war jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

Auch in dieser Versuchsreihe kam es vermehrt zu Beschädigungen der Zulaufschläuche und deren Austausch.

Aufgrund eines Analyseproblems im Labors kam es zu zeitlichen Verzögerungen innerhalb der Versuchsreihe, sodass die Säule einige Wochen außer Betrieb war (24.05. – 09.07.2013). Die Fortsetzung der Versuchsreihe erfolgte nicht vom Autor.

In Tabelle 4-21 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-21: Eigenschaften Versuchsreihe 6 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
TFIb	32	20	08.05.2013	133

Tabelle 4-22 zeigt Durchflussrate (Q), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-22: Eigenschaften Versuchsreihe 6 (2)

Material	Q (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
TFIb	50	0.9	L4	1552	9615	538

Versuchsreihe 7

Durchführung: 15.07.2013 –08.08.2013

Die **Beschickung** dieser Versuchsreihe erfolgte wiederum von **unten nach oben**, um die Ergebnisse mit jenen der vorherigen Versuchsreihe 6 besser vergleichbar zu machen und um zu zeigen, ob die Durchströmrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Rückhaltewirkung darstellt. Geprüft wurde deshalb mit dem gleichen technischen Filtermaterial (TFIb), sowie den sonstigen Versuchsbedingungen.

Die Durchführung der Versuchsreihe erfolgte nicht vom Autor.

In Tabelle 4-23 sind eingesetzte Materialien, Säule, Einbau und Masse ersichtlich.

Tabelle 4-23: Eigenschaften Versuchsreihe 7 (1)

Material	Säulendurchmesser (mm)	Filterschichthöhe (cm)	Einbau	Masse (g)
TFIb (TFIbU)	32	20	15.07.2013	145

Tabelle 4-24 zeigt Durchflussrate (Q), Vielfaches von Q entsprechend dem k_f-Wert (Faktor Q_{kf}), Zulaufkonzentration (Lösung; L1-L4, Punkt 4.3.7), Beschickungsmenge (V), Bettvolumen (BV) und Versuchsdauer (t).

Tabelle 4-24: Eigenschaften Versuchsreihe 7 (2)

Bezeichnung	Q (ml/min)	Faktor Q_{kf}	Lösung	V (l)	BV	t (h)
TFIb (TFIbU)	50	0.9	L4	1145	7870	389

2) Versuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes

Jeder der Versuche erwies sich als äußerst schwierig, da Toluol sehr schnell aus Wasser ausdampft. Gesucht wurde ein geeignetes Behältnis, welches möglichst wenig Platz für Luft lies und zudem gut verschließbar war. Außerdem wurde versucht, möglichst dichte Probeflaschen zu verwenden.

Bei den Versuchen 1 bis 5 kam ein verschließbarer Glasbehälter mit einem Fassungsvermögen von 11,2 l zum Einsatz. Im Verschluss befanden sich 3 kleine Öffnungen, die an die Größe der jeweiligen Pumpenschläuche angepasst waren. Als Probeflaschen dienten 50 ml Steilbrustflaschen (Enghals) aus Braunglas mit Glasstopfen. Da sich die Ergebnisse als unbefriedigend herausstellten (Punkt 5.3), wurde versucht, eine weitere Möglichkeit zur Versuchsdurchführung zu finden.

Bei den Versuchen 6 und 7 wurde zur Entnahme ein Plastikbehälter mit Fassungsvermögen ca. 10 l verwendet, welcher sich durch die Entnahme von Flüssigkeit in sich zusammenzieht. Dadurch wurde der Luftanteil im Behältnis verringert. Während der Durchführung kam es jedoch zum Undichtwerden des Behälters. Der Versuch wurde trotzdem bis zum Ende durchgeführt.

Die Probenahme erfolgte bei Versuch 6 und 7 Versuchen wie folgt: Zum gewünschten Zeitpunkt wurden ca. 15 – 20 ml Probe entnommen. Exakt 5 ml dieser Probe wurden anschließend mittels einer Spritze in Head-Space Flaschen (10 ml, Klarglas, Abbildung 4-6) umgefüllt und mit einer Zange umgehend dicht verschlossen, um möglichen Entweichungen entgegenzuwirken. Dabei wurde darauf geachtet, Luftblasenbildung zu vermeiden. Pro Probenahme wurden zwei Head-Space Flaschen befüllt und anschließend die Probeflasche auf 50 ml aufgefüllt.

Im Anschluss wurden 3 weitere Versuche (8-10) mit den Head-Space Probeflaschen unternommen, welche jedoch nicht vom Verfasser dieser Arbeit betreut wurden.

Abbildung 4-6: Head-Space Flaschen für Toluolversuche (eigene Abbildung)

In Tabelle 4-25 finden sich die wichtigsten Eigenschaften zu jedem Versuch.

Tabelle 4-25: Eigenschaften Toluolversuche

Versuch	Material	Datum	d (mm)	Toluol-konzentration (mg/l)	Säule frisch/beladet (f/b)	Q (ml/min)	Fließ-richtung
1	Sand	13.05.13	13,4	25	f	28	von oben
2	TFIc	22.05.13	32	25	b	n.b.	von oben
3	TFIIb	23.05.13	32	25	b	n.b.	von oben
4	BA	27.05.13	32	25	b	20	von oben
5	TFIb	27.05.13	32	25	b	50	von oben
6	TFIIb	04.06.13	32	25	b	50	von oben
7	TFIb	04.06.13	32	25	b	50	von oben
8	S	Juni 13	32	25	n.b.	50	von oben
9	TFIc	Juni 13	32	25	n.b.	50	von oben
10	BA	Juni 13	32	25	n.b.	50	von oben

D … Durchmesser der Säule; Q ... Durchflussrate; n.b. … nicht bekannt (Versuche nicht vom Autor durchgeführt)

Wie in Tabelle 4-25 ersichtlich, wurden die Materialien aufgrund der oben genannten Probleme mehrmals erprobt. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wurden lediglich die Proben aus Versuch 6-10 im Labor auf Toluol analysiert, wo die Versuchsdurchführung im Vergleich zu den anderen Versuchen passend erschien.

Mit frisch/beladet ist gemeint, ob das Material frisch in die Säule eingebracht wurde oder ob ein Material bereits mit Schwermetallen aus Vorversuchen beladet war.

Sowohl Konzentration als auch die Fließrichtung wurde in den Versuchsreihen nicht variiert.

4.4 Batchversuche

Zur Ermittlung des Sorptionsverhaltens der Materialien wurden Batchversuche durchgeführt. Diese sollen des Weiteren als Vergleich zu den Säulenversuchen dienen. Es soll ermittelt werden, in wie fern sich diese zwei unterschiedlichen Versuchsweisen auf die Ergebnisse auswirken. Es sollen, falls vorhanden, deutliche Unterschiede ersichtlich gemacht werden und Aspekte für bzw. gegen Batchversuche als mögliche Versuchsart zur Prüfung der Filterkapazität hervorgehoben werden.

Die Batchversuche wurden unter den Versuchsbedingungen, welche zur Ermittlung der Adsorptionsisothermen (Punkt 3.7.1) nötig sind, durchgeführt.

4.4.1 Materialien

Um die Ergebnisse der Batchversuche mit jenen der Säulenversuche besser vergleichen zu können, wurden gleiche Materialien verwendet (Punkt 4.3.1). Die Versuche wurden mit den technischen Filtermaterialien TFIc und TFIIb durchgeführt.

4.4.2 Versuchsvorbereitung

Jeweils 5 g jeden Materials wurden in 100 ml Steilbrustflaschen aus Klarglas gefüllt. Dabei wurde auf gute und homogene Durchmischung des Materials geachtet. Die Materialproben wurden anschließend mit 50 ml Lösung (wässrige Lösung aus den Schwermetallen Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink) versehen. Pro Material wurden jeweils zwei Materialproben mit derselben Lösung versehen (= Duplikate). Insgesamt wurden fünf Lösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen aufbereitet, das ergab zehn befüllte Probeflaschen pro Material.

Der pH-Wert wurde auf 5,8 (± 0,2) eingestellt, um die Verfügbarkeit von Schwermetallen in gelöster Form zu gewährleisten (Punkt 3.4.1).

In Tabelle 4-26 sind die unterschiedlichen Konzentrationen, mit denen die Batchversuche durchgeführt wurden, aufgelistet.

Tabelle 4-26: Eingesetzte Lösungen für die Batchversuche

Lösungsbezeichnung	Konzentration (Pb,Cr,Cu,Ni/Zn) (µg/l)
Lösung 1	50/500
Lösung 2	500/5000
Lösung 3	1000/10000
Lösung 4	5000/50000
Lösung 5	10000/100000

Wie unter Allgemeine Grundlagen, Punkt 3.7.1 schon erklärt, wurden die Konzentrationen absichtlich so gewählt, dass diese über jenen der im Straßenwasser vorkommenden Konzentrationen liegen, um die maximale Sorptionskapazität ermitteln zu können.

4.4.3 Versuchsdurchführung

Nach Zugabe der Lösungen zu den einzelnen Materialien wurden die Glasflaschen auf einem Horizontal-Schüttler befestigt und anschließend für eine definierte Zeit geschüttelt.

Der Schüttelvorgang wurde am 30.04.13 um ca. 17 Uhr gestartet und am 02.05.13 um ca. 8 Uhr beendet. Die Schütteldauer betrug somit 39 Stunden.

Anschließend wurden die Proben im Labor filtriert und die restliche wässrige Lösung auf verbleibende Schwermetallkonzentrationen analysiert.

5. Ergebnisse und Interpretation

5.1 Ergebnisse

Das Probenahmeprotokoll der Säulenversuche, sowie die Auswertungstabellen der Ergebnisse zu den Säulenversuchen und den Batchversuchen (in Excel) finden sich im Anhang unter Punkt 8.3, 8.4 und 8.5.

5.1.1 Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes

Die Versuche wurden unter den verschiedensten Bedingungen ausgeführt. Um eine geeignete Prüfmethode zur Kapazitätsprüfung zu erkunden, sollten die verschiedensten Einflussgrößen miteinander verglichen werden.

Wichtig hierbei ist der Vergleich der unterschiedlichen Flussraten, des Säulendurchmessers, der Flächenverhältnisse und der Durchströmungsrichtung in Bezug auf die unterschiedlichen Filtersubstrate und Schwermetalle.

Hier werden die Ergebnisse jeder Versuchsreihe in Zahlen aufgelistet. Eine graphische Gegenüberstellung der Ergebnisse sowie eine dazugehörige Interpretation findet sich unter Punkt 5.2.

Die gemessenen Ablaufkonzentrationen wurden immer auf die dazugehörigen, gemessenen Zulaufkonzentrationen bezogen.

Die Ergebnisse werden nach folgenden Gleichungen ermittelt:

(1) Aufgebrachte Niederschlagsmenge in Jahren

Es handelt sich hierbei um die unter Punkt 4.1.1 genannte Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr Q_J. Abhängig vom Flächenverhältnis ergibt sich je ein anderes Volumen, welches den Jahresniederschlag für 1 Jahr repräsentiert. Je nachdem, wie viel Volumen durch die Säulen durchgesetzt wurde, ergibt sich daher eine gewisse Anzahl von „Jahren“ (Formel 5-1).

$$JN = \frac{V_{ges}}{Q_J} \qquad (5\text{-}1)$$

JN … Jahresniederschläge (a)

V_{ges} … gesamtes durchgesetztes Volumen (l)

Q_J … Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr (l/a) (siehe Formel 4-1)

(2) Schwermetallfracht gesamt in mg

Die Schwermetallfracht, welche die Säule während der Versuchsdauer durchschritten hat, berechnet sich aus:

$$SM - Fracht_{ges} = V_{ges} * C_{i\_m} \qquad (5\text{-}2)$$

SM-Fracht$_{ges}$ … Schwermetallfracht gesamt (mg)

V_{ges} … gesamtes durchgesetztes Volumen (l)

C_{i_m}… gemessene Zulauf-Konzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

Je nach Schwermetall ergeben sich daher unterschiedliche Frachten.

(3) Gesamt-Beladung in mg/kg

Die Beladung wurde bereits unter Punkt 3.4.3 erklärt. Der Vollständigkeit halber wird hier die Formel abermals aufgeführt.

$$q = \frac{C_s}{m} \tag{5-3}$$

q … Beladung (mg/kg)

C_s … adsorbierte Schwermetallfracht (mg)

m … Masse des Adsorbens (d.h. des Filtermaterials) (mg)

Die adsorbierte Schwermetallfracht errechnet sich aus:

$$C_s = \left(C_{i\_m} - C_e\right) * V \tag{5-4}$$

C_s … adsorbierte Schwermetallfracht (mg)

C_{i_m}… gemessene Zulauf-Konzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

C_e … gemessene Ablaufkonzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

V … durchgesetztes Volumen (l)

Die Gesamt-Beladung, berechnet durch die Summierung der einzelnen Beladungen pro gemessene Probe:

$$q_{ges} = \sum q \tag{5-5}$$

q … Beladung (mg/kg)

q_{ges} … Gesamt-Beladung (mg/kg)

(4) Simulierte Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Die aufgebrachten Schwermetallfrachten, ausgedrückt in Jahren, sollen die Betriebsjahre der Anlage simulieren. Dafür ergibt sich für jedes Schwermetall eine unterschiedliche Jahresanzahl.

Die Schwermetallfracht, welche 1 Jahr repräsentieren soll, ermittelt sich wie folgt:

$$SMJF = Q_J * C_i \tag{5-6}$$

SMJF … Schwermetallfracht pro Jahr (mg/a)

Q_J … Niederschlagsmenge pro Säule und Jahr (l/a)

C_i … Eingangskonzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

Anmerkung: Als C_i wurden hier die Konzentrationen der Modelllösungen verwendet (Tabelle 4-5), welche sich an realistischen Werten aus der Literatur orientieren.

Bei jedem Versuch wurde daher die entsprechende Eingangskonzentration C_i als Berechnungsbasis herangezogen. In Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-12 sind für die verwendeten Konzentrationen in der Modelllösung die jeweilige Schwermetallfracht pro Jahr aufgelistet (nach jeweiligem Flächenverhältnis).

Die aufgebrachten Jahresfrachten errechnen sich nun aus:

$$SM_{Jges} = \frac{SM{-}Fracht_{ges}}{SMJF} \quad (5\text{-}7)$$

SM_{Jges} … Schwermetall-Jahresfrachten (a)

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ … Schwermetallfracht gesamt (mg)

SMJF … Schwermetallfracht pro Jahr (mg/a)

Versuchsreihe 1 und 2

Da der Versuch mit der Säule, welche mit BA befüllt war, abgebrochen wurde, finden sich hier auch keinerlei Kenndaten und Ergebnisse dazu.

In Tabelle 5-1 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-1: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 1+2

Material	JN (a) A_v = 1:15	JN (a) A_v = 1:100	JN (a) A_v = 1:200
S	144	22	11
TFIc	140	21	10
TFIIb	123	19	9

Tabelle 5-2 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-Fracht$_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-2: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 1+2

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)					q_{ges} (mg/kg)				
Schwermetall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	23	15	26	10	28	120	49	76	1	38
TFIc	22	14	25	10	27	736	400	500	139	517
TFIIb	20	13	23	9	25	184	11	83	2	58

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-3 entnommen werden.

Tabelle 5-3: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 1+2

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15					SM_{Jges} (a) A_v = 1:100					SM_{Jges} (a) A_v = 1:200				
Schwermetall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	156	200	175	137	191	23	30	26	21	29	12	15	13	10	14
TFIc	151	193	170	133	185	23	29	26	20	28	11	15	13	10	14
TFIIb	137	172	154	118	167	20	26	23	18	25	10	13	12	9	13

Versuchsreihe 3

In Tabelle 5-4 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-4: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 3

Material	JN (a) A_v = 1:15	JN (a) A_v = 1:100	JN (a) A_v = 1:200
S	9,3	1,4	0,7
TFIc	9,3	1,4	0,7
TFIIb	9,3	1,4	0,7

Tabelle 5-5 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-Fracht$_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-5: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 3

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)					q_{ges} (mg/kg)				
Schwermetall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	1	1	2	1	1	19	1	13	3	12
TFIc	1	1	2	1	1	44	19	45	19	46
TFIIb	1	1	2	1	1	44	9	40	20	44

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-6 entnommen werden.

Tabelle 5-6: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 3

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15					SM_{Jges} (a) A_v = 1:100					SM_{Jges} (a) A_v = 1:200				
Schwermetall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	9	11	10	10	20	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1
TFIc	9	11	10	10	20	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1
TFIIb	9	11	10	10	20	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1

Versuchsreihe 4

In Tabelle 5-7 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-7: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 4

Material	JN (a) A_v = 1:15	JN (a) A_v = 1:100	JN (a) A_v = 1:200
S	40	6,0	3,0
TFIc	16	2,4	1,2
TFIIb	16	2,4	1,2
BA	1,3	0,2	0,1

Tabelle 5-8 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-Fracht$_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-8: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 4

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)					q_{ges} (mg/kg)				
Schwermetall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	6	4	6	3	7	62	43	55	4	22
TFIc	2	1	3	1	3	76	46	82	38	96
TFIIb	2	1	3	1	3	76	46	82	38	96
BA	0,5	0,3	0,5	0,2	0,6	2	1	2	1	2

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-9 entnommen werden.

Tabelle 5-9: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 4

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:100**					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:200**				
Schwer-metall	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	38	47	42	39	49	6	7	6	6	7	3	4	3	3	4
TFIc	15	19	17	16	19	2	3	3	2	3	1	1	1	1	1
TFIIb	15	19	17	16	19	2	3	3	2	3	1	1	1	1	1
BA	1	2	1	1	2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Versuchsreihe 5

In Tabelle 5-10 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-10: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 5

Material	**JN (a) A_v = 1:15**	**JN (a) A_v = 1:100**	**JN (a) A_v = 1:200**
S	19	3	1,4
TFIc	78	12	5,8
TFIIb	73	11	5,4
BA	25	3,8	1,9

Tabelle 5-11 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-$Fracht_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-11: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 5

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)			**q_{ges} (mg/kg)**		
Schwermetall	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
S	10	20	79	23	35	89
TFIc	37	78	341	294	627	2439
TFIIb	35	73	317	223	464	1607
BA	12	25	113	37	80	312

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-12 entnommen werden.

Tabelle 5-12: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 5

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15			**SM_{Jges} (a) A_v = 1:100**			**SM_{Jges} (a) A_v = 1:200**		
Schwermetall	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
S	23	24	24	3	4	4	2	2	2
TFIc	87	92	101	13	14	15	7	7	8
TFIIb	82	87	94	12	13	14	6	7	7
BA	28	30	34	4	5	5	2	2	3

Versuchsreihe 6

In Tabelle 5-13 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-13: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 6

Material	**JN (a) A_v = 1:15**	**JN (a) A_v = 1:100**	**JN (a) A_v = 1:200**
TFIb	184	28	14

Tabelle 5-14 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-Fracht$_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-14: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 6

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)					**q$_{ges}$ (mg/kg)**				
Schwerm.	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb	88	79	178	100	695	644	496	1056	483	3836

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-15 entnommen werden.

Tabelle 5-15: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 6

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:100**					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:200**				
SM	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb	209	186	211	238	206	31	28	32	36	31	16	14	16	18	15

Versuchsreihe 7

In Tabelle 5-16 befinden sich die aufgebrachten Jahresniederschläge JN bzw. Betriebsjahre je nach Flächenverhältnis A_v.

Tabelle 5-16: Aufgebrachte Jahresniederschläge, Versuchsreihe 7

Material	**JN (a) A_v = 1:15**	**JN (a) A_v = 1:100**	**JN (a) A_v = 1:200**
TFIb U	136	20	10

Tabelle 5-17 zeigt die die Säule passierte, gesamte Schwermetallfracht SM-Fracht$_{ges}$ und die Gesamt-Beladung q_{ges} des Filtermaterials.

Tabelle 5-17: Schwermetallfracht gesamt und Gesamt-Beladung, Versuchsreihe 7

	SM-Fracht$_{ges}$ (mg)					**q$_{ges}$ (mg/kg)**				
Schwerm.	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb U	67	58	128	65	525	455	368	865	438	3575

Die simulierten Betriebsjahre, ausgedrückt als aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren SM_{Jges} nach jeweiligem Flächenverhältnis A_v, können Tabelle 5-18 entnommen werden.

Tabelle 5-18: Simulierte Betriebsjahre (Schwermetall-Jahresfrachten), Versuchsreihe 7

	SM_{Jges} (a) A_v = 1:15					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:100**					**SM_{Jges} (a) A_v = 1:200**				
SM	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb U	158	138	152	154	155	24	21	23	23	23	12	10	11	12	12

5.1.2 Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes

Da die Ergebnisse der Toluolversuche nur in Form von Tabellen dargestellt werden und die Interpretation darauf aufbaut, wird gleich auf Punkt 5.3 (Ergebnisse und Interpretation – Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes mit Toluol) verwiesen.

5.1.3 Batchversuche

Da die Ergebnisse der Batchversuche lediglich in Form von Abbildungen dargestellt werden und auch hier die Interpretation darauf aufbaut, wird gleich auf Punkt 5.4 (Ergebnisse und Interpretation – Batchversuche)

5.2 Interpretation - Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes

Wie unter Punkt 5.1.1 angekündigt, werden hier die unterschiedlichen Einflussgrößen auf die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt und miteinander verglichen. Außerdem wird auf allgemeine Fragestellungen, wie zum Beispiel den Einfluss von Unterbrechungen, sowie den Einfluss des pH-Wertes eingegangen.

Anmerkung: Der pH-Wert im Ablauf wurde erst ab Versuchsreihe 5 kontrolliert. Mögliche Ablaufwerte, die pH-abhängig agiert haben, können daher für die Versuche 1-4 nicht detektiert werden.

5.2.1 Vergleich des Schwermetall-Rückhaltes durch verschiedene Filtersubstrate

In Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-3 werden vier verschiedene Filtersubstrate und deren Aufnahmefähigkeit untereinander verglichen. Dazu wird Versuchsreihe 5 herangezogen.

Die rote Linie in Abbildung 5-1 repräsentiert das Prüfkriterium für Blei laut Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (Punkt 3.5.1)

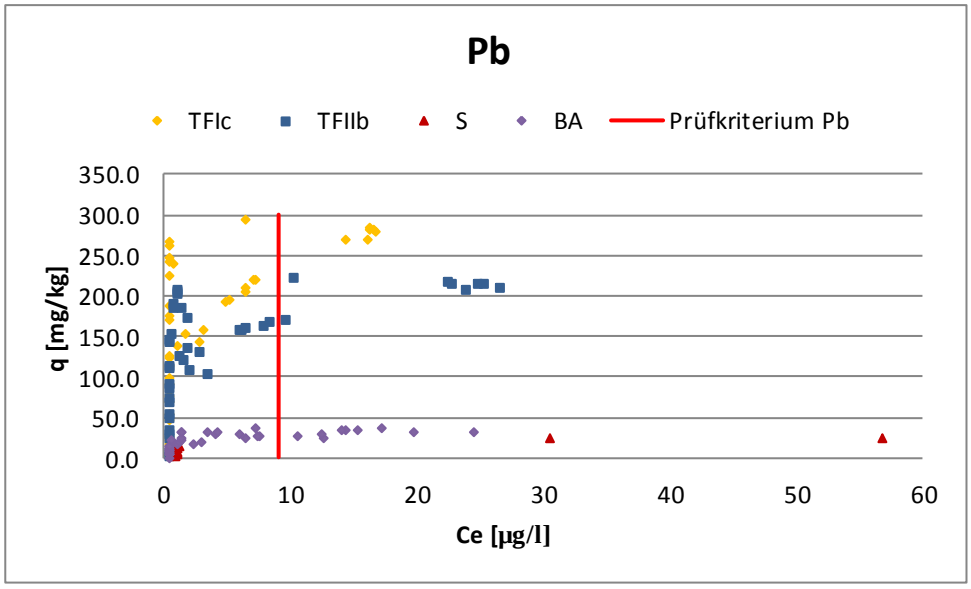


Abbildung 5-1: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Pb), Versuch 5

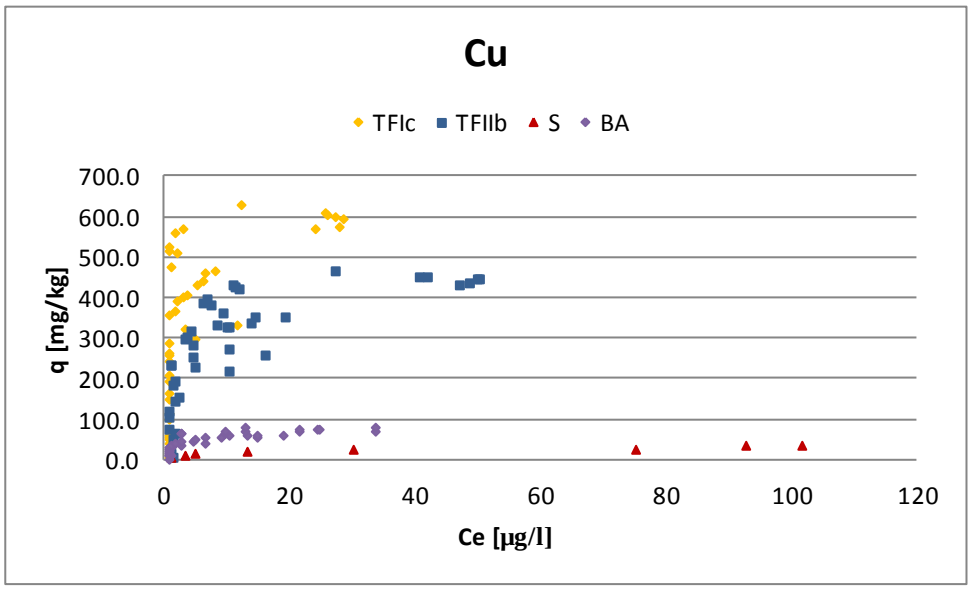


Abbildung 5-2: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Cu), Versuch 5

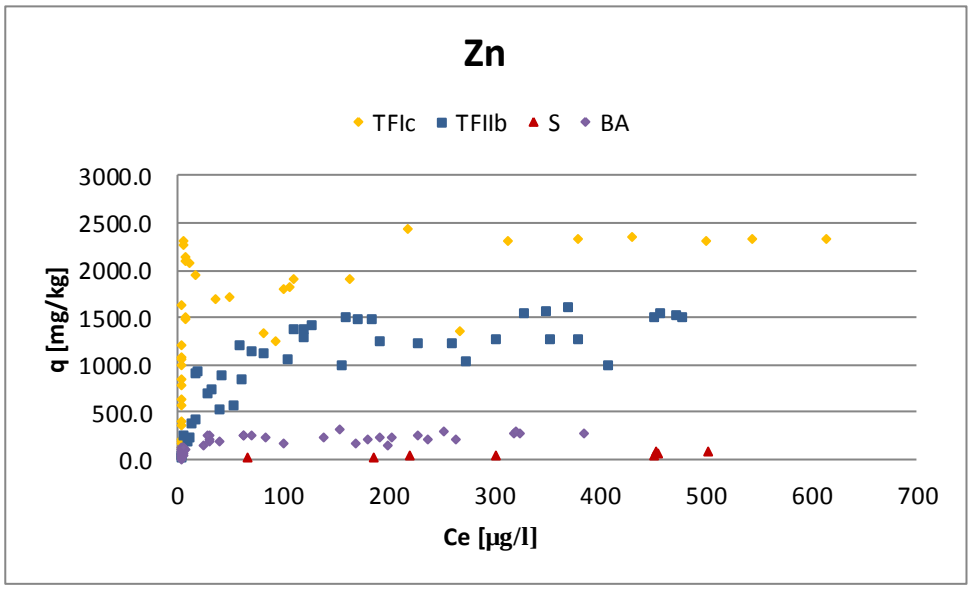


Abbildung 5-3: Vergleich der Substrate nach Beladung und Konzentration (Zn), Versuch 5

Die Abbildungen sind in die in Versuchsreihe 5 angewandten Schwermetalllösungsbestandteile (Pb, Cu, Zn) gegliedert. Die Flussrate und sonstige Versuchseigenschaften finden sich unter Punkt 4.3.12.

Sofort wird ersichtlich, dass sich die Beladungskapazität, unabhängig vom jeweiligen Schwermetall, in allen drei Fällen ähnlich verhält. Dabei kann erwähnt werden, dass Sand jeweils am schlechtesten abschneidet, dicht gefolgt von BA. Bei beiden technischen Filtermaterialien ist die Beladungskapazität deutlich höher. Wird bei Abbildung 5-1 auf die Beladung, bei der das Prüfkriterium für Blei überschritten wird, geachtet, ist heraus zu streichen, dass dies bei Sand und BA bereits bei einer Beladung unter 50 mg/kg der Fall ist, wobei die technischen Filtermaterialien erst zwischen 150 und 250 mg/kg das Prüfkriterium erreichen bzw. überschreiten.

5.2.2 Vergleich des Schwermetall-Rückhaltes bei verschiedenen Durchflussraten

In den folgenden Abbildungen wird der Einfluss der Durchflussrate auf die Ablaufkonzentrationen ersichtlich.

Da die Versuchsdauer und zum Teil die Versuchsbedingungen bei allen Versuchsreihen variieren, werden die Substrate über die aufgebrachten Schwermetall-Jahresfrachten, ausgedrückt in Jahren (Punkt 4.3.9, Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-12) miteinander verglichen.

Die Darstellungen beziehen sich auf ein Flächenverhältnis von 1:15. Um den Vergleich besser ersichtlich zu machen, wird das Prüfkriterium für Blei von 9 µg/l in jeder Abbildung dargestellt.

Als Vergleichsparameter wurde Blei gewählt, da dieser Parameter bei der Kapazitätsprüfung als Kriterium für den Filteraustausch herangezogen wurde (Punkt 4.1.1).

Die Versuchsdauer und somit das Flüssigkeitsvolumen, welches die Säulen passiert hat, variiert über die einzelnen Versuchsreihen. Daher ergeben sich unterschiedliche Schwermetall-Jahresfrachten, welche in diesen Darstellungen nicht unberücksichtigt bleiben sollten.

In Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-6 betrug der Säulendurchmesser 13,4 mm, in Abbildung 5-10 32 mm.

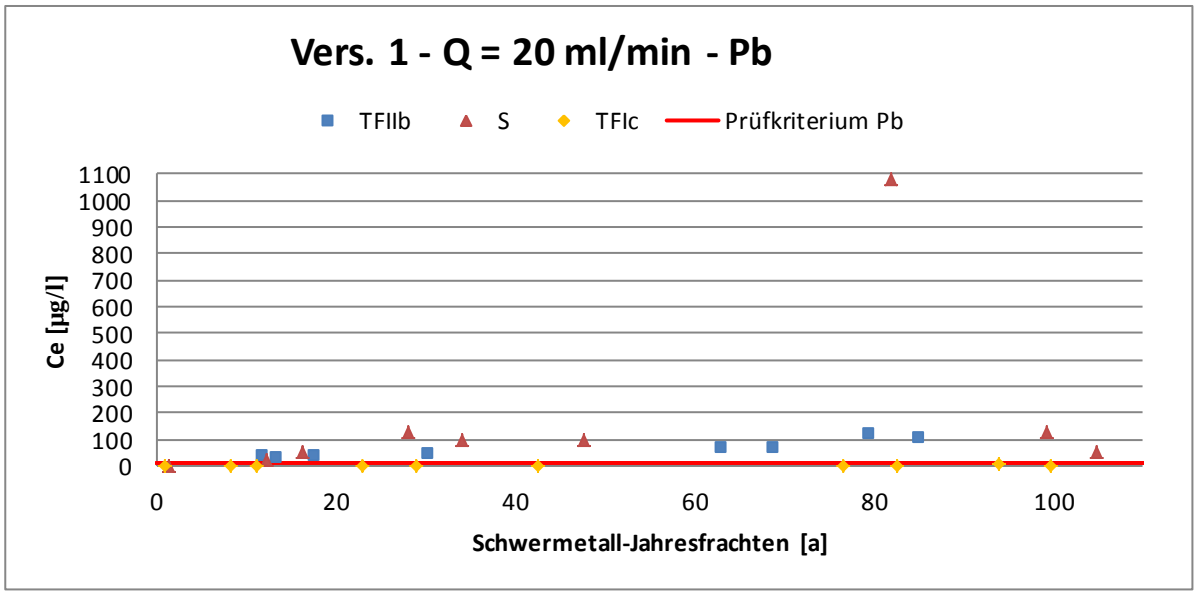


Abbildung 5-4: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 1)

Anmerkung: Bei der Darstellung von Versuchsreihe 1 (Abbildung 5-4) wurden lediglich die Ablaufkonzentrationen betrachtet, welche bei einer Durchflussrate von ca. 20 ml/min und der Modelllösung L1 zu beobachten waren.

Abbildung 5-4 zeigt, dass die Flussrate von ca. 20 ml/min weder für Sand, noch für TFIIb optimal gewählt war. Im Vergleich dazu sind die Ablaufkonzentrationen für TFIc eher gering.

Die Schwermetall-Jahresfracht von ca. 100 Jahren ist für die vorgegebene Anforderung (das entspricht 4 Jahre Filterstandzeit) viel zu hoch angesetzt. Wird das Flächenverhältnis z.B. jedoch auf 1:200 geändert, entspricht dies nur mehr ca. 8 Jahresfrachten. Da die Flächenverhältnisse jener Anlagen, welche zur Prüfung herangezogen werden, variieren können, ist es wichtig, die Ergebnisse für unterschiedlich gewählte Flächenverhältnisse zu betrachten.

Die Konzentrationen, welche bei den Filtersubstraten Sand und TFIIb gemessen wurden, übersteigen den Wert von 9 µg/l enorm und reichen bis teilweise über 1000 µg/l für Sand (das entspricht dem 200-fachen der Eingangskonzentration!) und bis 120 µg/l für TFIIb. Im Probenahmeprotokoll wurden zu diesem Zeitpunkt keinerlei Auffälligkeiten protokolliert.

Die Überschreitungen sind auf die hohe Durchflussrate und die damit verbundene geringe Kontaktzeit zurückzuführen. Je höher die Kontaktzeit zwischen Lösung und Material, desto länger haben die Spurenstoffe Zeit, sich anzulagern. Nebenbei kann aufgrund des geringen Säulendurchmessers von Randeffekten ausgegangen werden. Randeffekte heißt: das Verhältnis zwischen Korndurchmesser und Säulendurchmesser ist nicht optimal gewählt – die Lösung und die darin befindlichen Stoffe wählen nicht den Weg durch das Material selber, sondern suchen sich den Weg bzw. die Zwischenräume, die gegen die Wand hin entstehen, um die Säule zu passieren. Die Folge ist eine geringere Aufnahme bzw. Adsorption durch das Filtersubstrat.

Für das Substrat TFIc liegen die Werte jedoch unter dem Prüfkriterium. Das liegt vermutlich an einer zusätzlichen Stoffkomponente im Material oder an einer optimaleren Zusammensetzung des Materials, welche diesen Durchflussbedingungen standhält. Um dies zu verifizieren, wurden weitere Versuche mit anderen Durchflussraten durchgeführt.

In Versuchsreihe 3 wurde mit einer deutlich geringeren Flussrate gefahren. Wie in Abbildung 5-5 zu sehen ist, verhält sich Sand, sowie das Filtermaterial TFIIb deutlich besser gegenüber der letzten Versuchsreihe. Allerdings war die Versuchsdauer deutlich geringer, was bei einem Flächenverhältnis von 1:15 in etwa nur 10 Schwermetall-Jahresfrachten entspricht (= weniger als 1 Jahr bei 1:200).

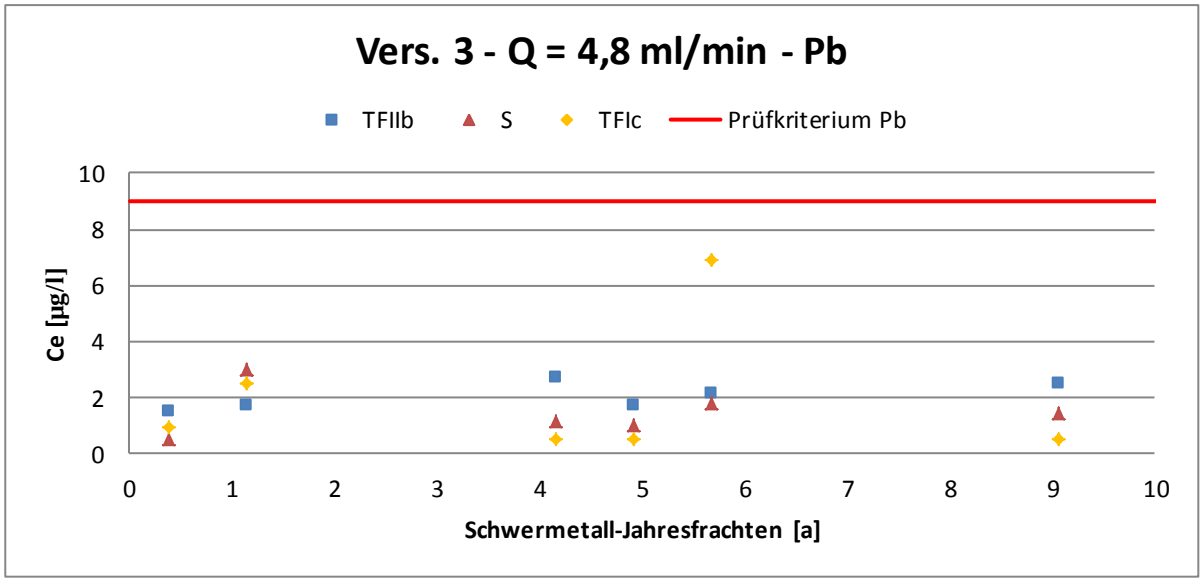


Abbildung 5-5: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 3)

Wird jedoch abermals Abbildung 5-4 betrachtet, ist erkennbar, dass auch bereits bei einer Schwermetallfracht von 10 Jahren Ablaufkonzentrationen über dem Prüfkriterium zu beobachten sind. Dies deutet darauf hin, dass sich die geringere Flussrate sehr wohl positiv auf die Aufnahmekapazität auswirkt.

In Versuchsreihe 4 wurde für Sand mit einer Flussrate von ca. 22 ml/min, bei den technischen Filtermaterialien mit einer Flussrate von ca. 7 ml/min gearbeitet (Abbildung 5-6).

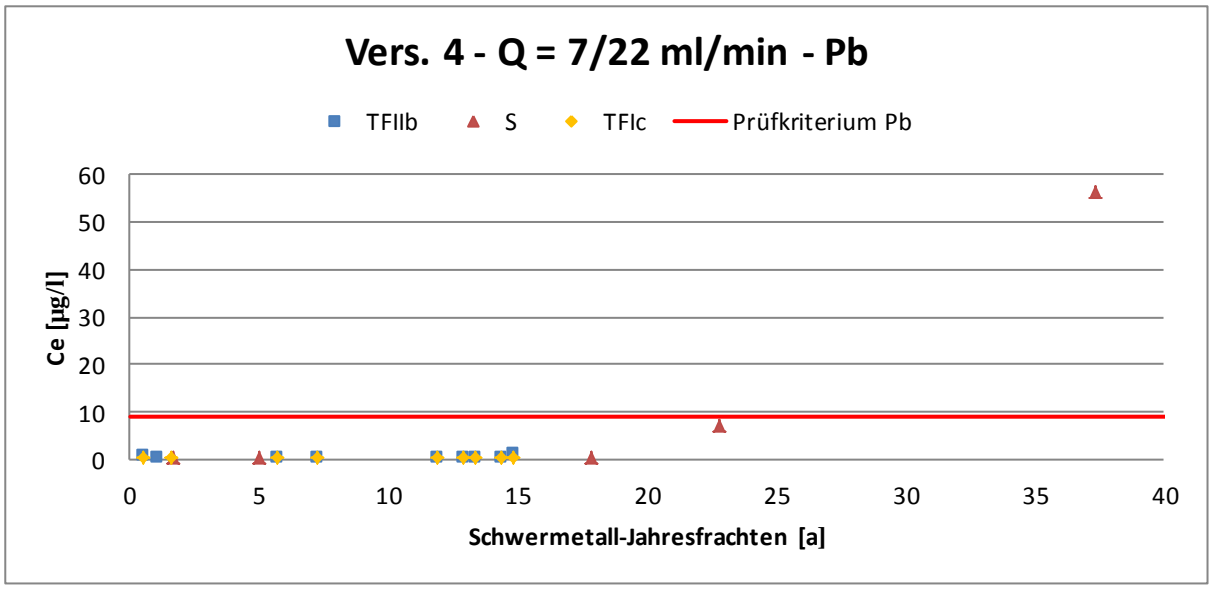


Abbildung 5-6: Vergleich der Flussraten nach Schwermetall-Jahresfrachten und Konzentration, d = 13,4 mm (Vers. 4)

Gerade die technischen Substrate schneiden hier nochmals besser ab als in Versuchsreihe 3, es werden hier 15 Schwermetallfrachtjahre repräsentiert. Lediglich die Konzentration für Sand steigt nach ca. 20 Jahresfrachten massiv an und erreicht einen Konzentrationswert von ca. 60 µg/l. Auch dieser massive Konzentrationsanstieg geht mit keinerlei Auffälligkeiten im Probenahmeprotokoll einher.

Die Ablaufkonzentrationen sprechen in diesem Fall wiederum für eine geringe Flussrate. Die Ablaufwerte für Sand mit einer Flussrate von 22 ml/min sind jedoch fraglich, da in Versuchsreihe 1 in etwa mit der gleichen Flussrate gearbeitet wurde, die Ergebnisse jedoch deutliche Unterschiede zeigen.

Die Unterschiede in den Ergebnissen sind nicht eindeutig zu erklären, außerdem ist zu beachten, dass hier nur die Werte für die Bleikonzentrationen dargestellt wurden.

Werden zum Beispiel alle Filtersubstrate und alle Schwermetalle miteinander verglichen, wird offensichtlich, dass gerade die anderen Schwermetalle zum Teil sehr hohe Ablaufkonzentrationen annehmen. Um diese Erkenntnis graphisch unterstreichen zu können, werden nun in den folgenden Abbildungen alle Schwermetalle jedes eingesetzten Materials in Versuchsreihe 3 miteinander verglichen.

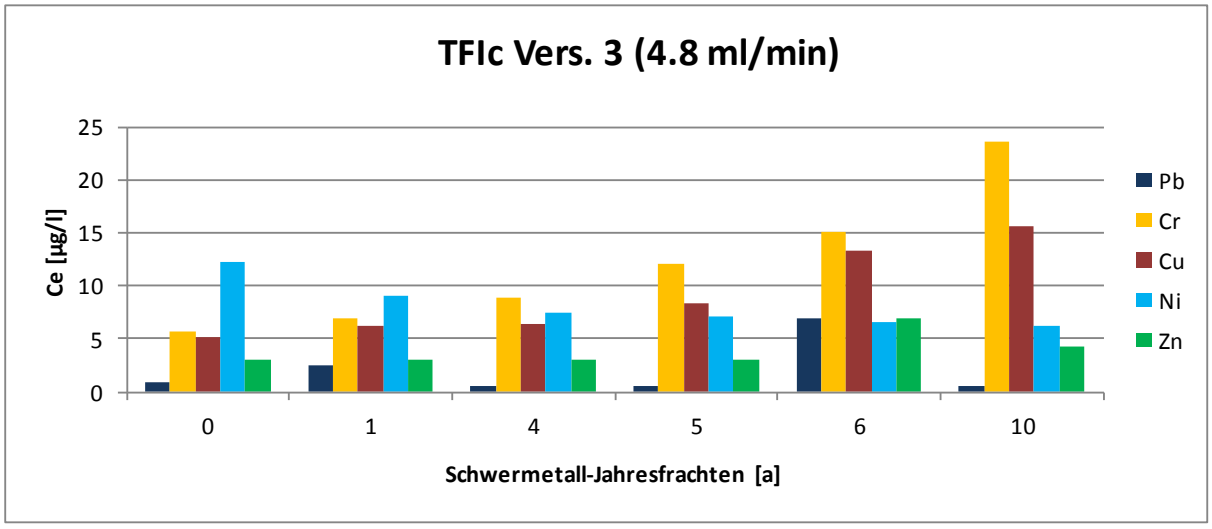


Abbildung 5-7: Ablaufkonzentrationen für TFIc, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3)

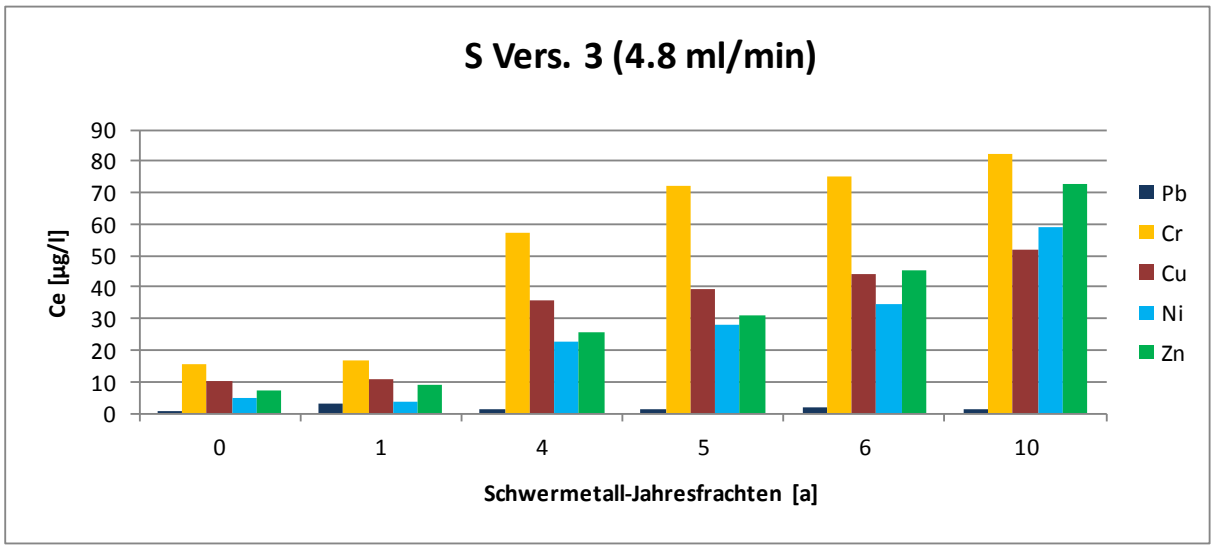


Abbildung 5-8: Ablaufkonzentrationen für Sand, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3)

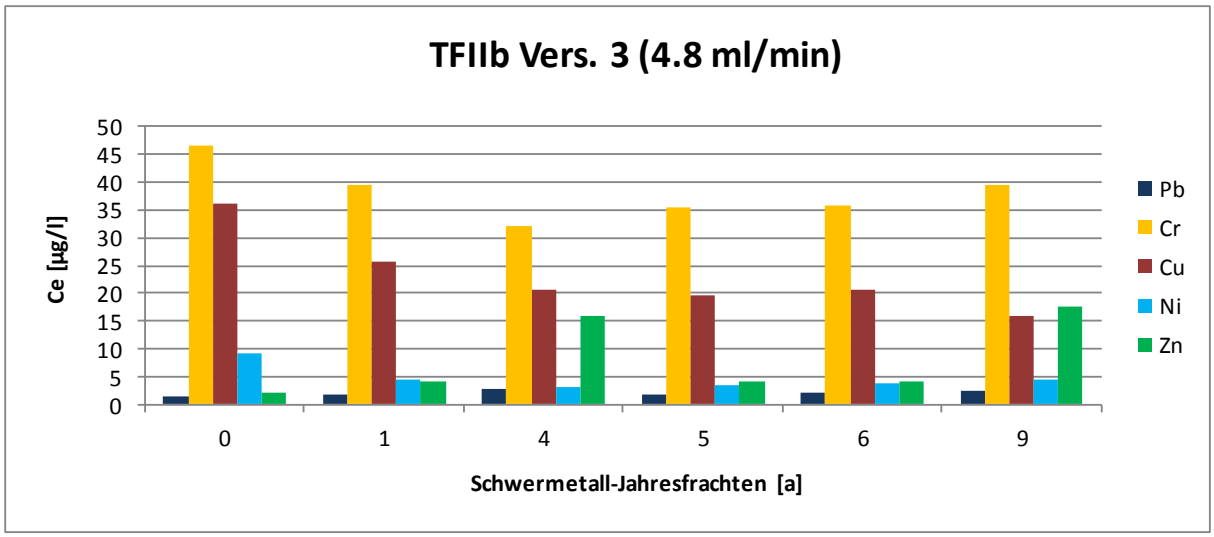


Abbildung 5-9: Ablaufkonzentrationen für TFIIb, d = 13,4 mm (Versuchsreihe 3)

Versuchsreihe 3 wurde daher gewählt, da diese Versuchsreihe eine sehr geringe Anzahl von Schwermetallfrachtjahren repräsentiert, die Ablaufkonzentrationen relativ dazu aber schon sehr hoch liegen.

Gerade die Werte für Chrom und Kupfer liegen im Gegensatz zu Blei teilweise schon sehr hoch. Die Zulaufkonzentration dieser Versuchsreihe lag für Blei, Kupfer und Zink bei jeweils 100 µg/l und für Chrom und Nickel bei 50 µg/l. In allen drei Abbildungen liegen die Werte für Blei sehr gering, während Kupfer und Zink weniger gut zurückgehalten werden. In Abbildung 5-8 erreichen diese schon fast wieder die Zulaufkonzentration. Daraus lässt sich schließen, dass Blei bevorzugt durch die Materialien aufgenommen wird.

Vor allem Chrom erreicht Ablaufkonzentrationen, die teilweise die Eingangskonzentration von 50 µg/l übersteigen. Dies kann durch Remobilisierungen von bereits sorbiertem Chrom verursacht werden. Bei Nickel und Chrom wurden auch Probleme bei der Analytik (ICP-MS, Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) festgestellt, wobei es bei den Messungen zu Interferenzen und Überbefunden kam.

Durch diese Unterschiede in den Ergebnissen wurde daher beschlossen, den Säulendurchmesser zu erhöhen, um zumindest mögliche Randeffekte zu minimieren.

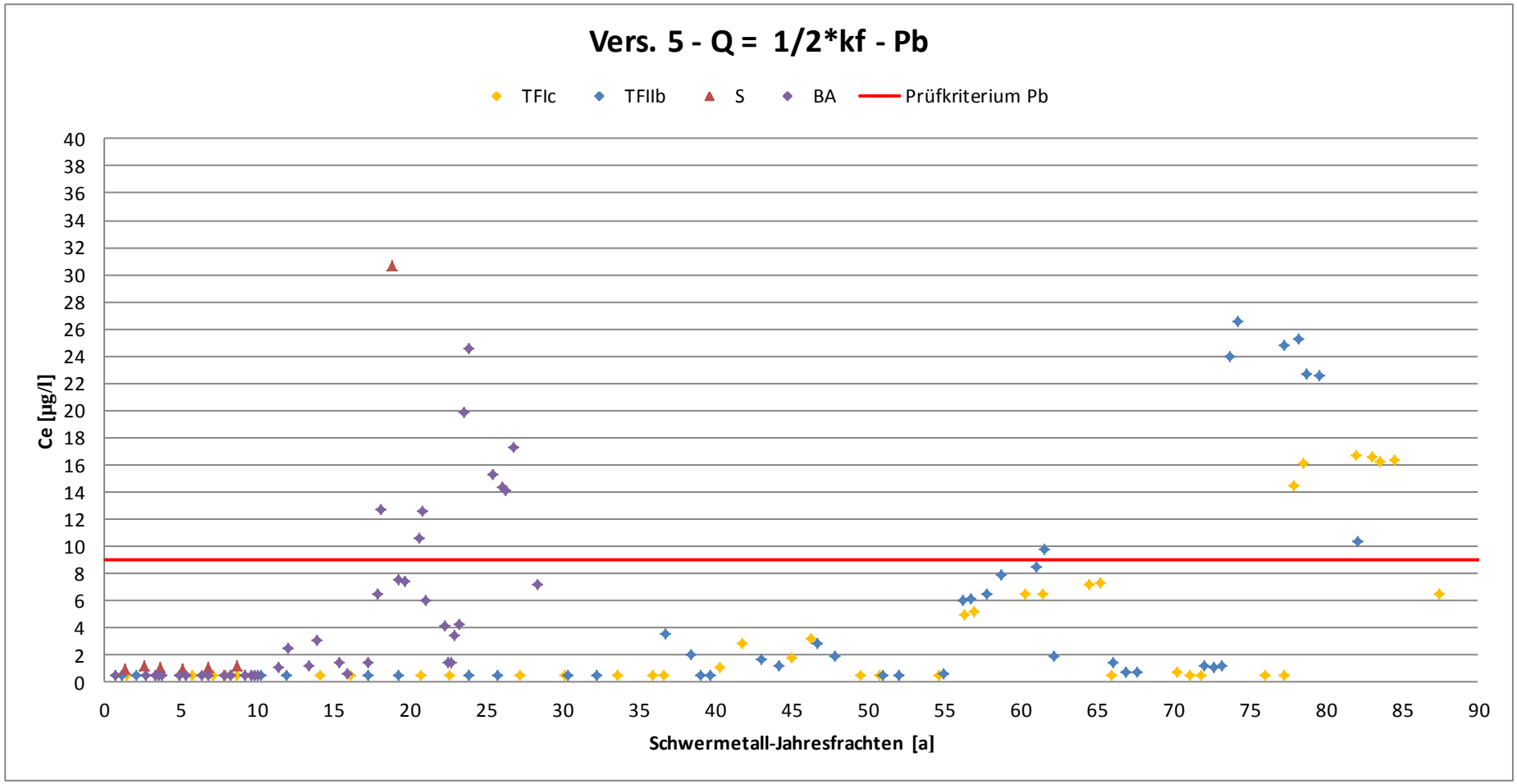


Abbildung 5-10: Vergleich der Flussraten nach Jahresniederschlagsfrachten und Konzentration, d = 32 mm (Vers. 5)

Im Zuge der Versuchsreihe 5 wurde der Säulendurchmesser auf 32 mm angehoben. Die Durchflussrate wurde so eingestellt, dass diese ca. die Hälfte jenes Durchflusses entspricht, mit welchem das Material durchflossen werden würde, würde es von oben nach unten beschickt werden (Durchfluss laut k_f-Wert). Somit fällt der Vergleich zwischen den Materialien leichter, da dieses ja in der Realität entsprechend dem k_f-Wert durchflossen wird. Die einzelnen Werte dazu finden sich in Material und Methoden unter Punkt 4.3.8.

Die Versuche mit Sand wurden früher abgebrochen, da die Ablaufkonzentration deutlich über dem Prüfkriterium lag und die notwendigen Schwermetalle zur Herstellung der Schwermetalllösung im Labor begrenzt waren.

Auffallend hierbei ist, dass die Ablaufwerte für BA relativ schnell das Prüfkriterium für Blei erreichen (zwischen 15 und 20 Jahresfrachten), hingegen die technischen Substrate erst nach ca. 60 Jahresfrachten das Prüfkriterium von 9 µg/l übersteigen (Abbildung 5-10). Das entspricht bei einem Flächenverhältnis von 1:200 ca. 5 Jahresfrachten.

Allgemein kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass sich die Konzentrationen bei dem größeren Durchmesser von 32 mm deutlich besser verhalten. Die Durchflussraten sind hier höher gesetzt als in den vorherigen Versuchen (für S ca. 60 ml/min, für TF ca. 20-30 ml/min und für BA ca. 10 m/min), die Ergebnisse sind dadurch aber nicht so sehr beeinträchtigt wie bei geringerem Durchmesser. Daher ist dieser Durchmesser bei der Prüfmethode zu bevorzugen.

5.2.3 Vergleich des Schwermetallrückhaltes bei verschiedenen Säulendurchmessern

Unter Punkt 5.2.2 wird bereits auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Säulendurchmesser eingegangen.

In Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-16 soll nun speziell für je ein technisches Filtermaterial (TFIIb), Sand und BA ein Vergleich nach dem Säulendurchmesser hergestellt werden. Dabei wird die Ablaufkonzentration im Bezug zur adsorbierten Schwermetallfracht dargestellt.

Als Bezugs-Versuchsreihen werden Versuchsreihe 4 und 5 herangezogen. In Versuchsreihe 4 betrug der Säulendurchmesser 13,4 mm bzw. 22 mm (für BA). Die Versuchsreihe wird deshalb herangezogen, da nur hier BA anhand eines kleineren Durchmessers als dem folgenden erprobt wurde und somit als Vergleich dient.

In Versuchsreihe 5 wurde ein Durchmesser von 32 mm gewählt, wiederum wurden die Materialien S, BA und TFIIb verwendet.

Weitere Eigenschaften von Versuchsreihe 4 und 5 finden sich unter Punkt 4.3.12 unter 1) und unter Punkt 5.1.1.

Verglichen wird nur zwischen Blei, Kupfer und Zink, da in Versuchsreihe 5 auf Chrom und Nickel in der Zulauflösung verzichtet wurde.

Die adsorbierte Schwermetallfracht berechnet sich wie folgt (siehe Formel 5-4)

$$C_S = \left(C_{i\_m} - C_e\right) * V \qquad (5\text{-}8)$$

C_s … adsorbierte Schwermetallfracht (mg)

C_{i_m}… gemessene Zulauf-Konzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

C_e … gemessene Ablaufkonzentration der Schwermetalllösung (mg/l)

V … durchgesetztes Volumen (l)

In Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 werden die Ergebnisse zu TFIIb in Versuch 4 und 5 bei unterschiedlichen Säulendurchmessern dargestellt.

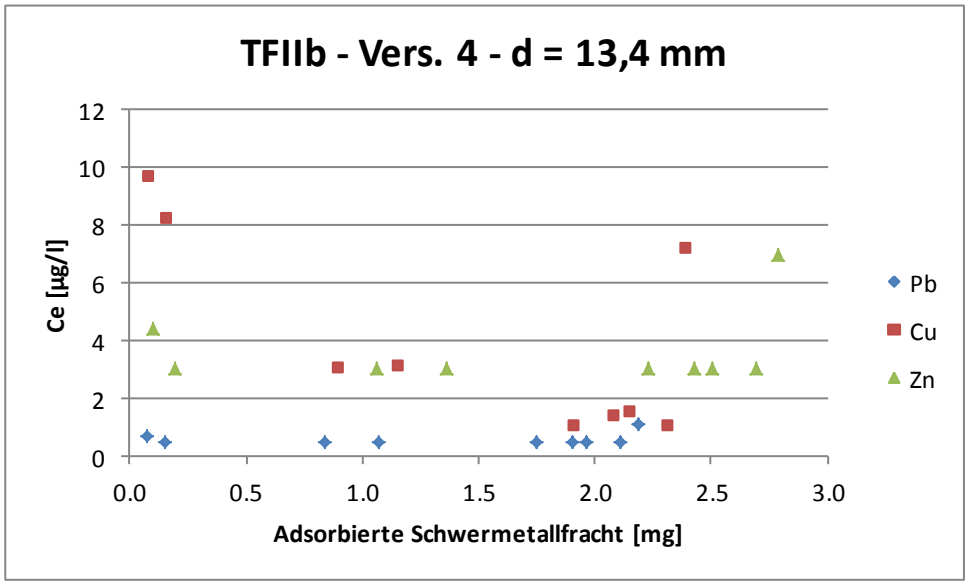


Abbildung 5-11: Adsorbierte Schwermetallfracht für TFIIb (Vers. 4) mit d = 13,4 mm

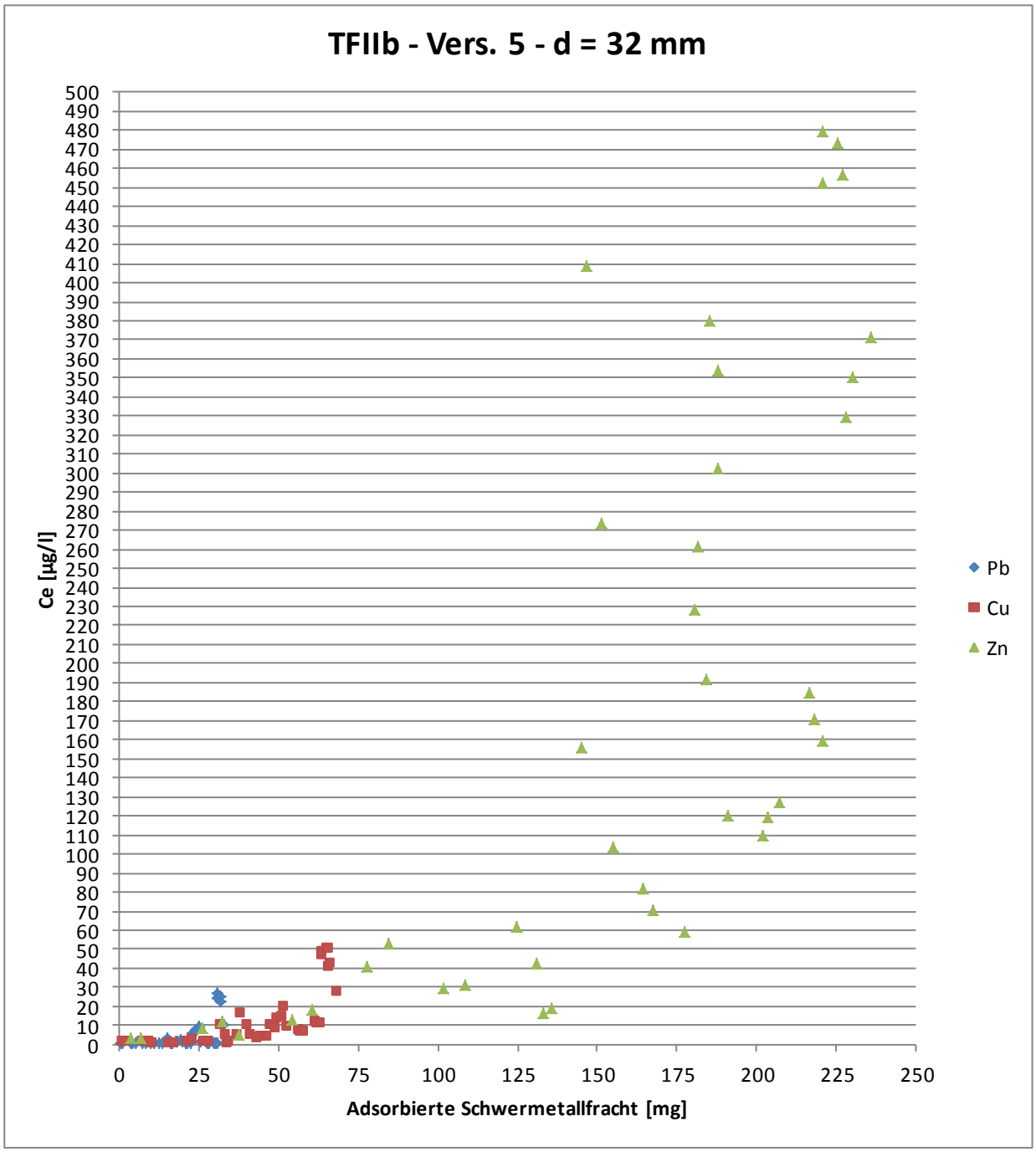


Abbildung 5-12: Adsorbierte Schwermetallfracht für TFIIb (Vers. 5) mit d = 32 mm

Erkennbar ist hier vor allem, dass bei Versuch 5 deutlich mehr Schwermetallfrachten aufgebracht worden sind als in Versuch 4. Die aufgebrachten Schwermetalljahresfrachten entsprechen bei Versuch 5 für TFIIb ca. 82 Jahren für Pb, 87 Jahren für Cu und 94 Jahren bei Zn. Bei Versuch 4 liegen die Werte bei 15 Jahren für Pb, 17 Jahren für Cu und 19 Jahren für Zn.

Dennoch wird deutlich, dass z.B. in Abbildung 5-11 die Ablaufkonzentrationen unter 3 mg Frachtbeladung im vergleichbaren Bereich liegen wie in Abbildung 5-12 bei 25 mg.

Auch in Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 werden die Ergebnisse zu S in Versuch 4 und 5 bei unterschiedlichen Säulendurchmessern dargestellt.

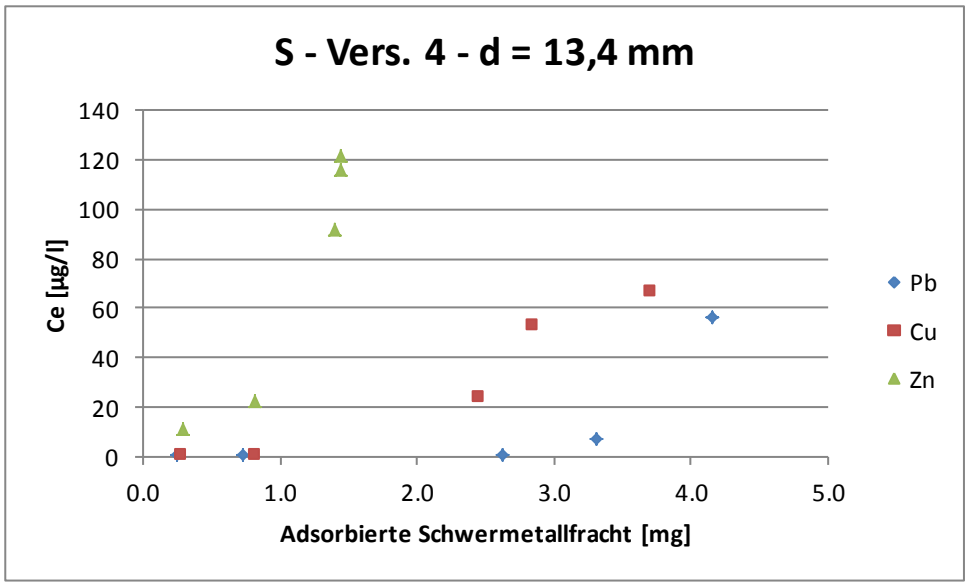


Abbildung 5-13: Adsorbierte Schwermetallfracht für S (Vers. 4) mit d = 13,4 mm

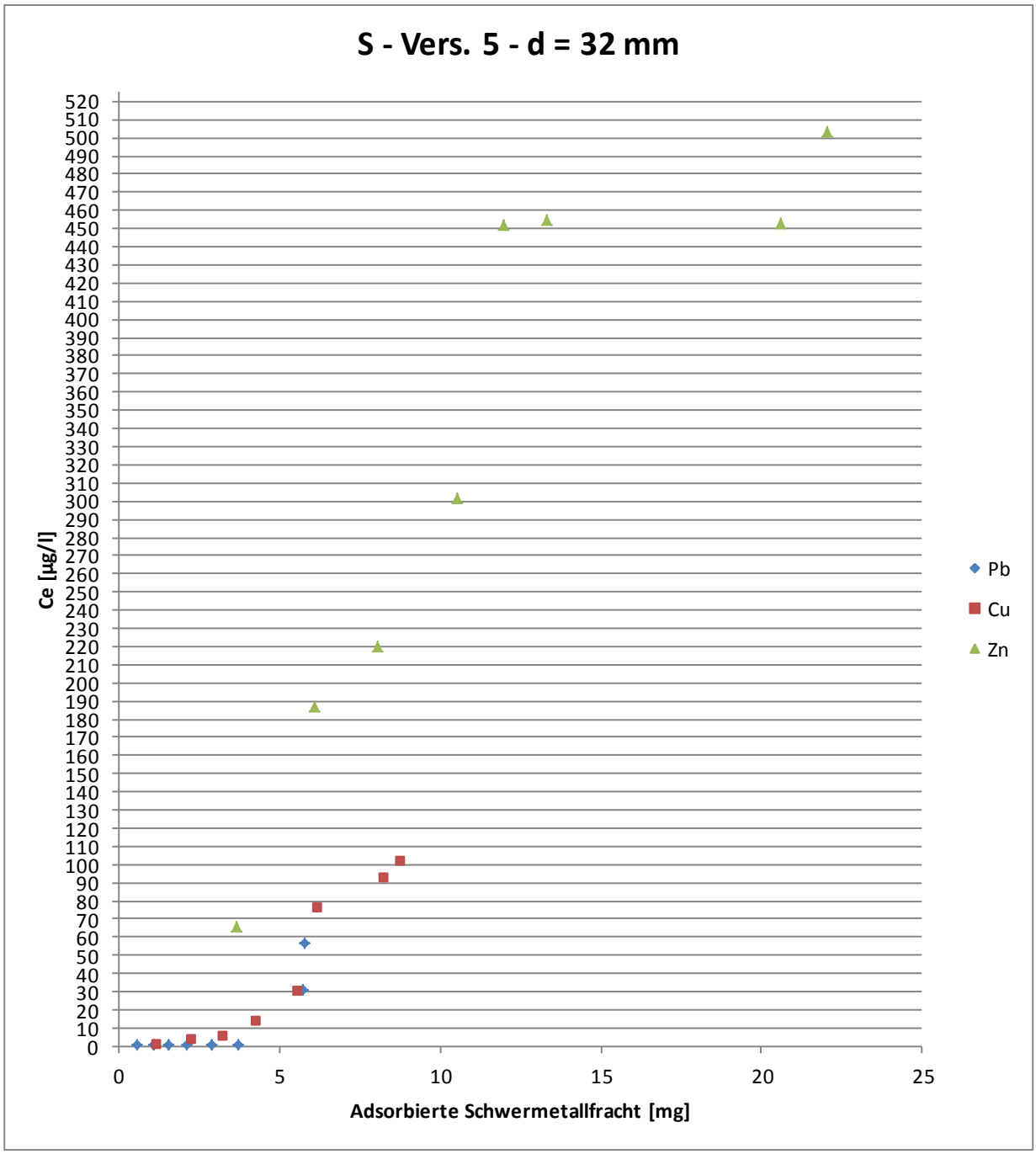


Abbildung 5-14: Adsorbierte Schwermetallfracht für S (Vers. 5) mit d = 32 mm

Auch hier ist der Unterschied in den aufgebrachten Schwermetallfrachten zwischen Versuch 4 und 5 erkennbar. Die aufgebrachten Schwermetalljahresfrachten entsprechen hier bei Versuch 5 für S ca. 23 Jahren für Pb, 24 Jahren für Cu und 24 Jahren bei Zn. Bei Versuch 4 liegen die Werte bei 40 Jahren für Pb, 42 Jahren für Cu und 50 Jahren für Zn. Die aufgebrachten Jahresfrachten sind also in Versuch 4 größer als in Versuch 5. Trotzdem liegen die Ablaufkonzentrationen bei einer Frachtbeladung von 5 mg in Abbildung 5-13 schon deutlich höher als beim selben Wert in Abbildung 5-14.

Als letzter Vergleichsparameter sind in Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 die Ergebnisse zu BA in Versuch 4 und 5 bei unterschiedlichen Säulendurchmessern dargestellt.

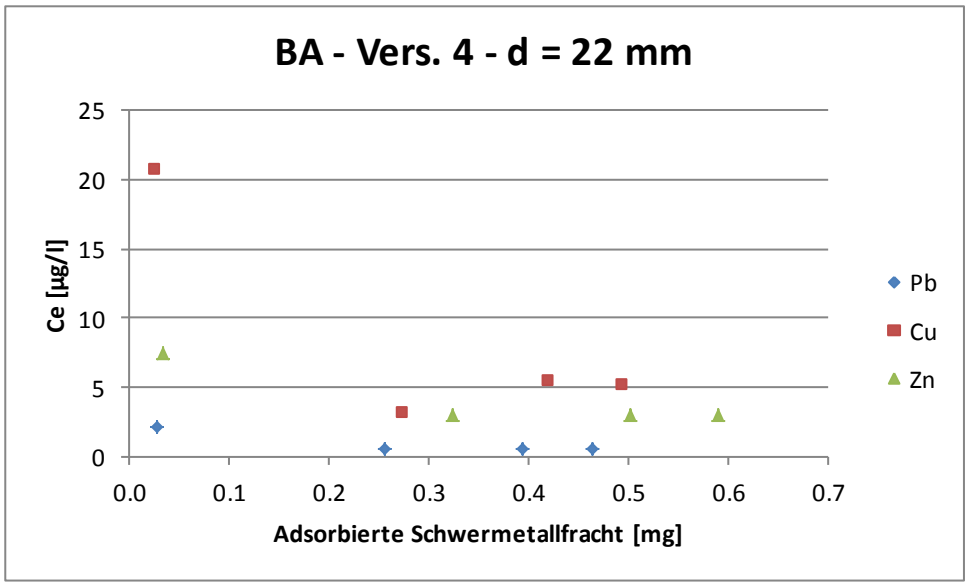


Abbildung 5-15: Adsorbierte Schwermetallfracht für BA (Vers. 4) mit d = 22 mm

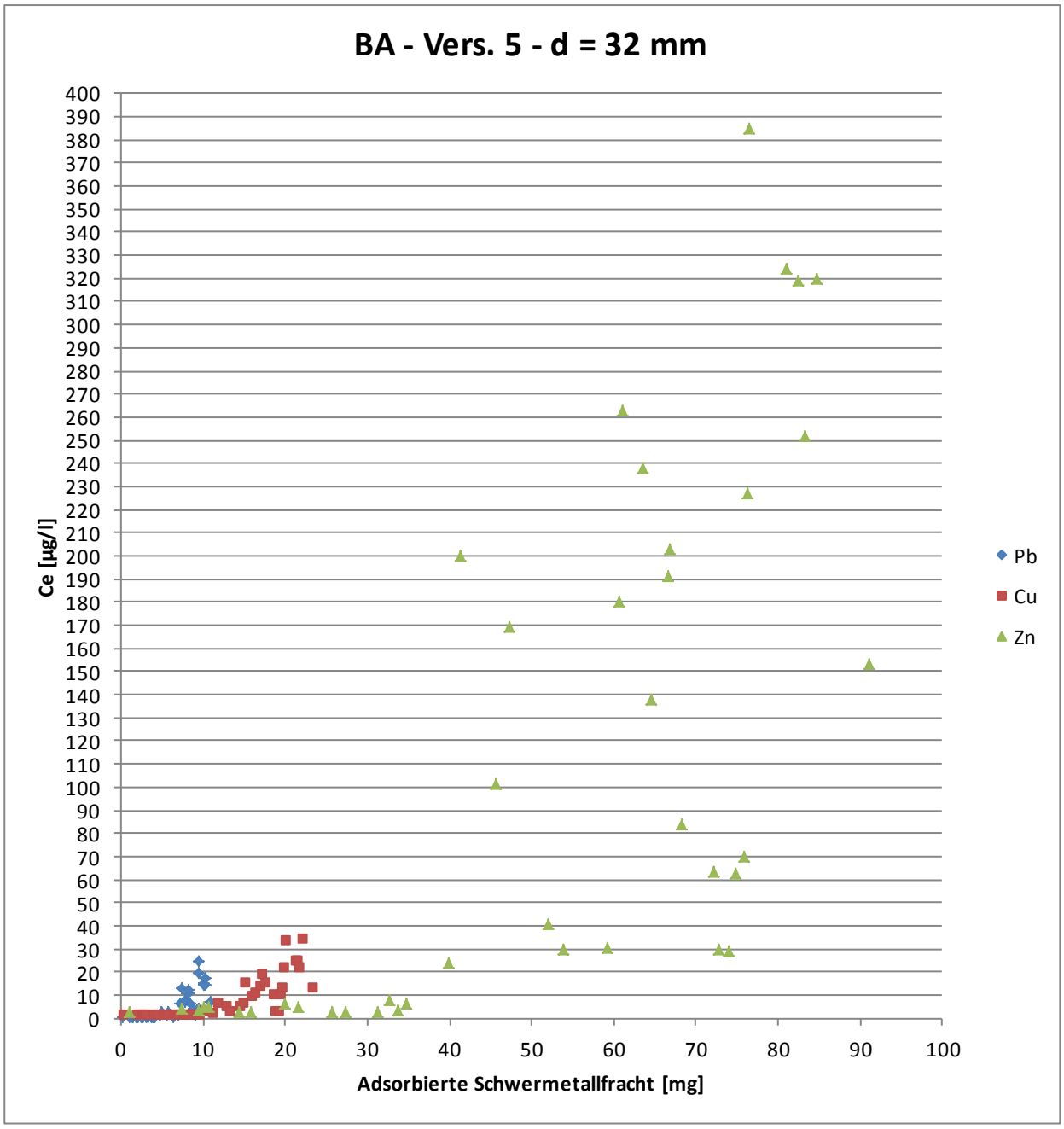


Abbildung 5-16: Adsorbierte Schwermetallfracht für BA (Vers. 5) mit d = 32 mm

Die aufgebrachten Schwermetalljahresfrachten entsprechen hier bei Versuch 5 für BA ca. 28 Jahren für Pb, 30 Jahren für Cu und 34 Jahren bei Zn. Bei Versuch 4 liegen die Werte bei 1,2 Jahren für Pb, 1,3 Jahren für Cu und 1,5 Jahren für Zn. Der Unterschied zwischen den aufgebrachten Jahresfrachten ist enorm. Aber auch hier liegen die Ablaufkonzentrationen bei einer Frachtbeladung von weniger als 1 mg in Abbildung 5-15 schon etwas höher als bei z.B. 5 mg in Abbildung 5-16.

Aus Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-16 geht also bei allen drei Versuchsparametern und sowohl bei S, TFIIb als auch bei BA hervor, dass sich der größere Durchmesser von 32 mm bewährt.

Die Säulen mit **Durchmesser 32 mm** erweisen sich also als **bessere Variante**. Es wurde ja auch in der Literatur erwähnt, dass das Größenverhältnis zwischen Korndurchmesser und Säulendurchmesser mindestens 1:10 betragen sollte, um Randeffekte minimal zu halten (Punkt 4.3.2). Dieses Verhältnis wird bei einem Durchmesser von 32 mm am ehesten erreicht. Außerdem erwies sich die Befüllung der kleinen Säulen (d = 13,4 mm) als äußerst schwierig,

vor allem mit BA, welches aus Korngrößen bis zu 11,2 mm besteht (Tabelle 4-4). Dies würde auch bei der Anlagenprüfung der Fall sein, wenn das eingesetzte Filtermaterial aus ähnlicher Zusammensetzung bestehen würde.

Außerdem wurde bereits unter Punkt 5.2.2 mehrfach unter Beweis gestellt, dass die Versuche mit dem größeren Durchmesser durchgeführt werden sollten.

5.2.4 Vergleich des Schwermetallrückhaltes durch verschiedene Beschickungsarten

In Versuchsreihe 6 und 7 wurden die Versuchssäulen jeweils einmal von oben (Versuchsreihe 6) und einmal von unten (Versuchsreihe 7) beschickt. Um zu erkennen, ob hierbei die Beschickung auf die Ergebnisse einen Einfluss hat, werden diese zwei Versuchsreihen miteinander verglichen.

Um den direkten Vergleich herstellen zu können, wurde in beiden Versuchsreihen das gleiche Filtersubstrat verwendet. Außerdem wurde bei beiden Versuchen mit einer Flussrate, welche dem ungefähren k_f-Wert des Materials entspricht, gearbeitet.

Um die Ergebnisse beider Versuchsreihen besser miteinander vergleichen zu können, wird auf den jeweiligen Ordinaten dasselbe Konzentrations-Maximum von 80 µg/l angesetzt. Zu beachten ist jedoch, dass das durchströmte Volumen in Versuchsreihe 6 um etwa 400 l höher war (Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18).

In Versuchsreihe 7 kam es vereinzelt zu Ausreißern, welche deutlich aus der Reihe der restlichen Werte fielen. Diese ungewöhnlichen Werte wurden Messfehlern und Digitalisierungsfehlern zugeschrieben und wurden durch plausible Werte ersetzt (siehe Anhang, Punkt 8.3).

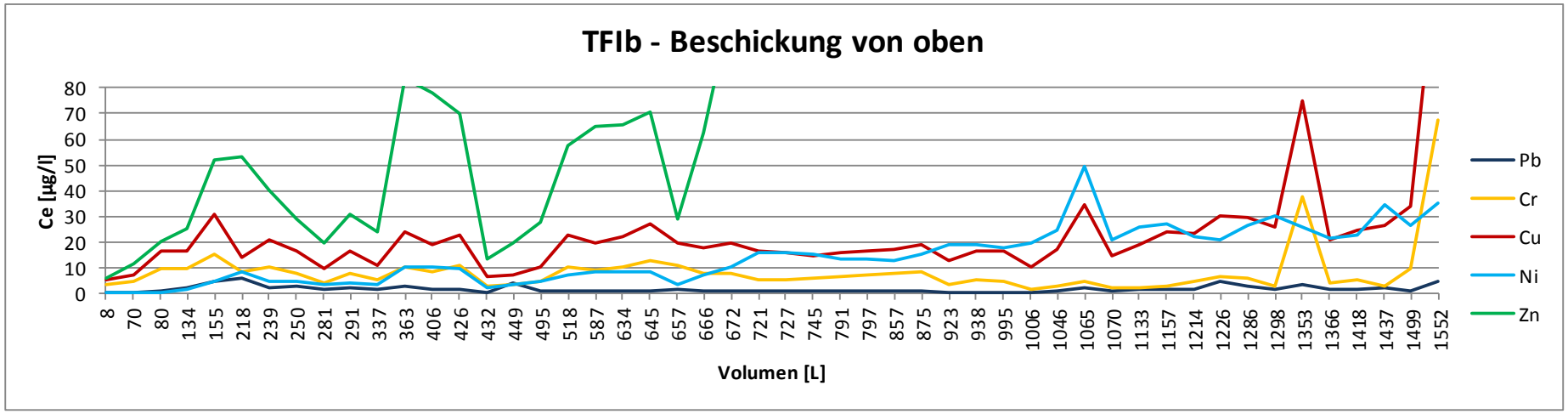


Abbildung 5-17: Versuchsreihe 6 – Beschickung von oben

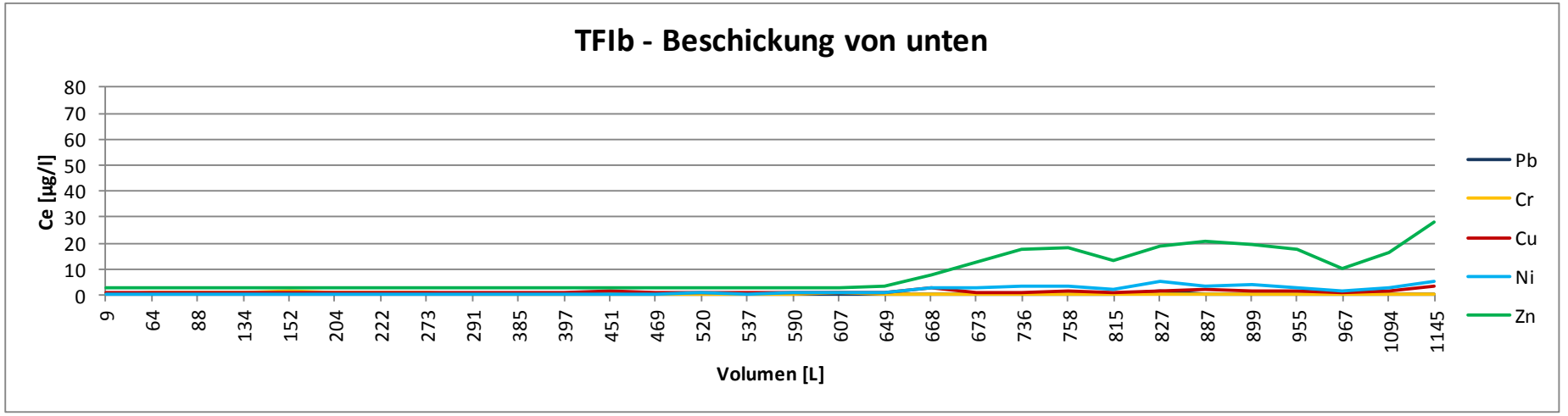


Abbildung 5-18: Versuchsreihe 7 – Beschickung von unten

Beim Vergleich wird deutlich, dass die Ablaufkonzentrationen bei der Beschickung von unten nach oben geringer ausfallen. Das kann den geregelteren Durchflussbedingungen zugeschrieben werden.

Außerdem wird ersichtlich, dass jeweils die Ablaufkonzentration für Zink bei beiden Abbildungen am schnellsten ansteigt. Das liegt aber an der höheren Eingangskonzentration von 400 µg/l für Zink (im Gegensatz zu Nickel und Chrom mit 50 µg/l und Blei und Kupfer mit 100 µg/l in der Zulauflösung). In Abbildung 5-18 übersteigt kein Wert eine Ablaufkonzentration von 30 µg/l, wobei in Abbildung 5-17 dieser Wert mehrmals überschritten wird. Dabei nimmt der Wert für Zink ab 666 l eine besonders hohe Konzentration an und steigt auf ca. 300 µg/l.

Das Kriterium von 9 µg/l für Blei wird jedoch in beiden Versuchsreihen nicht erreicht oder überschritten. Daraus lässt sich folgendes schließen: Bei einer Festlegung als Filteraustauschkriterium mit einer Bleikonzentration von 9 µg/l würden hierbei beide Filter das Kriterium nicht erreichen und wären somit für einen weiteren Einsatz zur Reinigung von Straßenabwässern geeignet. Doch wie in Abbildung 5-17 ersichtlich, erreichen die Konzentrationen der restlichen Schwermetalle sehr hohe Werte. Würden zum Beispiel die Schwellenwerte der Qualitätszielverordnung Grundwasser Chemie für Nickel (18 µg/l) und Chrom (45 µg/l) ebenfalls als Prüfkriterien herangezogen werden (BGBl. II Nr. 98/2010 idFd. BGBl. 461/2010), würden diese beiden Werte in Abbildung 5-17 jedenfalls überschritten werden und das Kriterium des Filteraustausches wäre erfüllt. Im Normvorschlag der Ad-hoc-Gruppe (Punkt 4.1.1) wird das Prüfkriterium für Blei als Kriterium festgelegt, da dieses als sensibelster (kleinster) Wert gilt. Jedoch muss überlegt werden, ob nach Betrachtung dieser beiden Abbildungen eine Erweiterung der Prüfkriterien des Filtertausches nicht sinnvoll wäre. Durch die komplexen Adsorptionsmechanismen der einzelnen Schwermetalle (Punkt 3.4) kann nicht erfasst werden, welche Schwermetalle bevorzugt wann und wie aufgenommen werden. Wird daher vorwiegend Blei durch das Filtersubstrat aufgenommen, können Konzentrationen anderer Schwermetalle trotzdem einen toxischen Wert erreichen und die Reinigungsleistung der Filteranlage wäre nicht ausreichend.

Eine Überlegung wäre, das Kriterium für Blei als einziges zu belassen, aber dafür die Schwermetalle Chrom, Kupfer, Nickel und Zink verpflichtend miterfassen zu lassen. Bei ersichtlich hohen Konzentrationen dieser sollte auf jeden Fall über einen Filteraustausch trotz Unterschreiten des Hauptkriteriums nachgedacht werden. Aufgrund dieser Überlegungen wurde auch in der Ad-hoc-Gruppe des ÖNORM Projektes zumindest eine Entfernungsrate für Kupfer (80%) und Zink (50%) festgelegt, welche neben Blei als Kriterium des Filtertausches gültig wird. Offen bleibt noch die Frage, ob für weitere Schwermetalle, wie für Chrom und Nickel, Prüfkriterien festgelegt werden sollten.

In Abbildung 5-17 wird zwar ersichtlich, dass auch hier mehrere Ausreißer vorhanden sind, wird jedoch das Gesamtbild betrachtet, wird klar, dass die Ablaufkonzentrationen im Gegensatz zu Abbildung 5-18 trotzdem deutlich höher liegen.

Eine Beschickung von oben entspricht zwar mehr der Realität, die Kapazität lässt sich jedoch unter den geregelten bzw. optimierten Versuchsbedingungen leichter und auch sicherer ermitteln. Die Versuchsbedingungen führen bei dieser Variante zu deutlich stabileren Ergebnissen. Somit wird auch das Ziel der einfachen Versuchsdurchführung erreicht (siehe Punkt 2). Eine **Beschickung von unten nach oben** ist daher **vorzuziehen**. Die Flussrate kann durch **Einstellen eines Vielfachen des k_f-Wertes** (in diesen Versuchen wurde mit einer Flussrate entsprechend ½×k_f-Wert gearbeitet) für den Vergleich mehrerer Filtersubstrate dienen.

5.2.5 Vergleich des Schwermetallrückhaltes anhand unterschiedlicher Flächenverhältnisse

Je nach Flächenverhältnis ergeben sich unterschiedliche Standzeiten des Filters. Zum Vergleich werden in den folgenden Abbildungen mehrere Ergebnisse im Verhältnis 1:15, 1:100 und 1:200 dargestellt.

Die orangen Pfeile markieren jenen Punkt, bei dem die in Punkt 4.1.1 erwähnten 4 Jahre zur Standzeitprüfung erreicht werden (im jeweiligen Flächenverhältnis dazu). Da die Versuchsdauer bei den Versuchsreihen 1 – 4 relativ gering war, werden Versuchsreihe 5 und 7 zur Darstellung herangezogen. Wie zum Beispiel in Abbildung 5-22 erkennbar, war hier die Versuchsdauer so gering, dass sich nur der Wert für ein Flächenverhältnis von 1:15 darstellen lässt. Lediglich bei der Darstellung für Sand wurden Werte der Versuchsreihe 4 entnommen, da Sand in Versuchsreihe 5 und 7 entweder nur kurz oder gar nicht erprobt wurde (Abbildung 5-19).

Als Bezugswert wird wiederum der von Blei herangezogen, da dieser als Prüfkriterium gilt (Punkt 4.1.1).

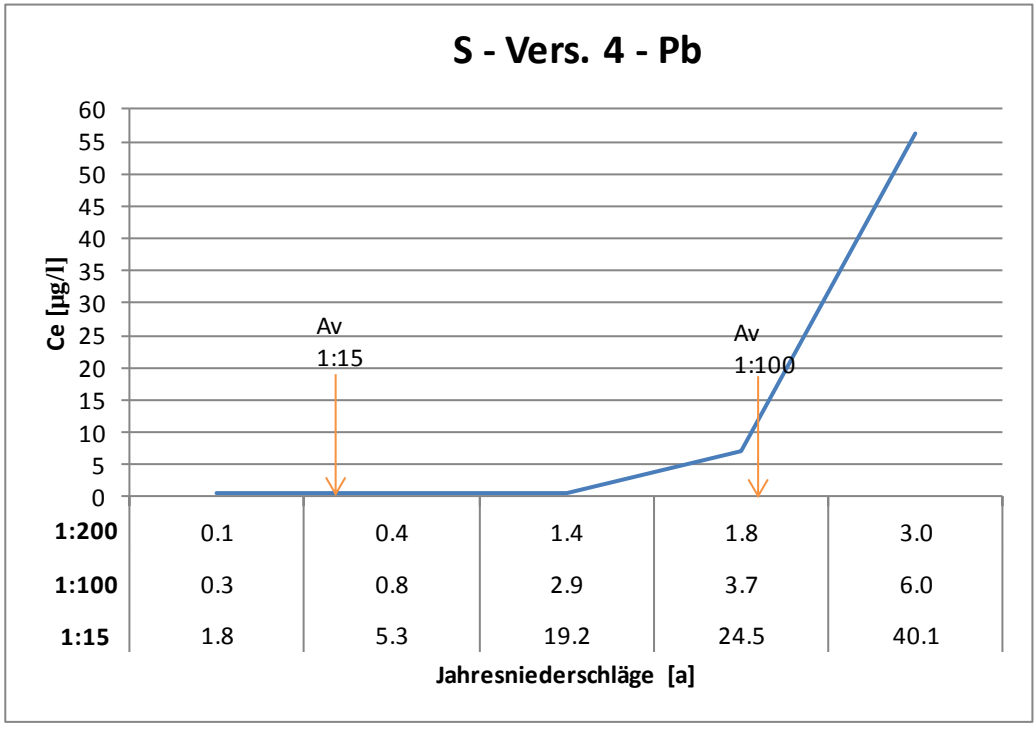


Abbildung 5-19: Vergleich der Flächenverhältnisse S – Versuchsreihe 4

In Abbildung 5-19 ist zu erkennen, dass die Versuchsdauer gering war und bei einem Flächenverhältnis von 1:200 nur bis 3 Niederschlagsjahre reicht. Deutlich wird außerdem, dass die Ablaufkonzentration noch vor Erreichen der 4-Jahres-Grenze bei A_v = 1:100 das Prüfkriterium übersteigt.

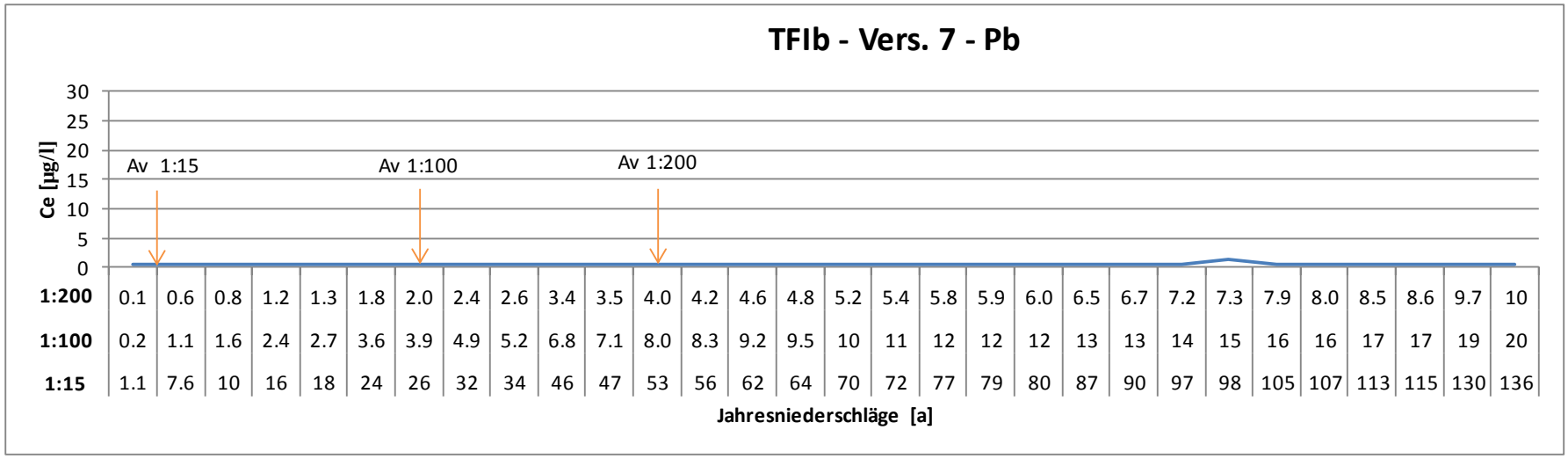


Abbildung 5-20: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIb – Versuchsreihe 7

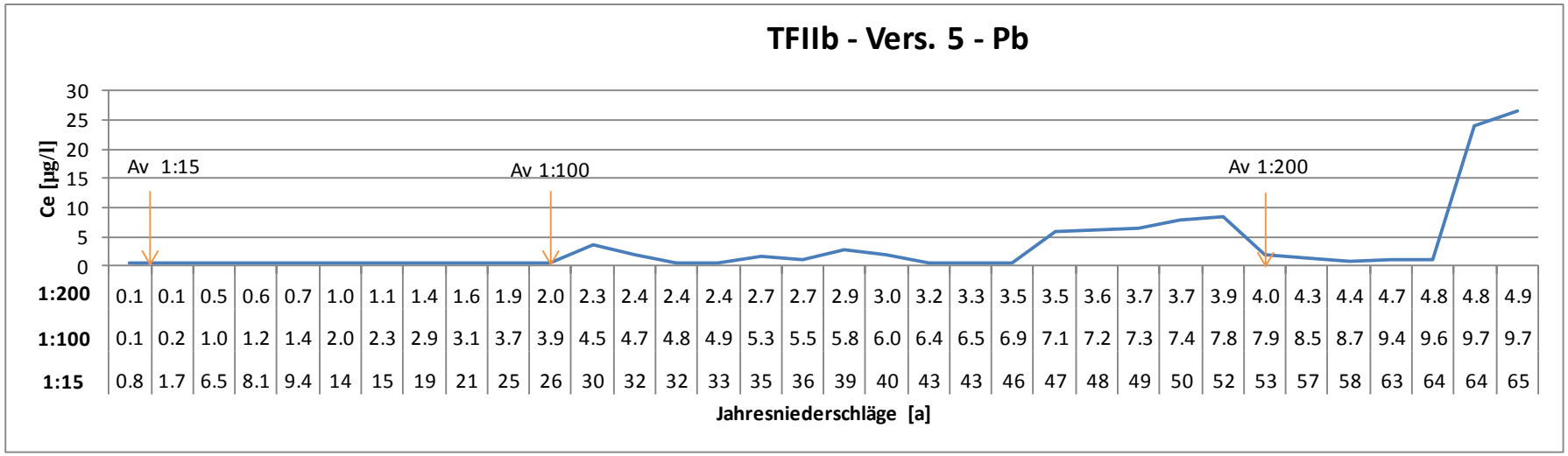


Abbildung 5-21: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIIb – Versuchsreihe 5

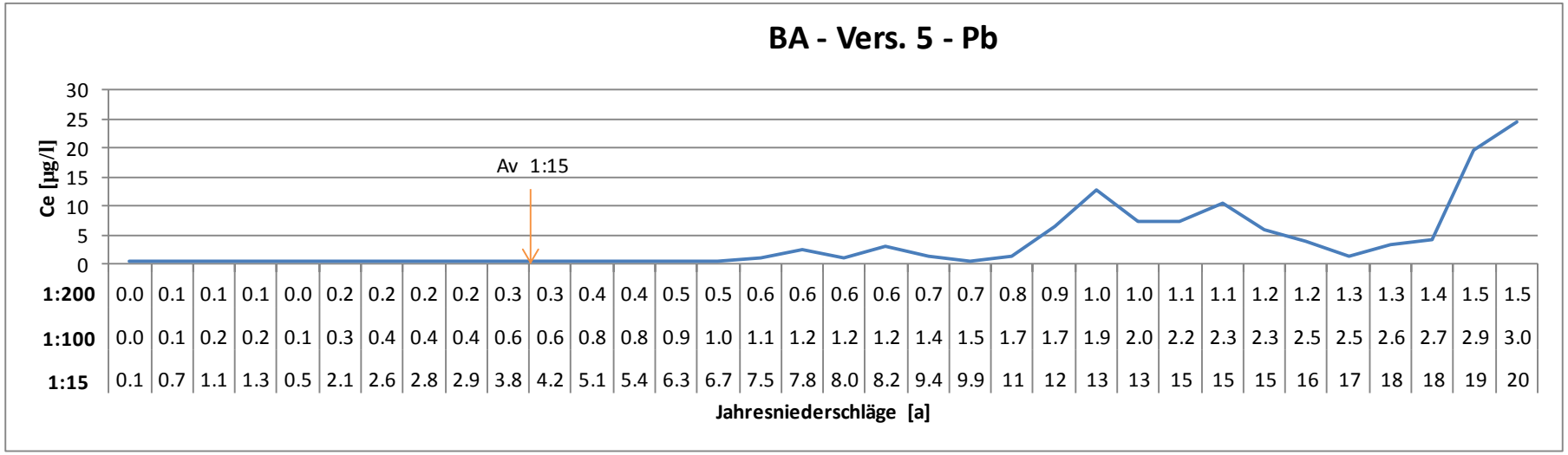


Abbildung 5-22: Vergleich der Flächenverhältnisse BA – Versuchsreihe 5

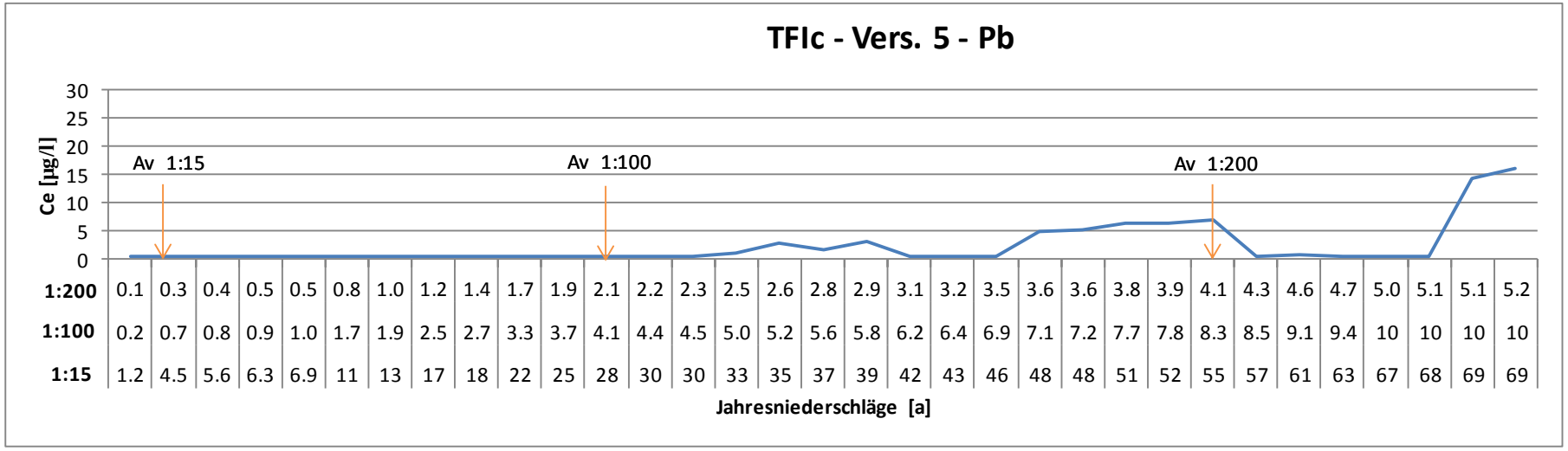


Abbildung 5-23: Vergleich der Flächenverhältnisse TFIc– Versuchsreihe 5

Zu erkennen ist, dass bei den Filtersubstraten TFIb, TFIIb und TFIc die Mindest-Standzeit von 4 Jahren zur Kapazitätsprüfung gewährleistet wäre, unabhängig ob bei einem Flächenverhältnis von 1:15, 1:100 oder 1:200. Filtermaterial BA würde die Prüfung bei 1:100 und 1:200 nicht bestehen (Abbildung 5-22). Laut Prüfparameter (Pb) würde der Boden bereits bei einer Standzeit von ca. 13 Jahren (1:15) bzw. ca. 2 Jahren (bei 1:100) und ca. 1 Jahr (bei 1:200) den Wert von 9 µg/l übersteigen (Abbildung 5-22). Als „Jahre“ sind hier die Jahresniederschlagsmengen gemeint.

Sowohl in z.B. Abbildung 5-22, als auch in Abbildung 5-23 fällt auf, dass die Kurve für die Ablaufkonzentration Peaks enthält und teilweise bei diesen das Prüfkriterium von 9 µg/l übersteigt, um nachher wieder unter diesen zu fallen. Diese Peaks können durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden, wie zum Bespiel durch eine plötzliche Änderung des pH-Wertes, welche die Ausfällung von Schwermetallen verursacht. Es könnte sich aber auch um Analysefehler oder Probenahmefehler handeln. Wichtig ist daher immer, im Probenahmeprotokoll Auffälligkeiten zu protokollieren und regelmäßig pH-Wert Messungen durchzuführen. Bei den in Abbildung 5-22 erkennbaren Peaks konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Auch der leichte Anstieg in Abbildung 5-23 (dieser erreicht jedoch noch nicht die 9 µg/l) basiert auf keinen besonderen Vorkommnissen, jedoch erfolgte der Anstieg zum selben Zeitpunkt wie bei BA, was z.B. mit einer pH-Wert Änderung im Zulauf zu tun haben könnte. Der pH-Wert wurde jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht gemessen.

Wenn die Ablaufkonzentrationen daher nur kurzzeitig das Prüfkriterium übersteigen und anschließend wieder geringere Werte annehmen (also ein Peak erkennbar ist), sollte nicht unbedingt davon ausgegangen werden, das dass Material nach Definition der Filtererschöpfung unzureichend ist (es könnte sich z.B. um mögliche Probenahmefehler handeln, dem ist aber unbedingt nachzugehen). Erst wenn die Ablaufkonzentrationen dauerhaft das Prüfkriterium übersteigen, kann vom Erreichen der definierten Filterkapazität gesprochen werden. Es wird daher empfohlen, bei Peaks den vorderen bzw. nachfolgenden Wert zu nehmen, den gleitenden Mittelwert zu bilden und diesen ermittelten Wert anstatt des Peaks heranzuziehen.

Aus dem Vergleich der verschiedenen Flächenverhältnisse ist nun folgendes herauszustreichen: Gewässerschutzanlagen arbeiten meist mit unterschiedlichen Flächenverhältnissen, daher ist es wichtig, die Prüfung immer auf das jeweilige Flächenverhältnis auszulegen.

5.2.6 Vergleich des Schwermetallrückhaltes anhand aller Versuchsreihen

Um nun ein Gesamtbild von den Säulenversuchen zu erhalten, werden in den nächsten Abbildungen einige Versuchsreihen miteinander verglichen. Dabei werden jeweils die Durchbruchkurven (als Durchbruch ist hier die Filtererschöpfung nach Punkt 4.1.2 (3) gemeint) über die Betriebsjahre (in dem Fall aufgebrachte Schwermetall-Jahresfrachten) dargestellt. Dabei kann gleichzeitig die Filterstandzeit abgeschätzt werden (Punkt 4.1.2).

Versuchsreihe 3

Es werden jeweils die Filtersubstrate TFIc, TFIIb und S in einer Abbildung dargestellt. Die Abbildungen werden in die eingesetzten Schwermetalle (Pb, Cr, Cu, Ni, Zn) unterteilt. Auch das Prüfkriterium des Filterdurchbruches (für Pb 9 µg/l) ist durch eine Linie markiert. Bei den Versuchsparametern Cr und Ni wurde auch ein Wert für den Filterdurchbruch festgelegt. Dieser basiert auf den Schwellenwerten der QZV Chemie GW und wurde wie unter Punkt 4.1.2 berechnet. Der Wert für Cu und Zi wurde über die Mindestrückhaltewirkungsgrade (für Cu mind. 80%, für Zn mind. 50%) festgelegt, ebenfalls unter Punkt 4.1.2 beschrieben.

Die Versuchslaufzeit entsprach einer Betriebszeit von ca. 9 Jahresfrachten bei einem Flächenverhältnis von 1:15.

In Abbildung 5-24 bis Abbildung 5-28 finden sich die Durchbruchkurven aus Versuch 3.

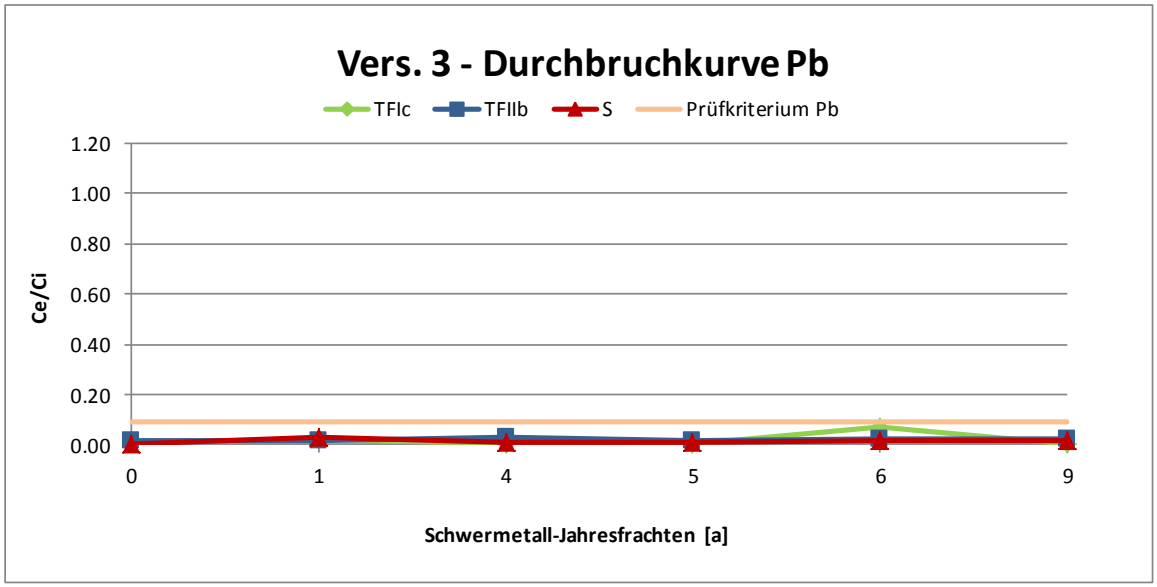


Abbildung 5-24: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Pb) – Vers. 3

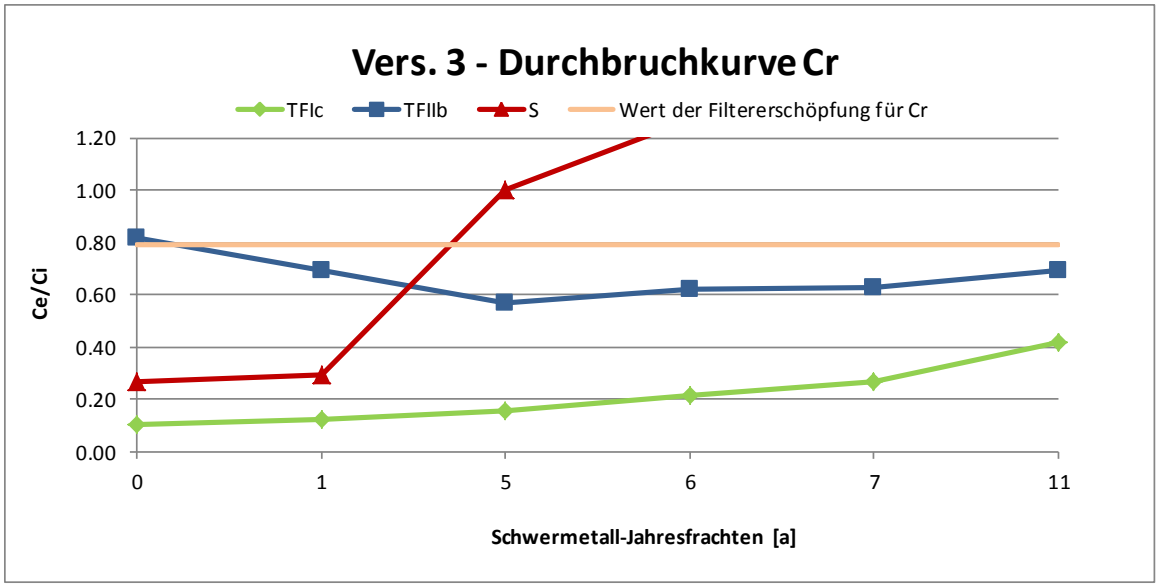


Abbildung 5-25: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Cr) – Vers. 3

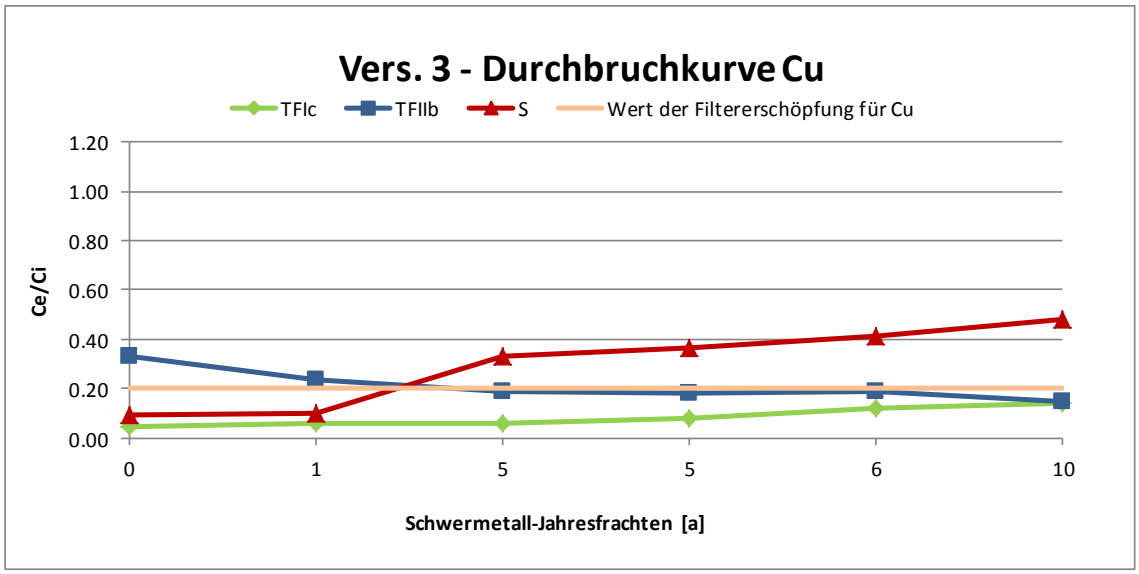


Abbildung 5-26: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Cu) – Vers. 3

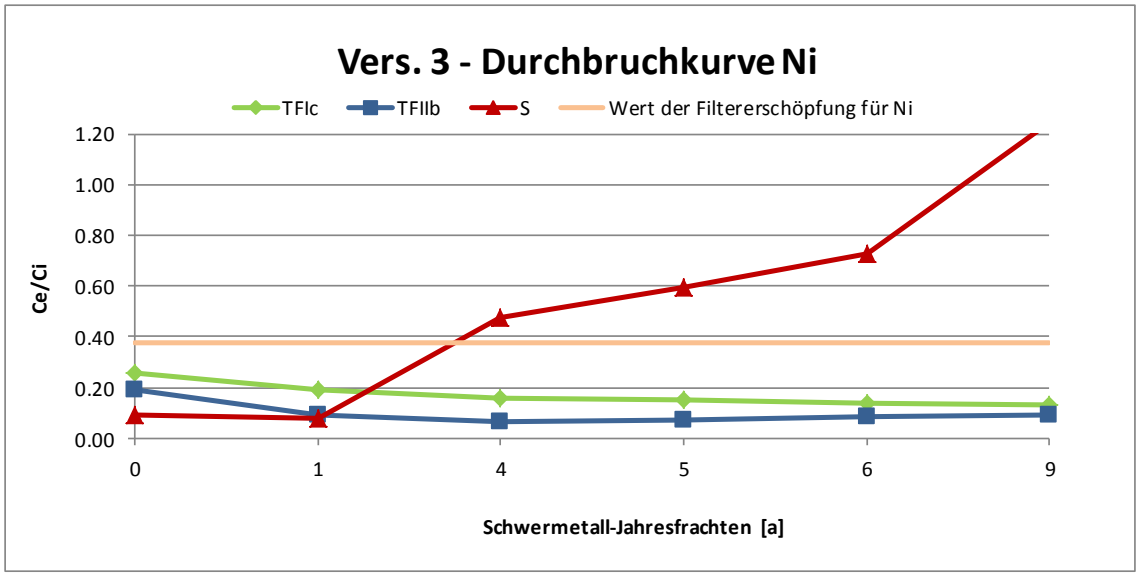


Abbildung 5-27: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Ni) – Vers. 3

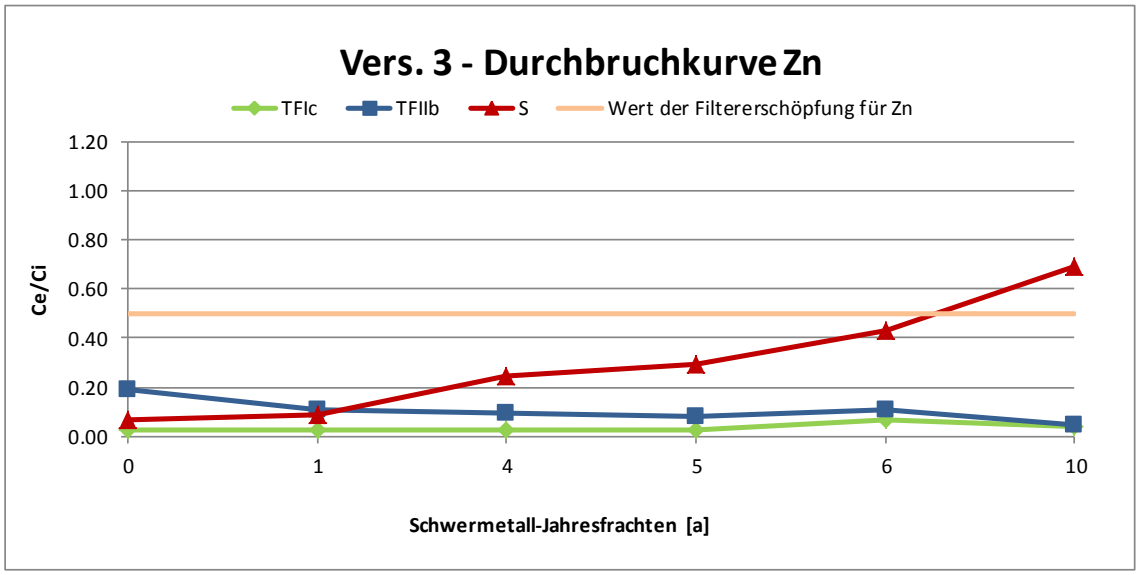


Abbildung 5-28: Durchbruchkurve für TFIc, TFIIb, S (Zn) – Vers. 3

Sofort fällt auf, dass die Durchbruchskurve für Sand bei fast jedem Schwermetall den Wert der Filtererschöpfung übersteigt, obwohl die Jahresfracht mit 9 – 11 Jahren deutlich geringer ist als in anderen Versuchen. Lediglich Blei übersteigt sein Prüfkriterium nicht (Abbildung 5-24). Dies ist wiederum ein Indiz dafür, dass Blei bevorzugt von den jeweiligen Materialien aufgenommen wird.

Alle technischen Filtermaterialen kommen nicht an den jeweiligen Wert der Filtererschöpfung bzw. an das Prüfkriterium für Pb heran, lediglich TFIIb liegt anfangs teilweise über dem Wert (Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26). Allgemein lässt sich bei TFIIb anfangs ein atypischer Verlauf erkennen: Normalerweise nimmt das Filtermaterial anfangs den Großteil der Spurenstoffe auf, mit der Zeit steigt im Ablauf die Schadstoffkonzentration kontinuierlich an, bis diese ihre Ausgangskonzentration erreicht hat (siehe Abbildung 3-6). TFIIb zeigt jedoch anfangs eine hohe Ablaufkonzentration, welche schnell geringer wird und später allmählich wieder ansteigt. Dies könnte auf Fehler bei der Probenahme zurückzuführen sein. Im Probenahmeprotokoll sind diesbezüglich jedoch keine Auffälligkeiten verzeichnet worden. Bei der Betrachtung anderer Versuchsreihen (z.B. Versuchsreihe 5, Abbildung 5-31), konnte dieser atypische Verlauf nicht beobachtet werden.

Versuchsreihe 5

Hier werden jeweils pro Filtersubstrat alle Schwermetalle (Pb, Cu, Zn) und deren Werte der Filtererschöpfung in einer Abbildung dargestellt. Die Versuchsdauer pro Filtermaterial war unterschiedlich lang, für Sand entsprach sie ca. 23 aufgebrachten Jahresfrachten, für TFIc ca. 87 – 100, für TFIIb ca. 83 – 95 und für BA ca. 28 – 34 Schwermetall-Jahresfrachten (Flächenverhältnis 1:15).

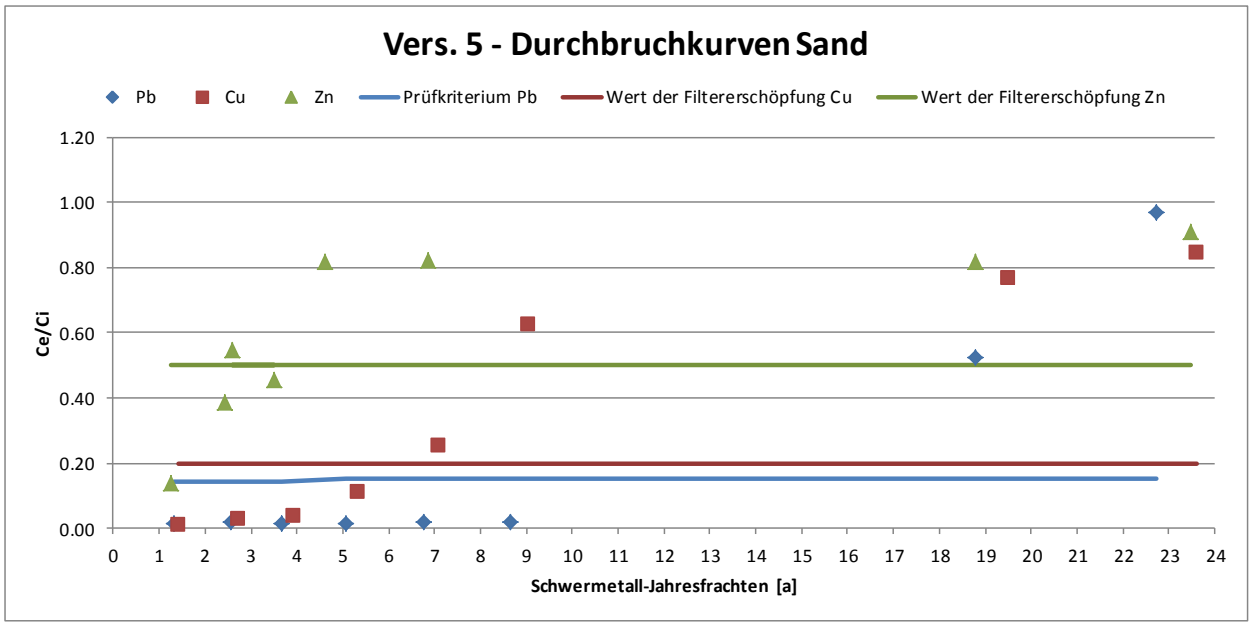


Abbildung 5-29: Durchbruchkurven für Sand – Vers. 5

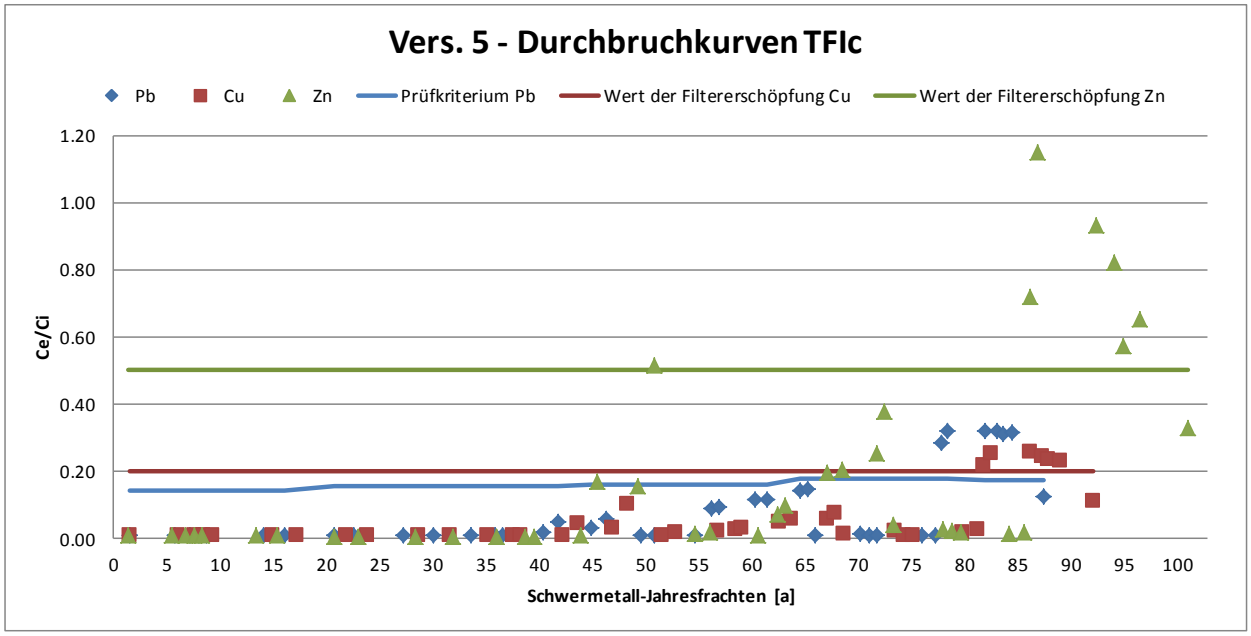


Abbildung 5-30: Durchbruchkurven für TFIc – Vers. 5

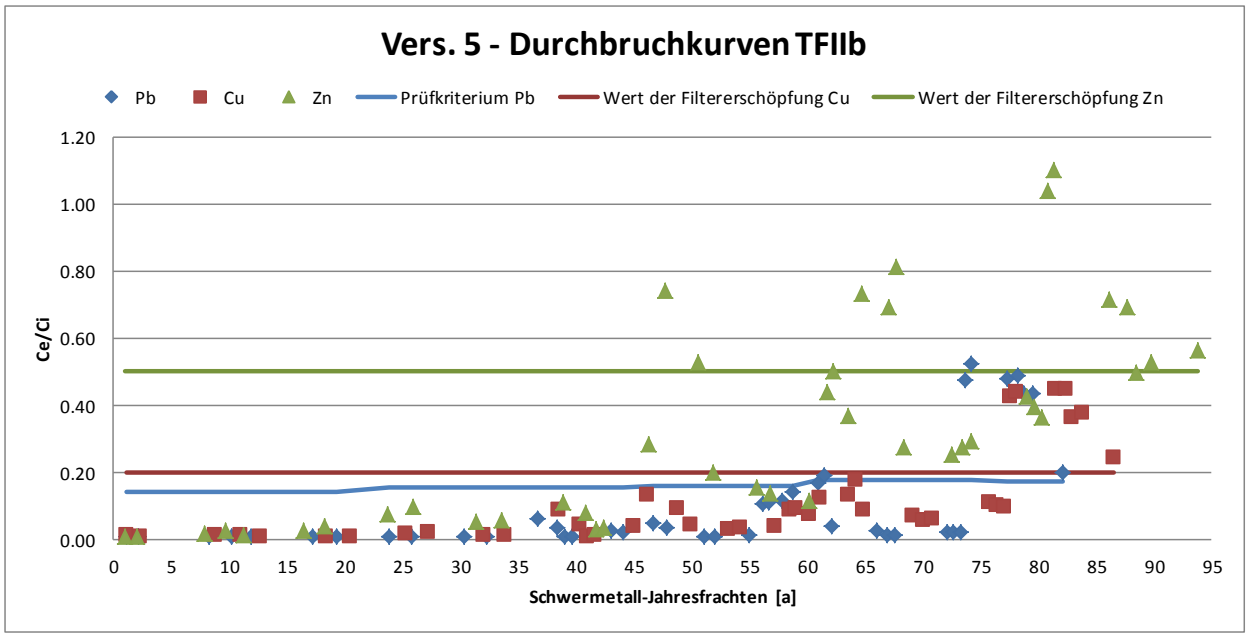


Abbildung 5-31: Durchbruchkurven für TFIIb – Vers. 5

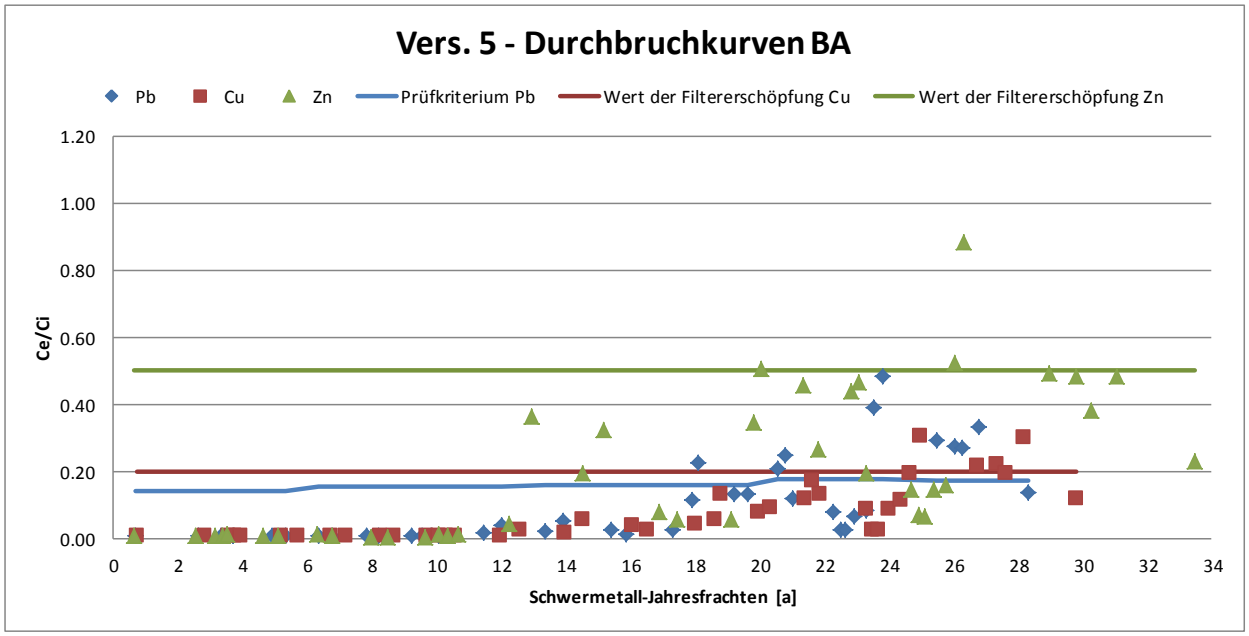


Abbildung 5-32: Durchbruchkurven für BA – Vers. 5

Deutlich erkennbar ist, dass bei dieser Versuchsreihe wiederum Sand am schlechtesten abschneidet und die jeweiligen Werte der Filtererschöpfung bereits in den ersten 7 aufgebrachten Schwermetallfrachtjahren, und das Prüfkriterium zwischen 9 und 19 Schwermetallfrachtjahren überschritten werden, im Gegensatz zu den anderen Filtersubstraten (Abbildung 5-29).

Die Kurven für TFIc, TFIIb und BA verhalten sich ziemlich ähnlich (Abbildung 5-30, Abbildung 5-31 und Abbildung 5-32). Auffallend ist hierbei, dass Zink teilweise sehr hohe Werte aufweist und bei allen drei Substraten den Wert der Filtererschöpfung als erstes überschreitet. Heraus zu streichen ist ebenfalls, dass ca. nach der Hälfte der Versuchsdauer bezüglich aller Schwermetalle ein kleiner Peak zu erkennen ist und es gegen Ende des Versuches ebenfalls zu

einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen kommt. Dieser Peak ist bei Zink am stärksten zu erkennen ist und fällt bei TFIc am höchsten aus (Abbildung 5-30).

Da diese Peaks bei TFIc, TFIIb sowie BA zu erkennen sind, lässt sich schließen, dass diese möglicherweise durch äußere Einflüsse bei den Versuchen verursacht wurden. Die gesamte Versuchsreihe 5 war durch verschiedenste Probleme fehlerbehaftet. Es kam vermehrt zum Undichtwerden von Zulaufschläuchen, zu Luftblasenbildungen und durch die Tatsache, dass vier Säulenversuche parallel liefen, musste die Zulauflösung sehr oft getauscht werden und es kam durchaus zu Vermischungen der einzelnen Zulauflösungen. Daraus resultieren Konzentrationsschwankungen und möglicherweise könnte sich dies auch negativ auf den pH-Wert ausgewirkt haben, was vielleicht zu unerwünschten Ausfällungen (durch Erhöhung des pH-Wertes) geführt haben könnte.

Das Probenahmeprotokoll (siehe Anhang, Punkt 8.3) wurde auf mögliche Fehlerquellen untersucht, welche diese Peaks ausgelöst haben könnten. Jedoch gab es zu diesen Zeitpunkten keinerlei Auffälligkeiten.

Würde bei diesen Darstellungen wiederum nur vom Filteraustauschkriterium von 9 µg/l für Blei ausgegangen werden, würde die Standzeit des Filters bei einem Flächenverhältnis von 1:15 für Sand zwischen 9 und 19, bei TFIc ca. 80, bei TFIIb ca. 60 und bei BA ca. 20 Betriebsjahre betragen.

Versuchsreihe 7

In dieser Versuchsreihe kam nur das Material TFIb zum Einsatz. In Abbildung 5-33 sind alle Schwermetalle (Pb, Cr, Cu, Ni, Zn), sowie deren Werte der Filtererschöpfung bzw. das Prüfkriterium für Pb in einer Darstellung zu finden. Die Versuchsdauer entsprach in etwa 160 Schwermetall-Jahresfrachten (A_v = 1:15).

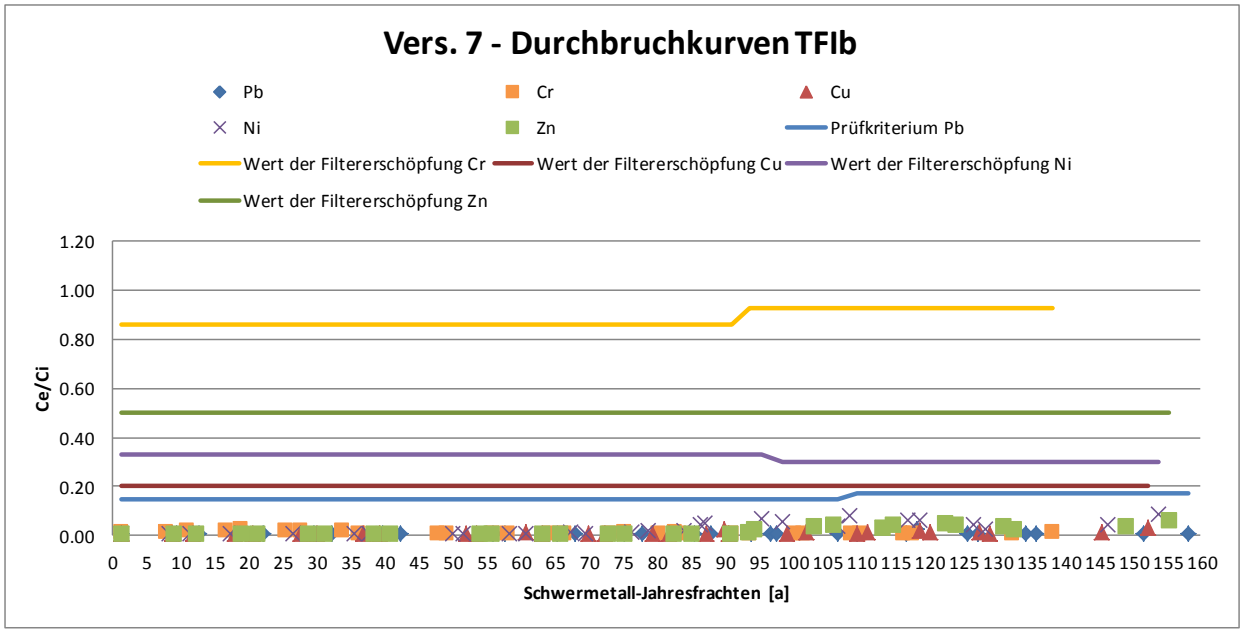


Abbildung 5-33: Durchbruchkurven für TFIb – Vers. 7

In Abbildung 5-33 ist auffallend, dass trotz der langen Versuchsdauer keine einzige Kurve ihren Wert übersteigt. Resultierend daraus kann vermutet werden, dass hier optimale Bedingungen für die Schwermetalladsorption vorherrschend sein mussten.

Werden nun alle Darstellungen der Durchbruchskurven verglichen, ist erkennbar, dass Versuchsreihe 7 am besten abschneidet. Und zwar nicht nur, weil die Werte unter dessen Wert der Filtererschöpfung bzw. des Prüfkriteriums bleiben, sondern weil allgemein von einem relativ konstanten Anstieg der Kurven gesprochen werden kann, sowie von relativ stabilen Versuchsbedingungen. Dies lässt auf eine optimale Versuchsdurchführung schließen.

Die Flussrate wurde bei Versuchsreihe 7 auf jene eingestellt, die der natürlichen Flussrate des k_f-Wertes entspricht. Der Säulendurchmesser lag bei 32 mm, die Höhe des Filtersubstrates bei 20 cm. Die Beschickung erfolgte von unten nach oben.

Daher kann für die Kapazitätsprüfung empfohlen werden, mit diesen Versuchsbedingungen zu arbeiten. Jedoch sollte nicht vergessen werden, dass deutliche Unterschiede in den Ergebnissen aufgrund der Beschickungsart herauszulesen sind. Im Feld werden Anlagen von oben nach unten durchströmt, eine realitätsnähere Prüfung wäre also, wenn die Beschickung im Labor genauso erfolgt. Aber wie bereits unter Punkt 5.2.4 erwähnt, lässt sich die Kapazität leichter und sicherer unter optimierten Versuchsbedingungen, welche bei der Beschickung von unten nach oben vorherrscht, ableiten.

5.2.7 Mögliche Einflüsse auf den Schwermetallrückhalt durch Unterbrechungen

Die Beschickung der Säulen erfolgte zwar meist kontinuierlich, doch an Wochenenden, bei Wiederauffüllung des Behälters oder bei sonstigen Problemen (z.B. Wechsel eines kaputten Pumpenschlauches) musste der Fluss unterbrochen werden. Dabei wurde der Regulierungshahn geschlossen und das Filtersubstrat während der gesamten Unterbrechung mit derselben Lösung eingestaut. Es wird nun untersucht, ob diese Unterbrechungen zu möglichen Konzentrationsverringerungen geführt haben können.

Dafür wird Versuchsreihe 6 betrachtet, da hier nur ein Material (TFIb) erprobt wurde. In Abbildung 5-34 ist der Konzentrationsverlauf nach Probenahme für TFIb graphisch dargestellt.

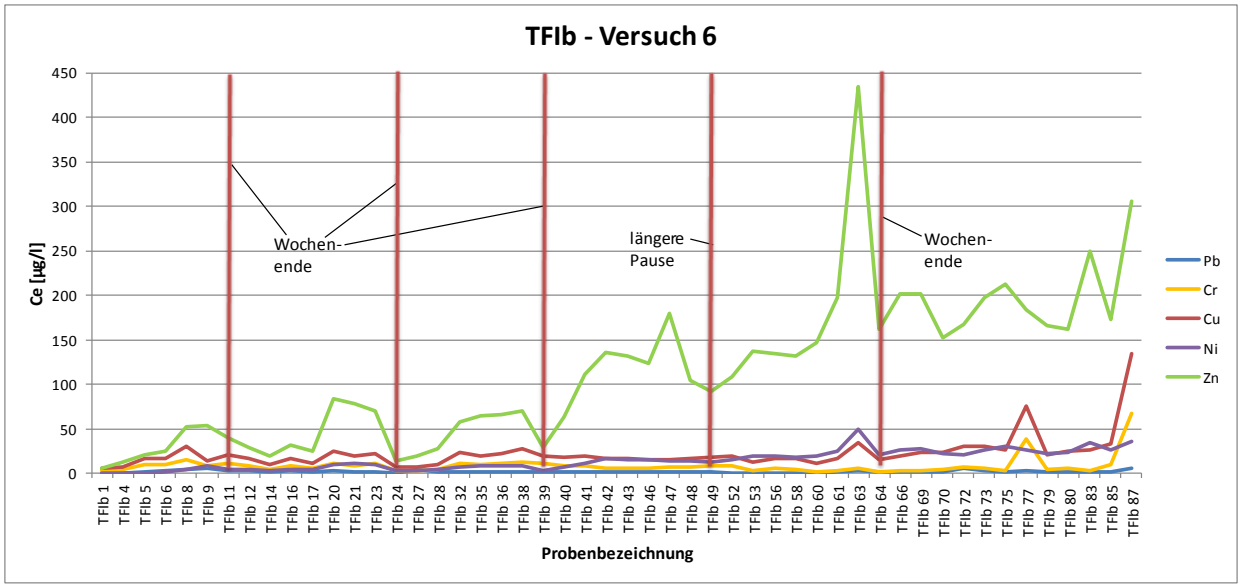


Abbildung 5-34: Darstellung des Einflusses von Unterbrechungen anhand Versuchsreihe 6 (TFIb)

In Abbildung 5-34 sind Wochenendunterbrechungen sowie eine längere Pause (5 Tage) mittels einer roten Linie markiert. Unterbrechungen durch Behälterauffüllung sind in dieser Abbildung nicht aufgezeichnet. Da diese jeweils von recht kurzer Dauer waren (ca. ½ h), wurden meist

gleichbleibende Konzentrationen bzw. geringfügige Anhebungen/Absenkungen der Konzentrationen beobachtet.

Wenn lediglich die Kurve für Zink in Abbildung 5-34 betrachtet wird, erscheinen Konzentrationsrückgänge aufgrund von Unterbrechungen plausibel. Bei den anderen Parametern heißt eine Unterbrechung nicht unbedingt auch eine Konzentrationsverringerung. Außerdem ist zu beachten, dass oftmals auch bei Zink Peaks bzw. Konzentrationsschwankungen zu verzeichnen sind, bei denen keine längere Unterbrechung stattfand.

5.2.8 Mögliche Einflüsse auf den Schwermetallrückhalt durch den pH-Wert

Wie bereits unter Punkt 5.2 beschrieben, wurde der pH-Wert im Ablauf während Versuchsreihe 1 bis 4 nicht gemessen bzw. protokolliert. Deswegen kann nur auf mögliche Einflüsse bei Versuchsreihe 5 bis 7 eingegangen werden.

In Versuchsreihe 5 liegt der pH-Wert im Mittel bei 9,4 für BA und TFIc, bei 9 für TFIIb und bei 7,3 für S (Einzelmessung).

In Abbildung 3-1 wurden die Löslichkeiten einzelner Schwermetalle bei unterschiedlichen pH-Werten dargestellt. Bei pH 7,3 liegt der Großteil der hier eingesetzten Schwermetalle gelöst vor. Bei pH 9 – 9,4 liegen die Schwermetalle Pb, Cu, Ni und Zn jedoch hauptsächlich partikulär vor. Auch mögliche Komplexbildungen (siehe Abbildung 3-2) können dabei nicht ausgeschlossen werden. Das heißt, die gemessene Ablaufkonzentration fiel zu dieser Zeit vermutlich etwas niedriger aus, da nur gelöste Anteile gemessen werden. Der pH-Wert wurde nicht durchgehend über die ganze Versuchsreihe gemessen, sondern nur Anfangs (zwischen 6 und 25 Jahresniederschlägen bei BA). Er blieb dabei aber relativ stabil. Deswegen können dadurch wenig Aussagen über mögliche Einflüsse des pH-Wertes getroffen werden. Eine mögliche Begründung für den Anstieg des pH-Wertes (dieser liegt ja in der Zulauflösung bei ca. 5,8) liegt vermutlich in den Materialkomponenten, z.B. Karbonat-Anteile in technischen Filtermaterialien.

In Versuchsreihe 6 reicht der pH-Wert für TFIb von 6,9 bis 9,7 (im Mittel 7,8) und in Versuchsreihe 7 für TFIb von 8,2 bis 9,3 (im Mittel 8,6). Obwohl in beiden Versuchsreihen die gleichen Materialien verwendet wurden, liegt der pH-Wert im Mittel in Versuchsreihe 7 viel höher. Geht man nun wiederum von Abbildung 3-1 aus, lagen vermutlich mehr Schwermetalle in Versuchsreihe 6 gelöst vor als in Versuchsreihe 7, das heißt die gemessenen Ablaufkonzentrationen sollten in Versuchsreihe 6 höher liegen. Vergleicht man diese Annahme mit Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18, lässt sich diese bestätigen. Ob die Konzentrationsunterschiede tatsächlich auf den pH-Wert zurückzuführen sind, kann jedoch nicht mit Sicherheit bestätigt werden.

Wird zum Beispiel eine bestimmte pH-Wert Änderung in Versuchsreihe 6 betrachtet (z.B. Änderung von pH 9,2 auf 7,3 zwischen Probe TFIb 5 und TFIb 8), kann ein Anstieg der Ablaufkonzentration beobachtet werden, was die oben angeführte Aussage bestätigt. Nach dem Abfall des pH-Wertes zwischen diesen zwei Proben blieb der pH-Wert in dieser Versuchsreihe relativ stabil.

Auch in Versuchsreihe 7 kam es zwischen Probe TFIbU 17 und TFIbU 23 zu einem Anstieg von pH 8,2 auf 9,1 (danach war dieser wieder relativ stabil). Jedoch waren in dieser Versuchsreihe zu diesem Zeitpunkt keine Veränderungen bezüglich der Ablaufkonzentration zu beobachten.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Wichtig bei der Durchführung der Säulenversuche für die Prüfmethode ist die regelmäßige Kontrolle des pH-Wertes. So können Konzentrationsschwankungen aufgrund des pH-Wertes detektiert bzw. ausgeschlossen werden. Es empfiehlt sich, bei jeder Probenahme den pH-Wert im Ablauf zu kontrollieren.

5.2.9 Vergleich mit Literaturdaten

Unter den folgenden Punkten wird auf einige Aspekte in der Literatur, welche die Prüfmethode beeinflussen, eingegangen und mit den vorhandenen Ergebnissen aus Versuchen dieser Arbeit gegenüber gestellt.

(1) Säulendurchmesser

Es wurden schon Versuche mit geringerem Durchmesser erfolgreich durchgeführt, wie zum Beispiel in *Hilliges* (2007). Hier wurden Säulen mit einem Durchmesser bis ca. 12,5 mm verwendet (Rückschluss durch Verhältnis von Korndurchmesser zu Säulendurchmesser von 1:5 bei vorliegendem Korndurchmesser von 1 – 2,5 mm). Auch *Popuri et al.* (2009) hat Säulen mit einem Durchmesser von 2,5 cm verwendet. Beide Versuche wurden als effizient eingestuft und Randeffekte konnten ausgeschlossen werden. Diese hängen jedoch auch von der Art des Filtersubstrates ab. Da die Korngrößen der hier untersuchten Materialien deutlich höher lagen (bis zu 11,2 mm; Punkt 4.3.1) und die Ablaufkonzentrationen der kleinen Säulen (d = 13,4 mm) schwer interpretierbar waren, wurde der Säulendurchmesser auf 32 mm angehoben.

(2) Filtersubstrate

Es existieren zahlreiche Studien, in denen Versuche mit technischen Filtermaterialien durchgeführt wurden. In diesen werden zeolithhältige und kohlehältige Substrate als geeignete Materialien für die Entfernung von Schwermetallen bestätigt. Unter anderem finden sich Materialien wie Zeolith-Klinoptiolith (Vukojević Medvidović et al., 2005), Lignit (Hilliges et al., 2013), Aktivkohlegranulat (Dwivedi et al., 2008), Chitosan (Popuri et al., 2009) usw. Die spezifisch großen Oberflächen und die dadurch großen Adsorptionsfähigkeiten sowie deren billige Herstellungsweisen sprechen für den Einsatz dieser Materialien bei der Reinigung von Straßenabwässern.

Auch in den hier durchgeführten Versuchen wurden in den technischen Filtermaterialien Zusätze aus zeolithischen und kohlehältigen Materialien verwendet. Im Vergleich der technischen Materialien mit Quarzsand und Bodenfiltermaterial schneiden diese Substrate in allen Versuchsreihen deutlich besser ab, was die Ergebnisse aus der Literatur bekräftigt.

(3) Durchflussraten

Aus vielen Studien geht hervor, dass je geringer die Durchflussrate ist (also je höher die Kontaktzeit), desto besser ist die Adsorption. *Jochová et al.* (2003) hat zum Beispiel Säulenversuche mit einem Innendurchmesser von 1 cm und einer Höhe von 23 cm durchgeführt, in dem er kohlehältiges Material mit einer Zinklösung (c = 18 mmol/l) beschickt hat. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Flussraten (Q = 0,318/0,688/1,334 cm/min) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten bei der geringsten Flussrate die höchste Effizienz. *Jochová et al.* (2003) erklärt dieses Phänomen damit, dass der Diffusionsprozess nur langsam vor sich geht, welcher die Sorptionskinetik steuert. Somit braucht das Material mehr Zeit um Schwermetalle effizient zu binden.

Auch *Dwivedi et al.* (2008) hat ähnliche Ergebnisse vorzuweisen (Abbildung 3-7).

Bei den Säulenversuchen im Zuge dieser Arbeit wurden ebenfalls unterschiedliche Flussraten eingestellt. Bei den Versuchen mit Säulendurchmesser d = 13,4 mm wurden z.B. Durchflussraten von 20 ml/min, 7 ml/min und 4,8 ml/min eingestellt. Da die geringere Flussrate und somit die längere Kontaktzeit nicht unbedingt eine bessere Adsorptionsleistung zeigte (Punkt 5.2.2), wurde dies auf einen zu geringen Säulendurchmesser zurückgeführt.

Durch Anhebung des Säulendurchmessers auf 32 mm wurden allgemein stabilere Ergebnisse verzeichnet.

Für die Prüfung der Kapazität sollte diese möglichst realitätsnah durchgeführt werden. Also wurde in den letzten beiden Versuchsreihen der Durchfluss entsprechend dem k_f-Wert des Materials eingestellt. Die Ablaufkonzentrationen sind stabil und erfüllen die Prüfungsanforderungen (Prüfkriterium von 9 µg/l Pb), weshalb auch die Prüfung auf den k_f-Wert abgestimmt werden sollte.

(4) Unterbrechungen

Wie unter Punkt 5.2.7 geschildert, konnte gerade bei Zink durch Unterbrechungen der Beschickung (durch Wochenenden, längere Pausen) Konzentrationsverringerungen beobachtet werden. Jedoch traten Verringerungen auch dann auf, wenn keine offensichtliche Unterbrechung stattgefunden hat. *Hilliges* (2007) hat ebenfalls Säulenversuche zur Beobachtung von nächtlichen Unterbrechungen durchgeführt (Punkt 3.7.3 unter (3)). In Abbildung 3-10 waren Absenkungen nach nächtlichen Unterbrechungen ersichtlich. Wird diese mit Abbildung 5-34 verglichen, wird deutlich, dass die Konzentrationsschwankungen in Abbildung 3-10 viel markanter sind, da die restliche Kurve relativ stabil verläuft. Die Kurve in Abbildung 5-34 unterliegt dabei mehreren, kleineren Konzentrationsunterschieden, welche auch ohne Unterbrechungen hervorgerufen wurden. Außerdem ist zu beachten, dass die Unterbrechungen in Abbildung 3-10 jeweils nur über Nacht stattgefunden haben, während diese in Abbildung 5-34 teilweise über 60 Stunden betragen haben, bzw. auch 5 Tage. Die Konzentrationsverringerungen wären also viel markanter zu erwarten gewesen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es durchaus zu Konzentrationsverringerungen aufgrund von Unterbrechungen kommen kann, doch auch andere (nicht bekannte) Faktoren können die Ablaufkonzentrationen in ähnlichem Ausmaß beeinflussen bzw. verringern. Daher wird auf diese Eigenschaft bei der Auslegung der Prüfmethode nicht extra Rücksicht genommen. Sehr wohl zu beachten ist aber, dass bei Anlagen in der Realität durch Pausen zwischen Regenereignissen die Kapazität durchaus höher liegen kann (durch einstellende Gleichgewichte bei langsamen Diffusionsprozessen während den Pausen).

5.3 Ergebnisse und Interpretation - Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes mit Toluol

5.3.1 Vergleich der Laborversuche

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Toluolversuche dargestellt.

Tabelle 5-19: Ergebnisse Toluolversuche Versuch 6-8

TFIIb Vers. 6	Konzentration mg/l	TFIb Vers. 7	Konzentration mg/l	S Vers. 8	Konzentration mg/l
Zulauf 1	12.6	Zulauf 1	13.2	Zulauf 1	11.4
Zulauf 3	23.1	Zulauf 3	12.6	Zulauf 3	10.6
Zulauf 5	19.6	Zulauf 5	10.1	Zulauf 5	11.4
Ablauf 1	5.5	Ablauf 1	5	S 1	11.1
Ablauf 2	6.4	Ablauf 2	4.4	S 2	11
Ablauf 3	18.5	Ablauf 3	4.9	S 3	10.9
Ablauf 4	20.8	Ablauf 4	4.7	S 5	10.2
Ablauf 5	25.5	Ablauf 5	1.6	S 7	9.1
Ablauf 6	18.8	Ablauf 6	1.6		

Tabelle 5-20: Ergebnisse Toluolversuche 9 und 10

TFIc Vers. 9	Konzentration mg/l	BA Vers. 10	Konzentration mg/l
Zulauf 1	19.9	Zulauf 1	11.4
Zulauf 3	12.6	Zulauf 3	13.9
TFIC 1	13.3	Zulauf 5	13.2
TFIC 2	11.3	Ablauf 1	8.2
TFIC 3	15.6	Ablauf 2	9.4
TFIC 4	14.1	Ablauf 3	7.6
TFIC 5	12.7	Ablauf 4	8.5
TFIC 6	12		

Anmerkung: Die hier dargestellten Ergebnisse stammen nur aus den Versuchen 6-10, da die Versuchsbedingungen der vorherigen Versuche nicht optimal verliefen und daher eine (unter anderem teure) Analyse als relativ sinnlos erschien.

Es wurden jeweils ein bis drei Zulaufproben genommen um mögliche Verflüchtigungen des Toluols zu erkennen. Die Eingangskonzentration liegt bei allen Versuchen bei 25 mg/l Toluol. Jedoch wird diese bei allen Versuchen bereits am Anfang teilweise stark unterschritten.

Teilweise liegen Ablaufkonzentrationen über der Eingangskonzentration, zum Beispiel bei Versuch 6 (Tabelle 5-19).

Eine mögliche Begründung für diese Ergebnisse ist die Verdampfung des Toluols noch bevor oder während die Probe gezogen wird, obwohl die Löslichkeit von Toluol in Wasser bei 470 mg/l liegt (bei 20°C). Außerdem kann keinerlei Auskunft darüber gegeben werden, wo dieser Anteil des Toluols verdampft. Dies kann schon bei der Entnahme aus dem Zulaufbehältnis passieren, aber auch in den Zulaufschläuchen, sowie vor Eintritt in die Probeflaschen.

Die Gründe für die teilweisen Überschreitungen der Ablaufkonzentrationen über die Zulaufkonzentrationen sind nicht klar. Möglicherweise kam es bei den Zulauf-Probenahmen bzw. bei der Probenmanipulation zur Verdampfung eines Teiles des Toluols und die

Konzentration der Flüssigkeit, die eigentlich durch die Filtersäule geleitet wird, weist einen viel höheren Wert auf.

Unklar bleibt auch, ob sich die Ablaufkonzentrationen auf einen Rückhalt in der Versuchssäule zurückführen lassen, oder ob es hier nur zu einer weiteren Verdampfung des Toluols gekommen sein könnte.

Bessere Rückschlüsse könnten gezogen werden, indem die Versuchsbedingungen so verändert werden, dass eine Verdampfung aus dem Zulaufbereich ausgeschlossen werden kann und somit die Konzentration der Zulaufproben in etwa der angesetzten Konzentration entspricht.

5.3.2 Vergleich mit Literaturdaten

In verschiedenen Studien wurde Toluol als Prüfsubstanz für Mineralölkohlenwasserstoffe verwendet und dessen Adsorptionsfähigkeit untersucht. *Ghiaci et al.* (2004) hat dazu Batchexperimente an Zeolithmaterial durchgeführt und dessen Adsorptionskapazität als effizient klassifiziert.

In früheren Versuchen, welche vom Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz im Zuge des ÖNORM Projektes durchgeführt wurden, wurden ebenfalls Batchexperimente mit Toluol arrangiert. Die Ergebnisse zeigten, dass die Löslichkeit für Toluol in etwa bei 400 mg/l liegt, diese Konzentration war jedoch nicht ausreichend um das Material zu sättigen. Eine Verringerung der Substratmenge wurde überlegt, da jedoch bei Batchversuchen die Substratmenge nicht unter 2-5 g fallen sollte, war es nicht möglich, eine Sättigung im Zuge von Batchversuchen mit Toluol zu erreichen.

In den Säulenversuchen wurde nun erforscht, ob Toluol als Ersatz für Mineralölkohlenwasserstoffe auch in Säulen effizient entfernt werden könnte und somit als Prüfsubstanz für die Kapazitätsprüfung von Filtermaterial geeignet ist. Wie jedoch schon unter Punkt 5.3.1 erwähnt, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Toluol als mögliche Prüfsubstanz wegen der Leichtflüchtigkeit ungeeignet erscheint.

5.4 Ergebnisse und Interpretation – Batchversuche

5.4.1 Darstellung der Adsorptionskurven

In den Abbildung 5-35 bis Abbildung 5-38 sind die Adsorptionskurven (Gleichgewichtskonzentration in Bezug zur Beladung des Materials) der Materialien TFIc und TFIIb jeweils für Blei und Zink dargestellt. Diese wurden anhand der Ergebnisse aus den Batchversuchen (für Versuchsdurchführung siehe Punkt 4.4.3) ermittelt.

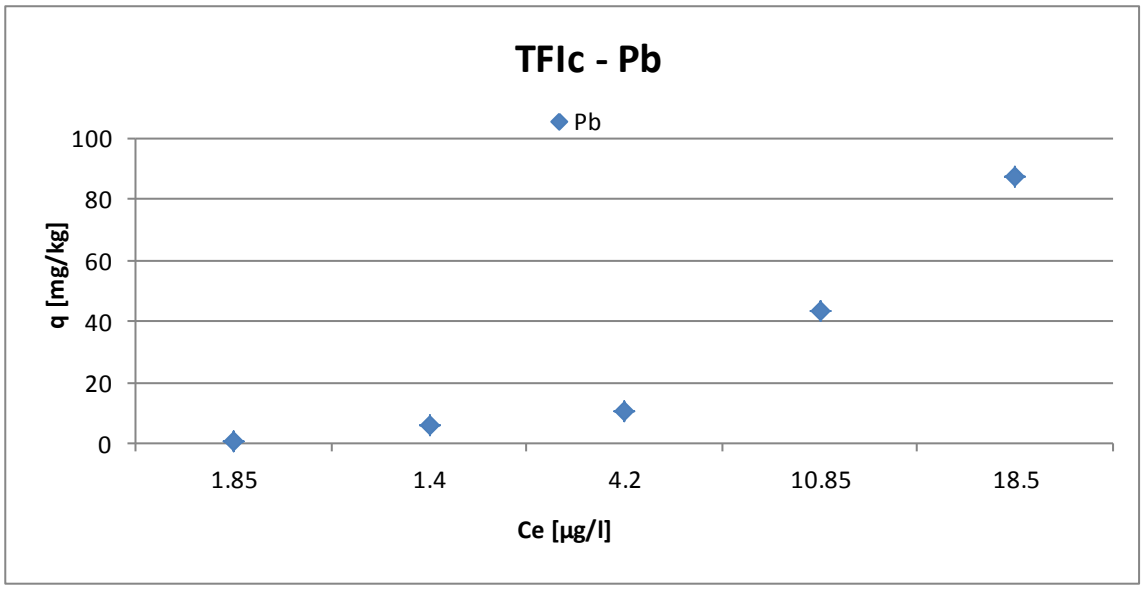


Abbildung 5-35: Adsorptionskurve für TFIc – Pb

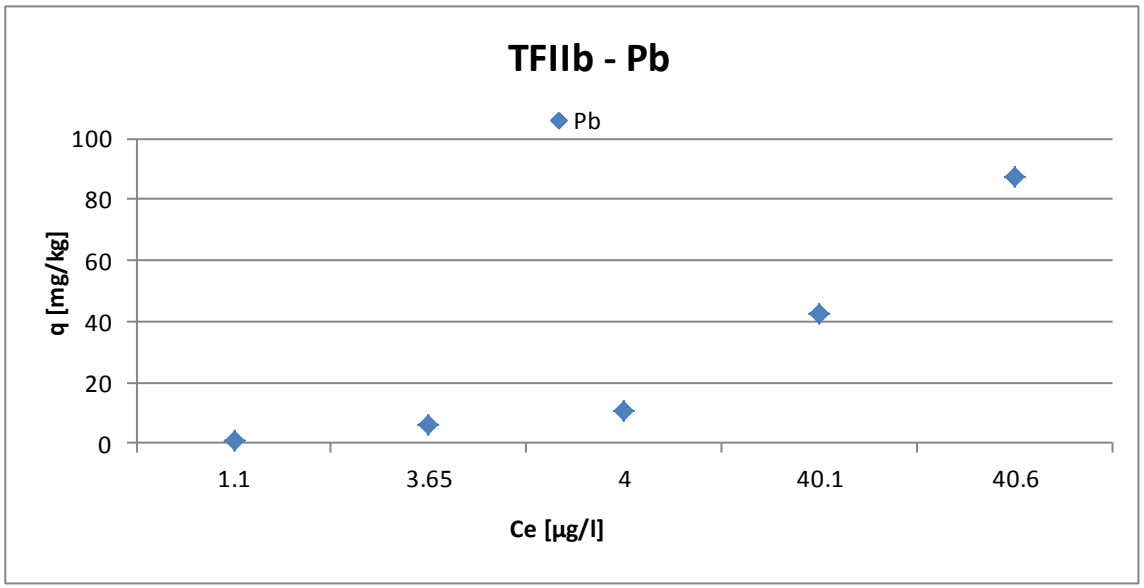


Abbildung 5-36: Adsorptionskurve für TFIIb - Pb

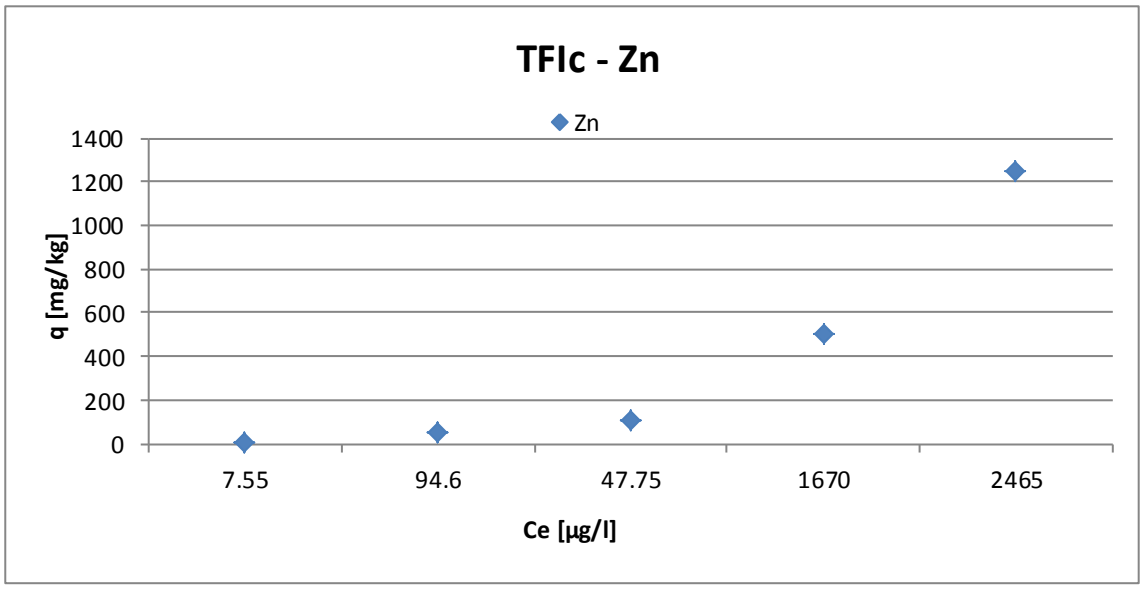


Abbildung 5-37: Adsorptionskurve für TFIc – Zn

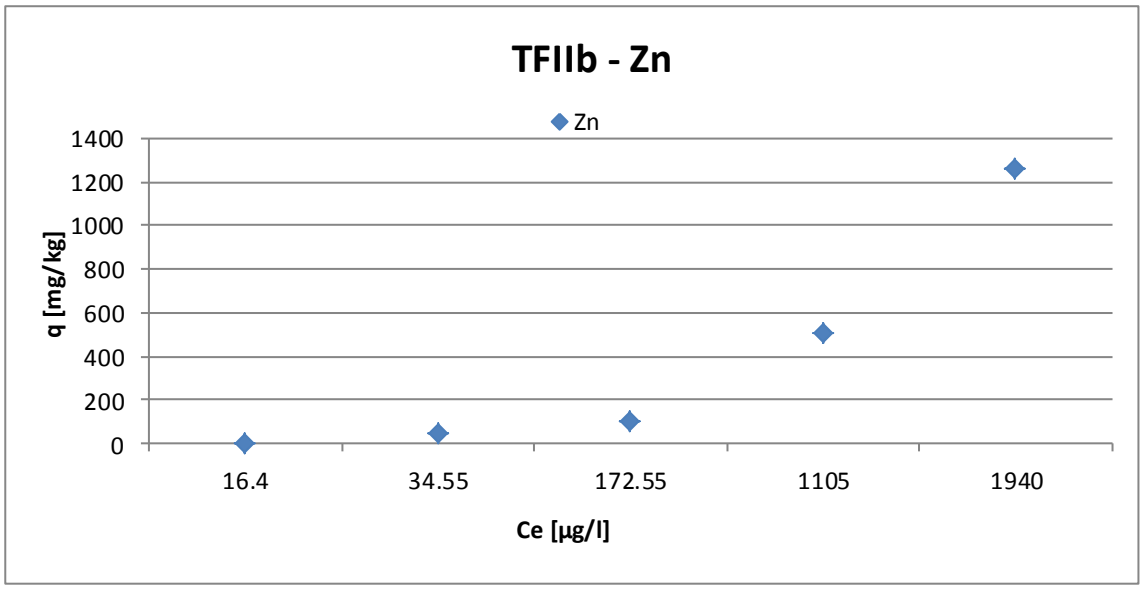


Abbildung 5-38: Adsorptionskurve für TFIIb – Zn

Wird der Verlauf der Punkte betrachtet, kann ein leicht konkaver Verlauf beobachtet werden. Dieser Verlauf lässt auf ungünstige Sorptionseigenschaften schließen (Punkt 3.4.3).

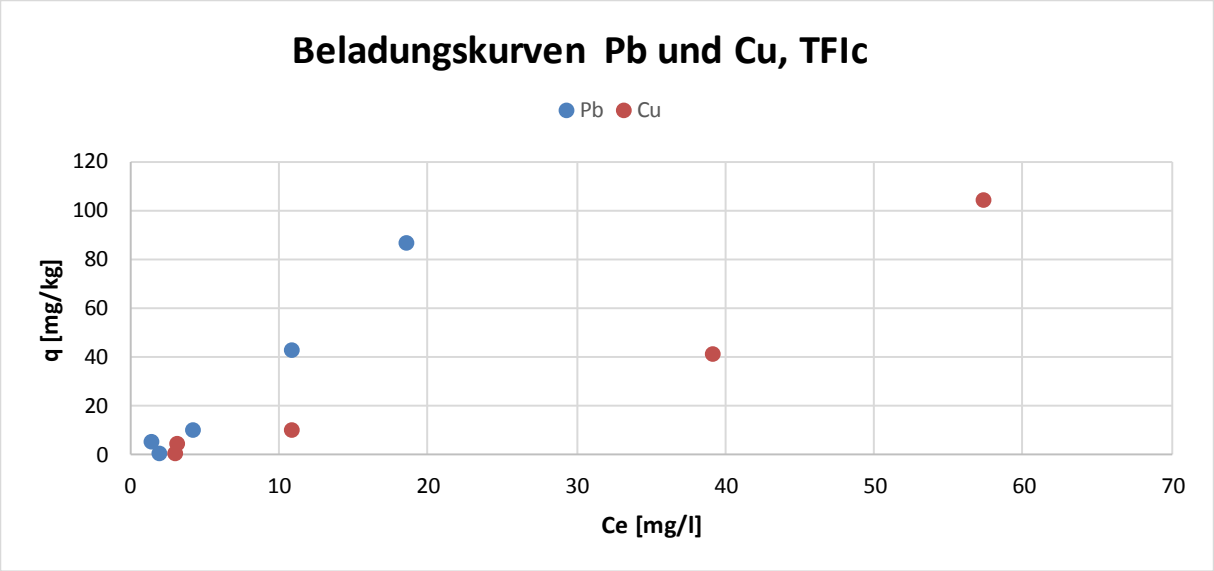


Abbildung 5-39: Adsorptionskurven für Blei und Kupfer (TFIc)

Werden nun zum Beispiel die Adsorptionskurven von Blei und Kupfer bei TFIc (Abbildung 5-39) verglichen, so lässt sich schnell erkennen, dass die Beladungskurve für Blei deutlich steiler ausfällt. Das heißt, bei gleicher Lösungskonzentration wird mehr Blei am Material adsorbiert als Kupfer. Das bedeutet, Blei wird bei der Aufnahme von Schwermetallen gegenüber Kupfer bevorzugt.

5.4.2 Anpassung an Adsorptionsisotherme

Nun wurde versucht, dieselben Ergebnisse Adsorptionsisothermen anzupassen. Die Anpassung erfolgte mittels der Freundlich-Isotherme (Punkt 3.4.3). Hierfür war es notwendig, die Daten zu logarithmieren.

In Abbildung 5-40 bis Abbildung 5-43 sind die angepassten Adsorptionsisothermen dargestellt. Die linearen Gleichungen der Adsorptionsisothermen, sowie das dazugehörige Bestimmtheitsmaß finden sich innerhalb der Diagramme.

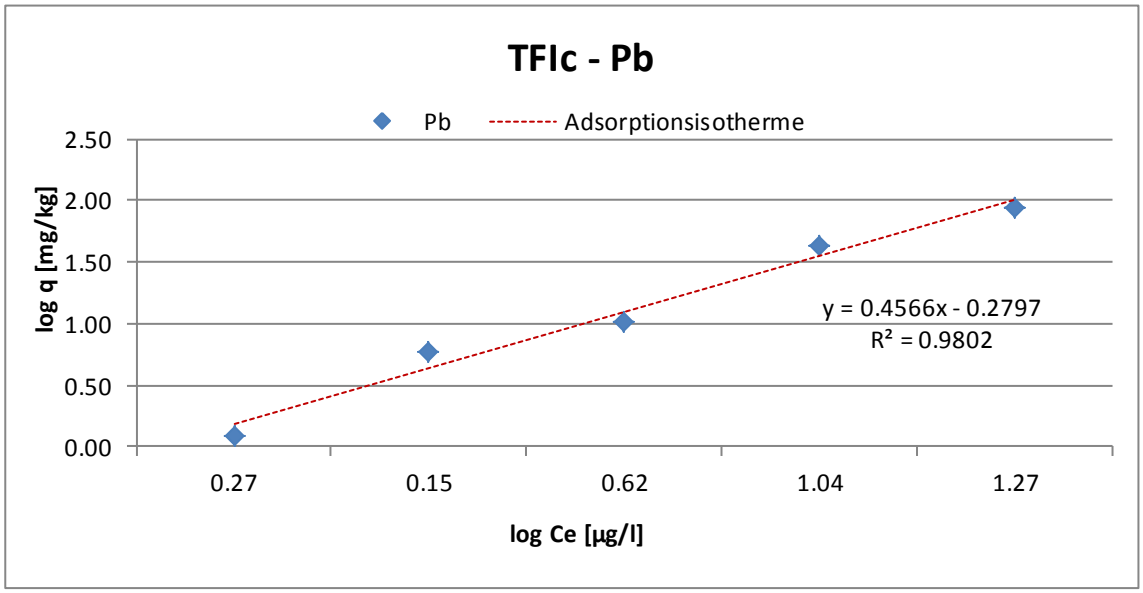


Abbildung 5-40: Adsorptionsisotherme für Pb, TFIc

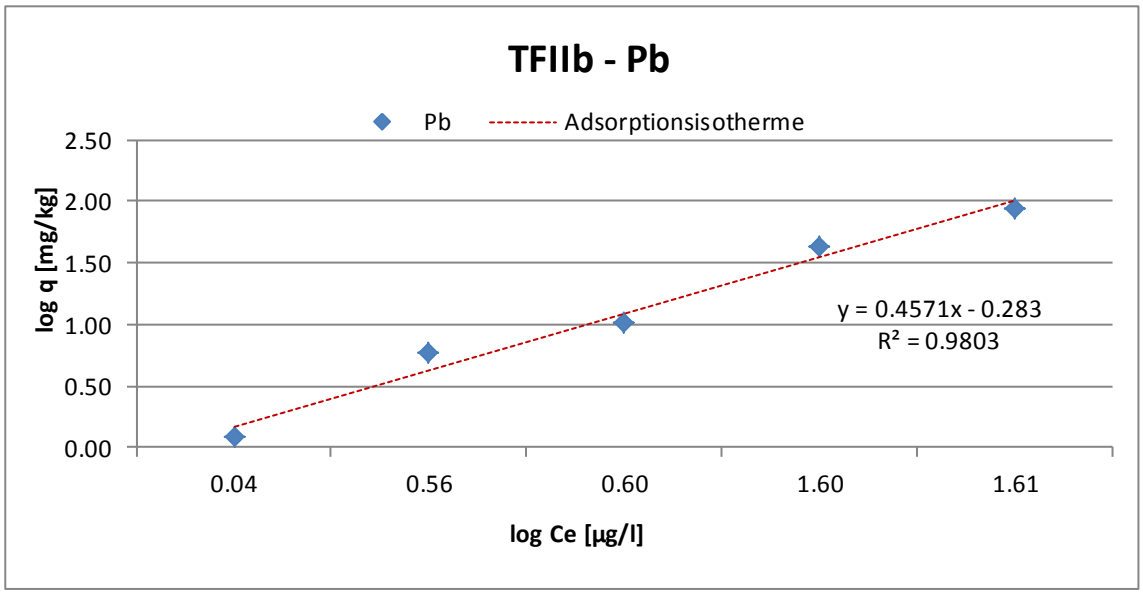


Abbildung 5-41: Adsorptionsisotherme für Pb, TFIIb

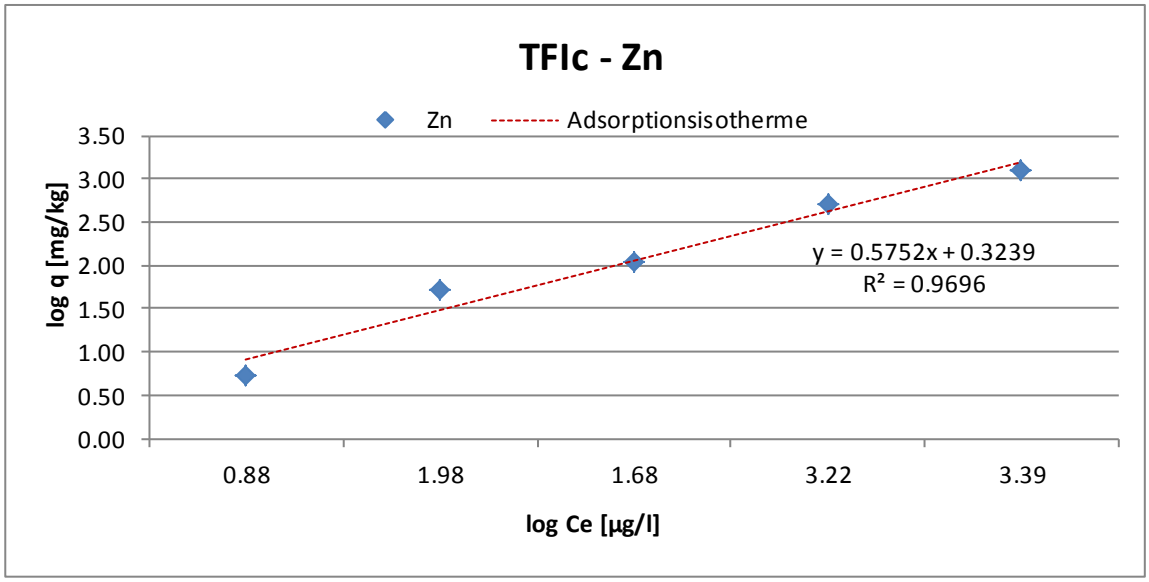


Abbildung 5-42: Adsorptionsisotherme für Zn, TFIc

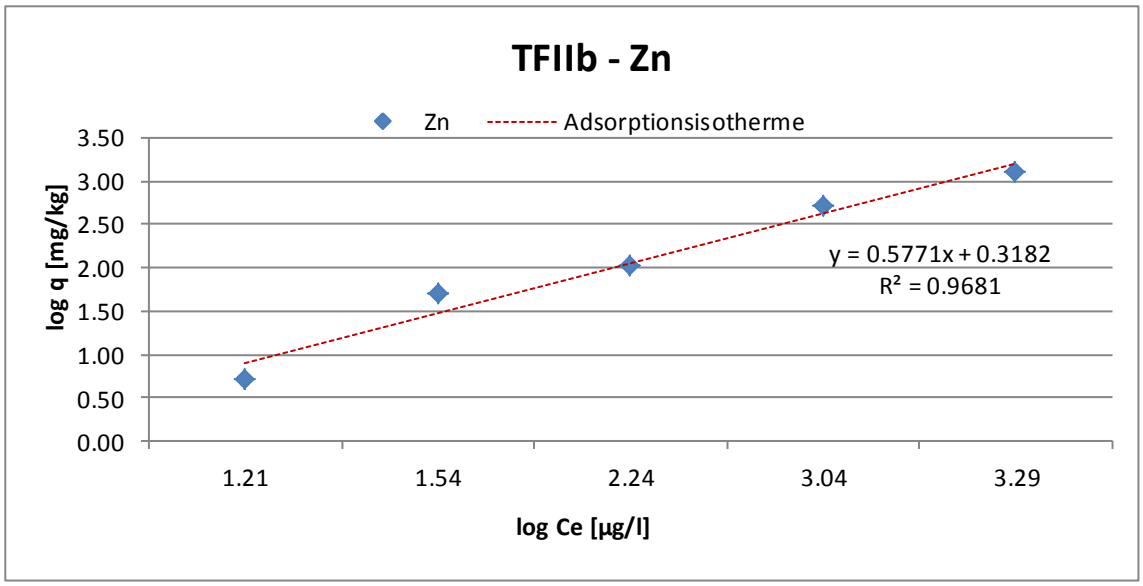


Abbildung 5-43: Adsorptionsisotherme für Zn, TFIIb

Die Form der linearen Gleichung y = k×x+d kann an die Formel von Freundlich (3-3) angepasst werden. Wird zum Beispiel die Formel aus Abbildung 5-40 herangezogen, so lautet diese: y = 0,46×x – 0,28. Angepasst an die Freundlich Gleichung könnte also geschrieben werden:

$$\log q = \log(-0{,}28) + 0{,}46 * C_e \qquad (5\text{-}9)$$

q … Beladung (mg/kg)

C_e … Gleichgewichtskonzentration (mg/l)

Bei der Gegenüberstellung beider Materialien fällt auf, dass die Werte für K_F und n in etwa gleich groß sind. Es kann also vereinfacht gesagt werden, die Aufnahmekapazitäten beider Materialien im Batchtest sind in etwa gleich groß.

Die Anpassung erfolgte hier auf einfachste Weise durch Hinzufügen einer linearen Trendlinie in Excel.

Wird mit Darstellungen aus der Literatur verglichen (Abbildung 3-5), kann diese einfache Annäherung als relativ gut betrachtet werden. Das Bestimmtheitsmaß aus dem in Punkt 3.7.1 beschriebenen Experiment von *Dwivedi et al.* (2008) lautet 0,89. Das Bestimmtheitsmaß der Versuche aus dieser Arbeit liegt bei ca. 0,97 für Zink und 0,98 bei Blei.

Für die Freundlich-Gleichung aus *Dwivedi et al. (2008)*, die durch Abbildung 3-5 ermittelt wurde, ergeben sich für n = 3,6 und für K_F = 6,7. Die Werte für Formel 5-9 lauten für n = 0,46 und für K_F = -0,28. Der Kurvenanstieg in den hier angeführten Versuchen verläuft also flacher als in den Versuchen aus *Dwivedi et al. (2008)*, d.h. das hier verwendete Material (TFIc) weist schlechtere Adsorptionseigenschaften auf. Das Material aus *Dwivedi et al. (2008)* weist also bei der gleichen Konzentration eine höhere Beladung auf.

5.4.3 Vergleich Batchtests mit Säulenexperimenten

Da das Hauptaugenmerk bei diesen Versuchen auf den Unterschied zwischen Säulen- und Batchversuchen gelegt wurde, wird in Abbildung 5-44 bis Abbildung 5-49 ein direkter Vergleich dargestellt.

Die Batchversuche wurden mit den Materialien TFIc und TFIIb durchgeführt. Da das Material TFIc ausschließlich in der (Säulen-)Versuchsreihe 5 (Punkt 4.3.12) erprobt wurde, werden die Ergebnisse mit dieser Versuchsreihe verglichen.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse aus beiden Versuchen je Filtermaterial und Schwermetall dargestellt.

Die grüne Linie repräsentiert dabei das Prüfkriterium für Blei, welches als Austauschkriterium des Filters zu sehen ist (Punkt 3.5.1).

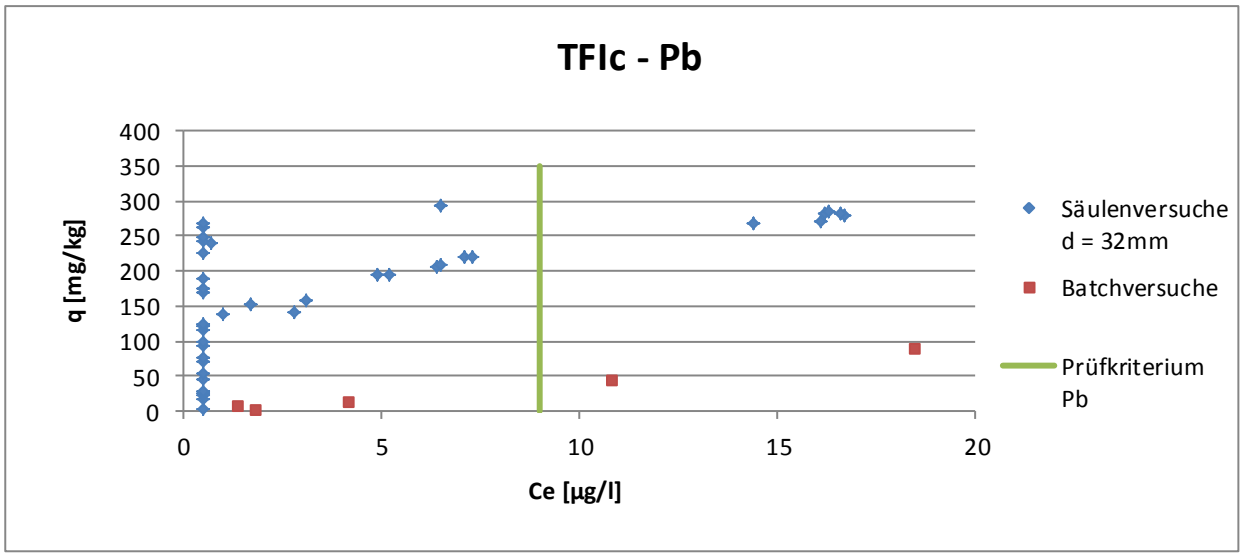


Abbildung 5-44: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Pb)

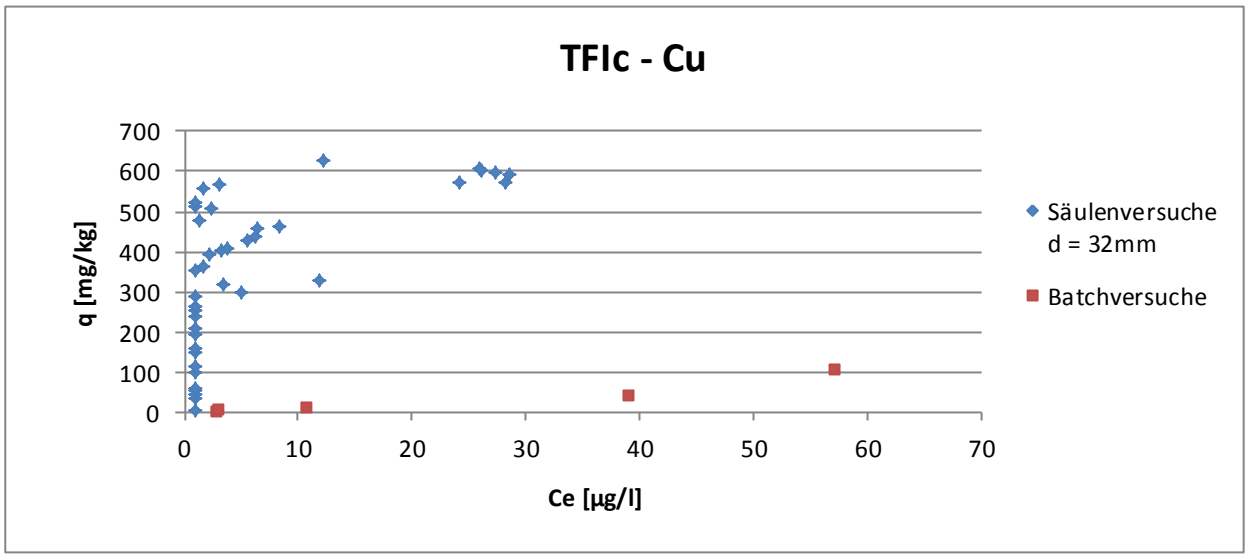


Abbildung 5-45: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Cu)

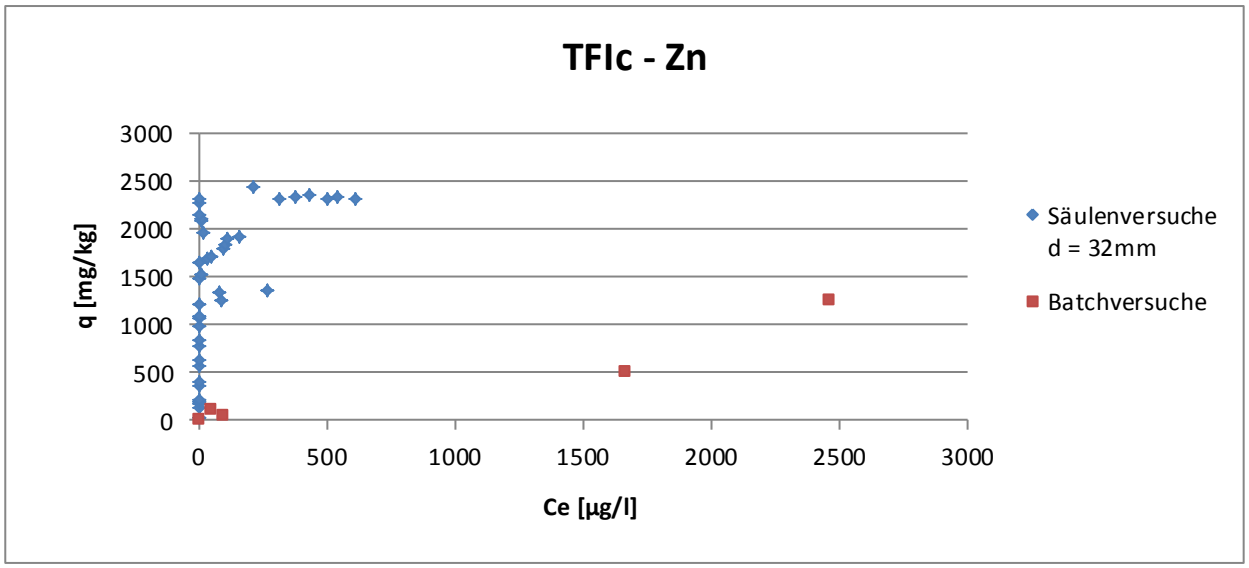


Abbildung 5-46: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIc (Zn)

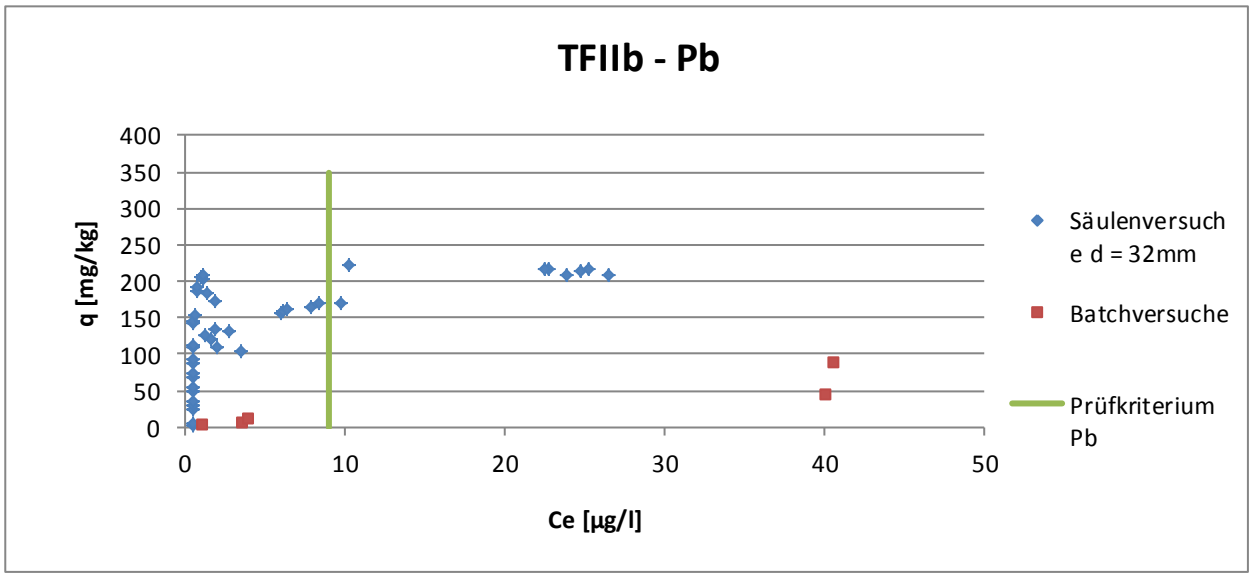


Abbildung 5-47: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Pb)

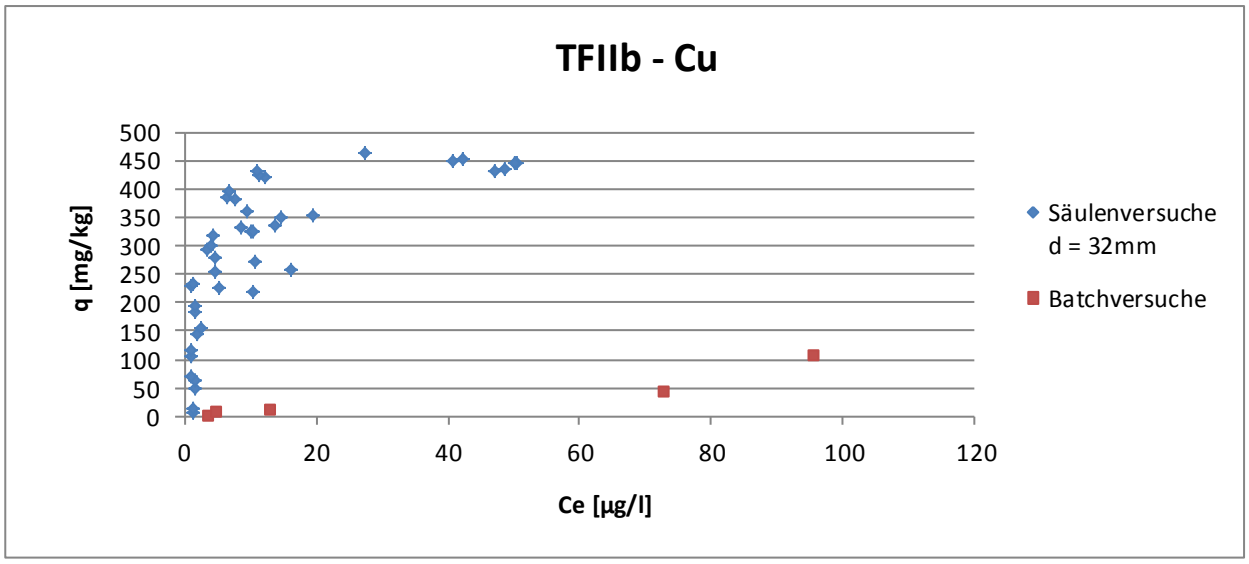


Abbildung 5-48: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Cu)

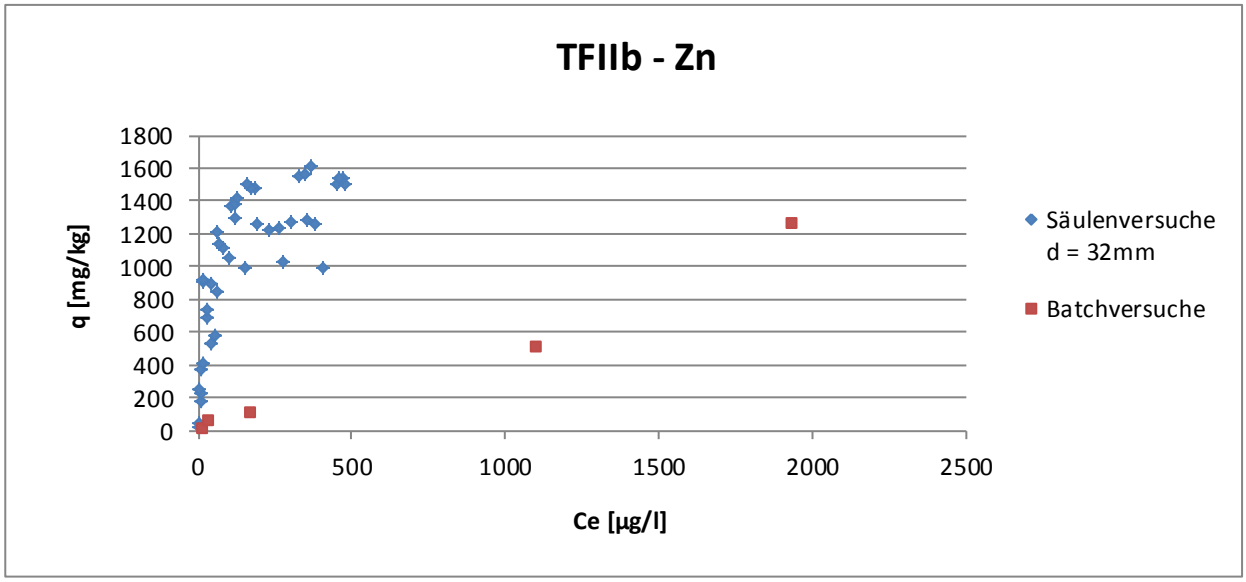


Abbildung 5-49: Vergleich Batch- und Säulenversuche für TFIIb (Zn)

Wie in Abbildung 5-44 zu sehen ist (Material TFIc), ist bei Erreichen des Prüfkriteriums (9 µg/l Pb) bei den Batchversuchen das Material zwischen 10 und 50 mg/kg beladen, bei den Säulenversuchen zwischen 200 und 300 mg/kg. Auch Abbildung 5-47 zeigt ähnliche Ergebnisse. Bei beiden Materialien fällt die Beladungskurve der Batchtests deutlich flacher aus als die der Säulenversuche. Das heißt, bei Säulenversuchen liegt die Sorptionskapazität viel höher als bei den Batchversuchen: Das Material bei den Säulenversuchen konnte viel mehr Schwermetalle aufnehmen (ist höher beladen), bis es das Prüfkriterium von 9 µg/l erreicht hat. Bei den Batchversuchen liegt die Beladung geringer (hat also weniger Schwermetalle aufgenommen), bis das Prüfkriterium erreicht wurde.

Die erhaltenen Ergebnisse aus *Dwivedi et al.* (2008), der Säulen- und Batchexperimente bezüglich ihrer Aufnahmekapazität gegenüber gestellt hat, stimmen **nicht** mit diesen Folgerungen überein. Hier liegt die Beladungskapazität der Batchversuche deutlich über jener der Säulenversuche. Wie bereits unter Punkt 3.7.3 beschrieben, liegt der Grund für das unterschiedliche Adsorptionsverhalten möglicherweise in der Irreversibilität des Sorptionsprozesses bei Säulenversuchen, sowie dem unterschiedlichen Ansatz bezüglich des Adsorptionsgleichgewichtes in beiden Experimenten.

Auch *Hilliges et al.* (2007) hat Säulen- mit Batchtests verglichen und kam auf das Ergebnis, dass die Kapazitäten in den Säulenversuchen deutlich geringer ausfielen. Dabei wird auf die deutlich höhere Kontaktzeit (ca. 24 h) bei Batchexperimenten gegenüber Säulenversuchen (einige Minuten) verwiesen, sowie auf die bessere Erreichbarkeit der Sorptionsplätze, bedingt durch den Schüttelvorgang (Punkt 3.7.3 unter (3)).

Der Grund, weshalb die in dieser Arbeit durchgeführten Säulenversuche bei der Sorptionskapazität besser abschneiden, liegt womöglich an der unterschiedlichen Ausgangskonzentration bei beiden Versuchen. Während bei den Säulenversuchen im Konzentrationsbereich zwischen 0,005 und 0,4 mg/l Schwermetalle gearbeitet wurde, lag die Ausgangskonzentration bei den Batchversuchen zwischen 0,005 und 100 mg/l. Die Masse des Materials betrug bei den Batchversuchen 5 g und bei den Säulenversuchen ca. 90 g (für TFIc). Das heißt, es kamen bei den Batchversuchen teilweise höhere Konzentrationen auf weniger Material zum Einsatz. Allerdings betrug die Kontaktzeit bei den Batchversuchen in etwa 2280 min, während diese bei den Säulenversuchen lediglich bei 6 min (bei TFIc mit Q = ca. 27 ml/min, Versuch 5) lag. Doch geht man nun jeweils von der höchsten Eingangskonzentration aus (für Batch 100 mg/l, für Säulen 0,4 mg/l), so liegt der Unterschied bei einem Faktor von 250, womit sich wohl diese unterschiedliche Aufnahmekapazität begründen lässt. *Dwivedi et al. (2008)* hat z.B. sowohl für die Batchversuche, als auch für die Säulenversuche die gleiche Ausgangskonzentration (zw. 20 und 60 mg/l) verwendet und kam zu einer höheren Aufnahmekapazität bei den Batchtests.

Die höhere Beladungskapazität für die Säulenversuche (im Gegensatz zur Literatur) kann jedoch sowohl an den optimierten Versuchsparametern und Randbedingungen, als auch an der Zusammensetzung bzw. Wirksamkeit des Materials liegen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, Batchversuche können für eine erste Abschätzung bezüglich der Einsatzfähigkeit des Materials durchgeführt werden. Um jedoch reale Bedingungen repräsentieren zu können, sind Säulenversuche die bessere Variante, um die Sorptionskapazität von Materialien zu ermitteln.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Säulenversuche zur Erfassung des Mineralölrückhaltes mittels Toluol

Die Versuche zum Mineralölrückhalt mittels Toluol haben gezeigt, dass die **Versuchsdurchführung** unter diesen Bedingungen **nicht optimal** gelöst war. Durch die großteils hohen Ablaufkonzentrationen, welche teilweise auch die Zulaufkonzentration übersteigen, wird klar, dass durch die Leichtflüchtigkeit des Toluols vermutlich ein beträchtlicher Teil zur Verdampfung gekommen sein dürfte. Die Behältnisse des Zulaufs waren nicht luftdicht abgeschlossen. Auch im Zuge der Probenahme kann ein Teil des Toluols verdampft sein.

Hier wird empfohlen, **weitere Versuche zur Optimierung** durchzuführen, in dem zum Beispiel luftdichte Zulaufbehältnisse verwendet werden (bevozugt Plastikbehälter, welche sich entsprechend der Flüssigkeitsentnahme zusammenziehen). Für die Probenahme wird die Verwendung von Head-Space Flaschen bevorzugt, da die Flüssigkeitsmenge viel geringer ist als in herkömmlichen Probeflaschen, d.h. die Probenahmeprozedur verläuft schneller und das Toluol hat weniger Zeit, sich zu verflüchtigen. Außerdem werden Head-Space Flaschen nach der Befüllung sofort luftdicht verschlossen.

Bevor jedoch weitere Versuche zur Optimierung des Prüfverfahrens mit Toluol als Ersatz für MKW durchgeführt werden, sollte geprüft werden, ob Toluol für den praktischen Einsatz überhaupt geeignet ist. In der Literatur (Punkt 5.3.2) finden sich bereits zahlreiche Batchexperimente mit erfolgreichen Ergebnissen. Auch am Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz wurden diesbezüglich Experimente durchgeführt und aus den unter Punkt 5.3.2 genannten Gründen Säulenexperimente gestartet. Klar ist jedoch, dass unter den hier angeführten Versuchsbedingungen **keine zufriedenstellenden Ergebnisse** erreicht werden konnten und somit für die Prüfung des Mineralölrückhaltes **in dieser Arbeit kein Methodenvorschlag** abgegeben werden kann.

6.2 Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit wurde auf Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes gelegt und diesbezüglich auch die meisten Versuche durchgeführt.

Zunächst ist zu sagen, dass es bei den Arbeiten im Technikum vermehrt zu Problemen bei der Versuchsdurchführung gekommen ist, wie zum Beispiel durch das Undichtwerden von Zulaufschläuchen, Kolmationen, oder auch durch eine mögliche pH-Wert Änderung beim Wechsel der Zulauflösung. Dies kann auf die jeweiligen Ergebnisse in dieser Arbeit Einfluss genommen haben. Über etwaige Vorkommnisse wurde aber immer genau Protokoll geführt und mit den Ergebnissen entsprechend verglichen, sowie auf Rückschlüsse hingewiesen.

Beim Vergleich der Filtersubstrate (Punkt 5.2.1) wird deutlich, dass bei allen Versuchen die **technischen Filtermaterialien die höhere Aufnahmekapazität** aufweisen und somit in Anlagen zur Reinigung von Straßenabwässern bevorzugt angewandt werden sollten. Gerade in Bereichen, wo der notwendige Platz für Bodenfilter nicht vorhanden ist, sind technische Materialien ein effektiver Ersatz. Außerdem, wie bereits unter Allgemeine Grundlagen, Punkt 3.1.1 geschildert, sind gewisse komplizierte Reaktionsmechanismen im Boden schwer nachvollziehbar und nicht vorhersehbar und der mit Spurenstoffen belastete Boden fällt als Sondermüll an.

Technische Filtermaterialien bestehen hauptsächlich aus natürlichen Komponenten und sind zudem auch im Vergleich billig herzustellen (Popuri et al., 2009). Boden kostet zwar „nichts“, die Rückhaltewirkung ist jedoch in Relation viel geringer und braucht zudem viel mehr Platz um die gleiche Reinigungsleistung erzielen zu können (Hilliges, 2007). Technische Filtermaterialen

können außerdem teilweise regeneriert werden (Popuri et al., 2009). Der Einsatz von Sandfiltern zeigte geringe Adsorptionsleistungen, da Quarzsand nicht als Adsorptionsmaterial wirkt (inertes Material) und dadurch die Filtration vorwiegend mechanisch verläuft.

Auch beim Vergleich der Durchflussraten (Punkt 5.2.2) wird ersichtlich, dass die Ablaufkonzentrationen der technischen Filtermaterialien deutlich geringer ausfallen. Zum Beispiel, wenn Versuchsreihe 5 betrachtet wird, wird das Prüfkriterium für Blei (9 µg/l) bei BA bereits nach 15-20 Schwermetalljahresfrachten erreicht. Dies ist bei den technischen Filtermaterialien erst nach ca. 60 Jahresfrachten der Fall. Aus den unterschiedlichen Gegenüberstellungen der Durchflussraten aus mehreren Versuchsreihen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Bei den Säulen mit Durchmesser 13,4 mm zeigen die Ergebnisse sehr unterschiedliche Werte. Zum Beispiel verhält sich die Rückhalteleistung von Sand in Versuchsreihe 1+2 viel schlechter als in Versuchsreihe 4, obwohl mit den gleichen Versuchsbedingungen (gleiche Konzentration und annähernd gleiche Durchflussgeschwindigkeit) gearbeitet wurde. Bei der alleinigen Betrachtung von Blei als Prüfparameter fällt auf, dass je geringer die Flussrate, desto besser die Aufnahmefähigkeit. Diese Annahme wurde durch Literaturrecherche bestätigt (Jochová et al., 2003). Bei den Versuchen trifft dies jedoch nicht auf jeden Parameter zu, wie unter Punkt 5.2.2 geschildert. Die unterschiedlichen Ergebnisse werden auf mögliche Randeffekte, und nicht optimale Versuchsbedingungen zurückgeführt.

Durch die Wahl eines größeren Säulendurchmessers von 32 mm sollen diese Randeffekte minimiert werden. In den Ergebnissen wirkt sich diese Änderung positiv aus. Die Flussrate liegt zwar höher als in den Vorversuchen mit geringerem Durchmesser (bei größerem Durchmesser aber logisch, da die Filterfläche ja auch größer ist), die Rückhaltewirkung liegt jedoch auch deutlich höher.

Um bei der Prüfung von Anlagen möglichst realitätsnahe Bedingungen herzustellen und um für jedes Material eine geeignete „Prüf“-Flussrate zu finden, wird eine **Einstellung der Flussrate entsprechend dem k_f-Wert des Materials empfohlen** (oder eines Vielfachen des k_f-Wertes). Das erleichtert auch die Vergleichbarkeit der Substrate untereinander. Außerdem wird in den Straßenabwasserbehandlungsanlagen das Filtermaterial ebenfalls entsprechend dem k_f-Wert durchflossen und es können somit reale Filterleistungen in der Säule simuliert werden.

Bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Durchmesser (Punkt 5.2.3) wurde die Ablaufkonzentration im Bezug zur adsorbierten Schwermetallfracht von mehreren Versuchsreihen dargestellt. In allen Darstellungen wird ersichtlich, dass sich der Durchmesser 32 mm bewährt hat. Bei Sand z.B. waren in Versuch 4 (bei d = 13,4 mm) die aufgebrachten Schwermetallfrachtjahre höher als in Versuch 5 (bei d = 32 mm) und trotzdem lagen die Ablaufkonzentrationen bei Versuch 4 bei einer Frachtbeladung von z.B. 5 mg schon höher als beim selben Wert in Versuch 5 (siehe Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14). Gerade auch in Versuchsreihe 6 und 7 wurden optimale, sowie stabile Versuchsbedingungen verzeichnet, was in den Versuchsreihen mit d = 13,4 mm weniger der Fall war.

Dazu kommt, dass es bei der Befüllung der kleineren Säulen zu Schwierigkeiten kommen könnte. Bei Materialien mit gröberen Kornanteilen könnten dadurch zu große Zwischenräume für eine optimale Filtrationsleistung entstehen, sowie Randeffekte hervorgerufen werden. Das Verhältnis zwischen Säulendurchmesser und Korndurchmesser wäre also zu klein gewählt. An den in dieser Arbeit erprobten Materialien erwies sich der Säulendurchmesser mit d = 32 mm als geeignete Variante für alle Substrate. Die hier verwendeten Substrate repräsentieren den Großteil der in Anlagen eingesetzten Filtermaterialien, womit es bei der Festlegung eines „Prüf“-Säulendurchmessers auf 32 mm zu keinen Problemen kommen sollte.

Durch die Gesamtbetrachtung der Versuchsreihen mit Durchmesser 13,4 mm und Durchmesser 32 mm wird klar, dass die Ablaufkonzentrationen bei größerem Durchmesser deutlich geringer sind. Es wird also **empfohlen**, bei der Kapazitätsprüfung einen **Säulendurchmesser von 32 mm** zu verwenden.

Die Beschickungsart führt ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen (Punkt 5.2.4). Hier wird für die Prüfmethode eine **Beschickung von unten nach oben empfohlen**, da sich die Kapazität unter geregelten Versuchsbedingungen (bei der Beschickung von unten nach oben lässt sich die Flussrate problemlos einstellen) leichter und auch sicherer ermitteln lässt und die Ergebnisse deutlich stabilere Werte zeigen. Somit unterscheidet sich die Beschickungsart zwar von jener in der Anlage, die Versuchsdurchführung wird hierdurch aber deutlich vereinfacht, was dem Ziel der einfachen Versuchsdurchführung entgegen kommt.

Wichtig bei der Versuchsdurchführung zur Kapazitätsprüfung ist außerdem die Auslegung auf das richtige Flächenverhältnis. Wie unter Ergebnisse und Interpretation, Punkt 5.2.5 gezeigt, ergeben sich je nach Flächenverhältnis sehr unterschiedliche Standzeiten. In der Prüfmethode sollte daher darauf geachtet werden, die **Prüfparameter**, wie z.B. die Beschickungsmenge, **dem Flächenverhältnis der Anlage anzupassen**.

Die hier durchgeführten Versuche wurden auf die Flächenverhältnisse 1:15, 1:100 und 1:200 ausgelegt. Es kann jedoch angenommen werden, dass sich die Prüfmethode auch auf größere Flächenverhältnisse auslegen lässt, da hier nur Lösungen mit gelösten Schwermetallanteilen verwendet wurden, in der Realität (also in den Anlagen) ein Großteil der Schwermetalle jedoch schon partikulär zurückgehalten wird und somit der Anteil der gelösten Schwermetalle viel geringer liegt.

Die **Filterschichthöhe sollte jener der Anlage entsprechen,** um wieder möglichst der Realität entsprechend zu arbeiten. Die hier gewählten Filterschichthöhen von 30 cm und 20 cm werden beide als geeignet betrachtet.

Die **Verwendung von Modelllösungen** aus dem Labor erscheint sinnvoll, soll die Prüfung auf den Schwermetallrückhalt ausgelegt werden. Im Zuge des ÖNORM Projektes wurden am Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz schon mehrere Versuche durchgeführt und eine Art Prüfreihe, bestehend aus einzelnen Prüfschritten zur Ermittlung der Kapazität, angesetzt. Diese entspricht in den Grundzügen jenen Zulassungsgrundsätzen des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt, 2011). In dieser Arbeit wurde lediglich eine geeignete Methode zur Kapazitätsprüfung in Bezug auf Schwermetallrückhalt (sowie vereinzelte Versuche zum Mineralölrückhalt) untersucht.

Auf **Unterbrechungen** aufgrund von Wochenenden, längeren Pausen oder Sonstigem wird in der Prüfmethode **keine Rücksicht** genommen, da Konzentrationsverringerungen im selben Ausmaß auch ohne Unterbrechungen beobachtet werden konnten.

Der **pH-Wert** sollte unbedingt **bei jeder Probenahme kontrolliert** werden, um mögliche Abhängigkeiten der Ablaufkonzentrationen vom pH-Wert zu detektieren.

Die Schwermetalllösung sollte sich aus den Schwermetallen **Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink zusammensetzen**, da diese im Straßenabwasser aufgrund ihres Aufkommens und ihrer Toxizität als relevant eingestuft wurden (Punkt 3.3). Obwohl die Prüfparameter, bei dessen Überschreitung bzw. Nichterfüllung des jeweiligen Wertes die Filterkapazität für die nächsten vier Jahre als unzureichend eingestuft wird, nun lediglich aus Blei, Kupfer und Zink bestehen (Punkt 4.1.1), ist eine Modelllösung mit den zusätzlichen Schwermetallen Chrom und Nickel zu bevorzugen. Dies ist so zu begründen, dass nicht in jedem Straßenabwasser ein hoher Wert an Blei zu erwarten ist und deswegen noch andere Prüfparameter zur Absicherung herangezogen werden können, wie zum Beispiel Chrom und Nickel. Die Prüfkriterien können hier auch an die Schwellenwerte der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser angelehnt werden (vergleiche dazu auch Punkt 5.2.4).

Wie auch unter Punkt 5.2.4 erwähnt, kann beobachtet werden, dass gerade Blei bevorzugt aufgenommen wurde, hingegen andere Schwermetalle wie Chrom oder Kupfer ihren Wert der definierten Filtererschöpfung teilweise hoch überschreiten. Deswegen ist die Miterfassung anderer Prüfparameter wichtig, da eine Prüfung auf lediglich einen Parameter (dies wurde für Blei angedacht) durch die Komplexität der einzelnen Wirkungsmechanismen der Schwermetalle untereinander nicht repräsentativ genug wäre und eine Unterschreitung des Prüfkriteriums Blei

(mit 9 µg/l) nicht unbedingt heißen muss, dass andere Schwermetalle ebenfalls in irrelevanten Konzentrationen emittiert werden.

Bei der Auswahl der Zulaufkonzentrationen sollte an reale Konzentrationen im Straßenabwasser angeknüpft werden, da sonst die festgelegten Prüfkriterien für z.B. Blei mit 9 µg/l als nicht sinnvoll erscheinen, da diese bei höher gesetzten Konzentrationen auf jeden Fall überschritten werden würden. Eine **Festlegung der Zulaufkonzentrationen auf 50 µg/l für Blei, Chrom und Nickel, 100 µg/l für Kupfer und 400 µg/l für Zink** erscheint nach Literaturangaben (Punkt 3.6.2) als geeignet (repräsentative Aufkommenswerte).

Die **Versuchsdauer** sollte mindestens jener Dauer entsprechen, die notwendig ist, um die 4-Jahres-Fracht auf die Säule aufzubringen. Diese ist je nach Flächenverhältnis unterschiedlich und bewegt sich bei k_f-Werten von ca. 10^{-3} m/s **zwischen 1-2 Tagen** (A_v = 1:15) **und 1 Woche** (A_v = 1:200). Die 4-Jahres-Fracht wurde vorerst als **4-Jahres-Niederschagsmenge** festgelegt. Da die Konzentrationen zwischen den Versuchen jedoch variieren können, sollte in der Kapazitätsprüfung auf die **4-Jahres-Schwermetallfrachten** eingegangen werden, die je nach Schwermetall und Eingangskonzentration unterschiedlich hoch liegen (siehe dazu Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-12).

Die **Probenahme** sollte **alle 2-3 Stunden** erfolgen, sowie **nach Durchfließen der 1/2/3/4-Jahresfracht**. Bei der **Analyse** im Labor kann jeweils die **erste und die letzte Probe eines jeden Tages** analysiert werden, um Kosten zu sparen. Bei Auffälligkeiten kann auf dazwischenliegende Proben zurückgegriffen werden.

6.3 Batchversuche

Die Batchversuche wurden hauptsächlich als erste Einschätzung des Adsorptionsverhaltens, sowie zur Gegenüberstellung Batchversuche – Säulenversuche durchgeführt. Beim Vergleich der beiden Versuche wird sichtbar, dass die Aufnahmekapazität bei den Batchtests gegenüber den Säulen geringer liegt, was womöglich durch die unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen, aber auch durch Materialeigenschaften hervorgerufen wurde.

Die Vorteile von Batchversuchen liegen in der einfachen Durchführung der Versuche, sowie der geringen Versuchsdauer. Außerdem bringen diese mit Sicherheit eine Kostenersparnis mit sich. Allerdings muss gesagt werden, dass diese Versuchsbedingungen die Komplexität der Reaktionen, welche unter realen Bedingungen vorzufinden sind, nicht ausreichend wiederspiegeln. Zum Beispiel wird in der Realität das Filtersubstrat kontinuierlich mit neuer Flüssigkeit in Kontakt gebracht, während bei den meisten Batchversuchen die Kontaktlösung ungefähr 24 h Zeit hat, ihre Inhaltsstoffe am Material anzulagern. In Säulenversuchen ist durch die kontinuierliche Beschickung dieser Aspekt realitätsnäher gegeben. Außerdem wird durch den Schüttelvorgang bei Batchversuchen der Adsorptionsprozess zusätzlich unterstützt.

Zur Ermittlung von Adsorptionsisothermen sind **Batchversuche** gut geeignet. Sie dienen der ersten Einschätzung, ob ein Material für den Einsatz als Filtermaterial in Frage kommt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse aus dieser Arbeit wird daher vorgeschlagen, **Batchversuche** lediglich einzusetzen, um zu klären, ob ein **Substrat zum Einsatz von Reinigungsanlagen für Straßenabwasser grundsätzlich in Frage kommt** und im Zuge dessen kann das Adsorptionsverhalten bestimmt werden. Zur Prüfung, ob eine neue oder bestehende **Anlage noch als einsatzfähig** anzusehen ist (daher noch weitere 4 Jahre den Prüfkriterien entspricht), sollte eine **Kapazitätsprüfung anhand von Säulenversuchen** durchgeführt werden.

6.4 Erfüllung der Ziele

Hier wird auf die Ziele, welche unter Punkt 2 aufgelistet sind, eingegangen.

- **Einfache und reproduzierbare Versuchsdurchführung:** Säulenversuche sind zwar nicht so einfach durchzuführen wie Batchversuche, eine gewisse Nähe zur Realität sollte jedoch trotzdem gegeben sein. Außerdem weisen diese in dieser Arbeit eine bessere Adsorptionskapazität auf. Die unter Punkt 6.2 genannten Angaben zur Versuchsdurchführung können auf einfache Weise in jedem Labor nachgestellt werden.

- **Kostensparend**: Durch die Wahl eines möglichst geringen Säulendurchmessers, bei welchem Randeffekte minimal gehalten werden, wurde bereits an Kosten gespart. Hier wären Batchversuche wiederum die billigere Variante, wie jedoch schon mehrmals erwähnt, werden diese als ungeeignet zur Kapazitätsprüfung betrachtet. Kosten können auch gespart werden, indem die Säulen nur mit der erforderlichen 4-Jahres-Fracht beschickt werden und nicht darüber hinaus geprüft werden. Außerdem kann, wie in dieser Arbeit, auf die Analyse aller Proben verzichtet werden und nur vereinzelte (relevante) Proben herangezogen werden.

- **Geringer Zeitaufwand**: Durch die Beschränkung der Beschickungsmenge auf die 4-Jahresfracht kann die Versuchsdauer (je nach Flächenverhältnis) auf wenige Tage reduziert werden.

- **Vorgegebene Mindest-Filterkapazität**: Diese wurde bereits durch die ÖNORM-Gruppe durch die Definition von Prüfparametern und Prüfkriterien und der Mindest-Standzeit von weiteren 4 Jahren festgelegt.

- **Einhaltung der Reinigungsleistung**: Durch die hier genannten Versuchsbedingungen und die dazu geforderten Prüfparameter bzw. Prüfkriterien sollte die Methode zur Überprüfung der Reinigungsleistung der Anlage für mindestens weitere vier Jahre gewährleistet sein.

6.5 Ausblick

Zu dieser Arbeit wurden Grundlagen für eine Methode zur Kapazitätsprüfung von Filtermaterial zur Reinigung von Straßenabwässern erstellt.

Ausbaubedarf besteht auf jeden Fall bei der Prüfung auf den Mineralölrückhalt sowie auf Verhalten unter Salzeinfluss (Streuung im Winter), Partikelrückhalt oder Entfernung von PAK. Außerdem können sich durch viele verschiedene und auch neue Studien zu Aufkommensdaten der Spurenstoffe in Straßenabwässern, sowie durch neuere rechtliche Regelungen die Prüfparameter und Prüfkriterien verändern. Diese sollte jedenfalls überwacht werden und dem jeweiligen Stand des Wissens angepasst werden.

7. Literaturverzeichnis

AAEV BGBl. II Nr. 186/1996: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV), 1996

ALTMAYER M., BÖHME, DIETER H.H., LEUCHS W., MOLL B., SIX E. (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2004

BGBl. II Nr. 461/2010: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der die Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer, die Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer und die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser geändert werden, [CELEX-Nr.: 32006L0011, 32008L0105, 32009L0090], 2010

BODENÖKOLOGISCHES LABOR BREMEN GMBH, BÖL (2004): Vorreinigung von Niederschlagsabflüssen vor der Versickerung, Datengrundlage, März 2004

DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK DIBt (2011): Zulassungsgrundsätze für „Niederschlagswasserbehandlungsanlagen“ Teil 1: Anlagen zum Anschluss von Kfz-Verkehrsflächen bis 2000 m² und Behandlung des Abwassers zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser, Fassung Februar 2011

DWIVEDI C.P., SAHU J.N., MOHATNY C.R., RAJ MOHAN B., MEIKAP, B.C. (2008): Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal, Journal of Hazardous Materials 156 (2008) 596–603, www.sciencedirect.com, 2008

FÜRHACKER M., MEASHO HAILE T., MONAI B., MENTLER A. (2011): Performance of a filtration system equipped with filter media for parking lot runoff treatment, Journal of Desalination 275 (2011) 118-125, www.sciencedirect.com, 2011

GHIACI M., ABBASPUR A., KIA R., SEYEDEYN-AZAD F. (2004): Equilibrium isotherm studies fort he sorption of benzene, toluene, phenol onto organo-zeolites an das-synthesized MCM-41, Separation and Purification Technology 40 (2004) 217-229, www.sciencedirect.com, 2004

GÖBEL P., DIERKES C., COLDEWEY W.G. (2007): Storm water runoff concentration matrix for urban areas, Journal of Contaminant Hydrology 91 (2007) 26–42, www.sciencedirect.com, 2007

HELMREICH B., HILLIGES R., SCHRIEWER A., HORN H. (2010): Runoff pollutants of a highly trafficked urban road – Correlation analysis and seasonal influences, Journal Chemosphere 80 (2010) 991-997, www.scienedirect.com, 2010

HILLIGES, R. (2007): Entwicklung eines dezentralen Behandlungssystems für hochbelastete Verkehrsflächenabläufe im urbanen Raum, Dissertation TU München, 2007

HILLIGES R., SCHRIEWER A., HELMREICH B. (2013): A three-stage treatment system for highly polluted urban road runoff, Journal of Environmental Management 128 (2013) 306-312, www.sciencedirect.com (2013)

HÜRLIMANN, J. (2011): Auswirkungen von Straßenabwasser auf Oberflächengewässer, Gewässerökologische Beurteilung, 2011

JOCHOVÁ M., PUNČOCHÁŘ M., HORÁČEK J., ŠTAMBERG K., VOPÁLKA D. (2003): Removal of heavy metals from water by lignite-based sorbents, Fuel 83 (2004) 1197-1203, www.sciencedirect.com, 2003

KLUGE, B. (2010): Schwermetallbelastung der Böden und Sickerwasserkonzentrationen entlang der AVUS Berlin (BAB 115), Immobilisierungsversuche mit Kalk, Dissertation der TU Berlin, 2010

LANGBEIN M., STEINER M., BOLLER M. (2006): Spurenstoffe m Straßenabwasser einer stark befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbermaterial, Schlussbericht des Forschungsprojektes, in Zusammenarbeit von Eawag, Berner Fachhochschule, GSA, ASTRA, BUWAL, 2006

LANGHANS, G. (1998): Biochemische Schwermetallauskreisung aus organischen Abfällen während des Anaerobprozesses, Abfallwirtschaftsjournal 5/1998

LINS, A. (2013): Untersuchungen an einer zweistufigen Gewässerschutzanlage mit trockenfallendem Bodenfilterbecken, Masterarbeit BOKU, Oktober 2013

LUDWIG, T. (2007): Kupfer- und Zinkentfernung aus Niederschlagsabfluss von Dächern in einem Eisen-Korrosionssystem, Dissertation der TU Berlin, 2007

MEASHO HAILE, T. (2008): Removal of stormwater runoff pollutants from parking area using natural geomedia materials, Master thesis BOKU, June 2008

ÖNORM B-2506-2 (2012): Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen – Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen, Austrian Standards, 15.11.2012

POPURI S.R., VIJAYA Y., BODDU V.M., ABBURI K. (2009): Adsorptive removal of copper and nickel ions from using chitosan coated PVC beads, Journal of Bioresource Technology, www.sciencedirect.com, 2009

QZV CHEMIE GW BGBl. II Nr. 98/2010: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW), [CELEX-Nr: 31991L0692, 32006L0118], 2010

QZV CHEMIE OG BGBl. II Nr. 96/2006: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des Zielzustandes für Oberflächengewässer (Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer – QZV Chemie OG), [CELEX-Nr.: 31976L0464, 31982L0176, 31983L0513, 31984L0156, 31984L0491, 31986L0280, 32000L0060], 2006

SCHMITT G., WELKER A., DIERSCHKE M., UHL M., MAUS C., REMMLER F. (2010): Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren, Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Juli 2010

SONNENBERG, A. (2003): Simultane Sorption von Blei(II), Kupfer(II) und Chrom(II) in Säulenversuchen mit ungestörten, versauerten Waldböden, Dissertation der Universität Paderborn, 2003

UMWELTANWALTSCHFT OÖ (2009): Flächenverbrauch und Versiegelung, Positionspapier, Endbericht Juni 2009

VUKOJEVIĆ MEDVIDOVIĆ N., PERIĆ J, TRGO M. (2005): Column performance in lead removal from aqueous solutions by fixed bed of natural zeolite-clinoptilolite, Separation and Purification Technology 49 (2006) 237-244, www.sciencedirect.com, 2005

7.1 Internetverzeichnis

LENNTECH, URL: http://www.lenntech.de/pse/elemente/ni.htm (Abruf 30.09.2013)

WIKIPEDIA, URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Schwermetalle (Abruf 30.09.2013)

8. Anhang

8.1 Repräsentative mittlere Konzentrationen (Göbel et al., S.35)

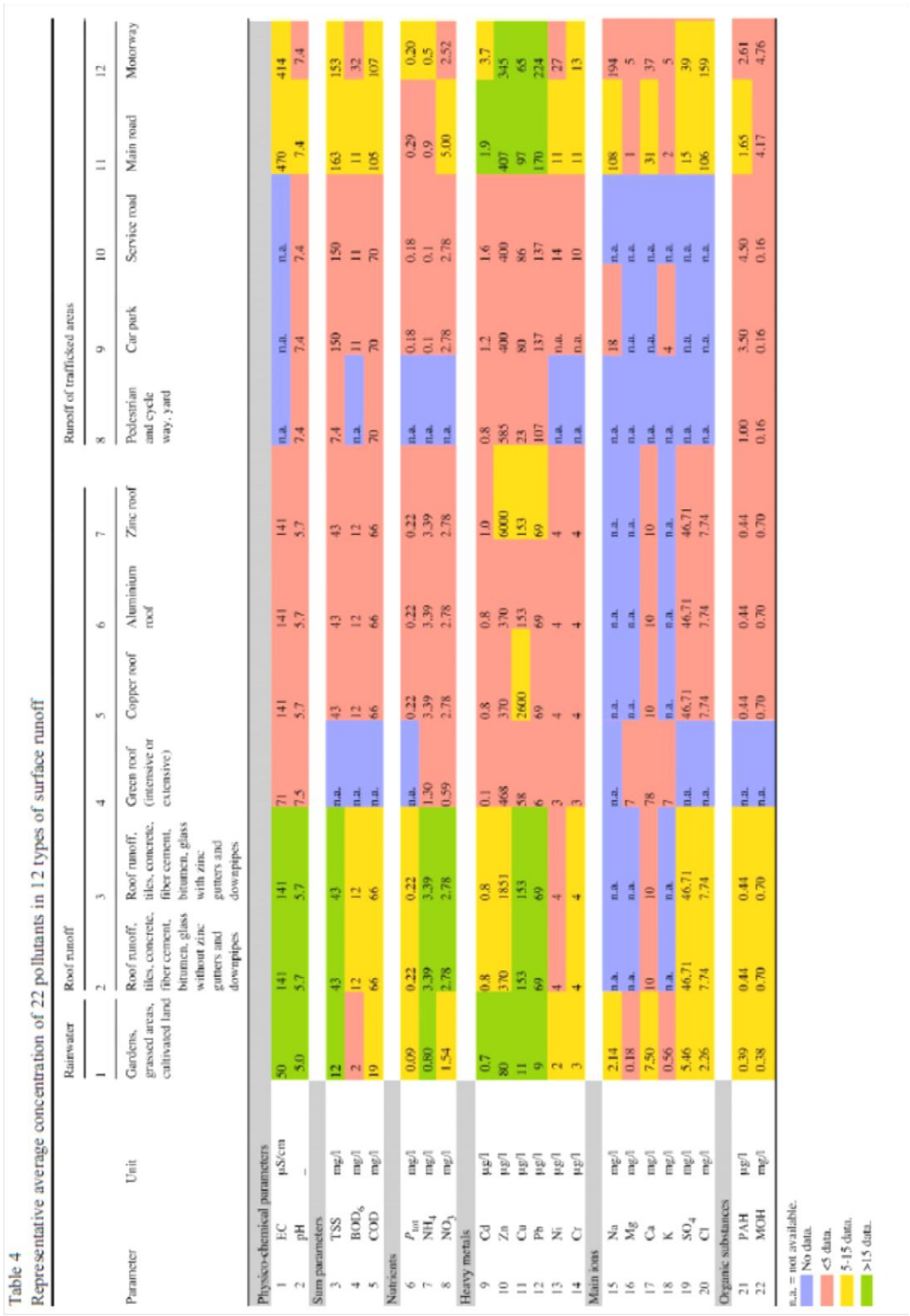


Table 4
Representative average concentration of 22 pollutants in 12 types of surface runoff

			Rainwater	Roof runoff						Runoff of trafficked areas					
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Parameter		Unit	Gardens, grassed areas, cultivated land	Roof runoff, tiles, concrete, fiber cement, bitumen, glass without zinc gutters and downpipes	Roof runoff, tiles, concrete, fiber cement, bitumen, glass with zinc gutters and downpipes	Green roof (intensive or extensive)	Copper roof	Aluminium roof	Zinc roof	Pedestrian and cycle way, yard	Car park	Service road	Main road	Motorway	
Physico-chemical parameters															
1	EC	µS/cm	50	141	141	71	141	141	141	n.a.	n.a.	n.a.	470	414	
2	pH	–	5.0	5.7	5.7	7.5	5.7	5.7	5.7	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	
Sum parameters															
3	TSS	mg/l	12	43	43	n.a.	43	43	43	7.4	150	150	163	153	
4	BOD_5	mg/l	2	12	12	n.a.	12	12	12	n.a.	11	11	11	32	
5	COD	mg/l	19	66	66	n.a.	66	66	66	70	70	70	105	107	
Nutrients															
6	P_{tot}	mg/l	0.09	0.22	0.22	n.a.	0.22	0.22	0.22	n.a.	0.18	0.18	0.29	0.20	
7	NH_4	mg/l	0.80	3.39	3.39	1.30	3.39	3.39	3.39	n.a.	0.1	0.1	0.9	0.5	
8	NO_3	mg/l	1.54	2.78	2.78	0.59	2.78	2.78	2.78	n.a.	2.78	2.78	5.00	2.52	
Heavy metals															
9	Cd	µg/l	0.7	0.8	0.8	0.1	0.8	0.8	1.0	0.8	1.2	1.6	1.9	3.7	
10	Zn	µg/l	80	370	1851	468	370	370	6000	585	400	400	407	345	
11	Cu	µg/l	11	153	153	58	2600	153	153	23	80	86	97	65	
12	Pb	µg/l	9	69	69	6	69	69	69	107	137	137	170	224	
13	Ni	µg/l	2	4	4	3	4	4	4	n.a.	n.a.	14	11	27	
14	Cr	µg/l	3	4	4	3	4	4	4	n.a.	n.a.	10	11	13	
Main ions															
15	Na	mg/l	2.14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	18	n.a.	108	194	
16	Mg	mg/l	0.18	n.a.	n.a.	7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1	5	
17	Ca	mg/l	7.50	10	10	78	10	10	10	n.a.	n.a.	n.a.	31	37	
18	K	mg/l	0.56	n.a.	n.a.	7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4	n.a.	2	5	
19	SO_4	mg/l	5.46	46.71	46.71	n.a.	46.71	46.71	46.71	n.a.	n.a.	n.a.	15	39	
20	Cl	mg/l	2.26	7.74	7.74	n.a.	7.74	7.74	7.74	n.a.	n.a.	n.a.	106	159	
Organic substances															
21	PAH	µg/l	0.39	0.44	0.44	n.a.	0.44	0.44	0.44	1.00	3.50	4.50	1.65	2.61	
22	MOH	mg/l	0.38	0.70	0.70	n.a.	0.70	0.70	0.70	0.16	0.16	0.16	4.17	4.76	

n.a. = not available.
No data.
<5 data.
5-15 data.
>15 data.

8.2 Repräsentative Konzentrationen (Helmreich et al., 2010, S. 993)

Table 1
Summarized results of the parameters analyzed in the road runoff.

Parameter	Unit	*n*	Minimum	Maximum	Median	Mean	BBSchV, 1999
Cd, total	$\mu g\,L^{-1}$	55	<0.5	4.8	<0.5	<0.5	5
Cu, total	$\mu g\,L^{-1}$	57	24	604	155	191	50
Na	$mg\,L^{-1}$	38	17.6	10 400	–[a]	–[a]	–
Ni, total	$\mu g\,L^{-1}$	55	4.2	403	35	55	50
Pb, total	$\mu g\,L^{-1}$	57	<5.0	405	43	56	25
Zn, total	$\mu g\,L^{-1}$	57	128	3470	592	847	500
DOC	$mg\,L^{-1}$	55	3.6	81	17	21	–
TOC	$mg\,L^{-1}$	54	10	355	46	71	–
SS	$mg\,L^{-1}$	61	18.3	3165	175	355	–
pH value	–	63	6.2	8.3	7.5	7.5	–
EC	$\mu S\,cm^{-1}$	63	10.8	52 000	–[a]	–[a]	–

[a] Values not representative due to seasonal changes; *n* = number of samples.

8.3 Probenahmeprotokoll der Säulenversuche zur Erfassung des Schwermetallrückhaltes

Probenahmeprotokoll

S ... geschätzt R... gerechnet

fett = gemessen DZ..Drehzahl **verbrauchtes Volumen** tk..Kontaktzeit **durchflossen** BV..Bettvolumina durchflossene Jahre definiert durch Abflussmenge

Aktion	Tag	ø	Probe	Uhrzeit	t seit letzter Probe [h]	t seit Start [h]	Q [ml/min]	DZ [U/min]	V [L] B1, S	V [L] B1, R	V [L] B2, S	V[L] B2, R	pH-Wert	tk [sek]	v [m/s]	V [L]	V ges [L]	BV	BV ges	J_A Av = 1:15	J_A Av = 1:200	J_A Av = 1:100	Anmerkung
Versuchsreihe 1+2																							
Versuchsstart, Behälter 1 (+100 L)	23/01/2013			14:40		0.00	TFlb: 12, S: 18	150	0	0													
5 Dk und TFlb Dk, Konzentration 100/50			Zulauf 1	15:15	0.00	0.58							5.9										
		D1	S1	16:40	0.00	2.00	18	150						141	2.13E-03	2.16	2.16	51	51				Durchfluss unterschiedlich, Problem lag bei Pumpe
TFlb = TFlc		D1	**TFlb1**	16:40	0.00	2.00	12	150						212	1.42E-03	1.44	1.44	34	34				
	24/01/2013	D1	**S2**	09:00	16.33	18.33	18	150								17.64	19.80	417	468				
		D1	**TFlb2**	09:00	16.33	18.33	12	150	34	34						11.76	13.20	278	312				
		D1	S3	11:00	2.00	20.33	18	150								2.16	21.96	51	519				
		D1	TFlb3	11:00	2.00	20.33	12	150								1.44	14.64	34	346				
		D1	S4	13:00	2.00	22.33	18	150								2.16	24.12	51	570				
		D1	TFlb4	13:00	2.00	22.33	12	150								1.44	16.08	34	380				
Stopp Pumpe				14:05					42	43													Pumpe neu kalibriert, Säule TFlb hat sich entleert!
Versuchsstart				15:40																			Wechsel auf Teflonhahn bei TFlb
5 Dk, TFlb Dk, BA Dg, TFIIb Dk																							
Auffüllung Behälter 100 L (+45 L)				16:00					0	0													
		D1	S5	16:35	2.00	24.33	20	150								2.28	26.28	54	621				
		D1	**TFlb5**	16:35	2.00	24.33	20	150								1.92	17.52	45	414				
	25/01/2013	D1	S6	08:30	15.92	40.25	20	150						127	2.36E-03	19.10	45.38	451	1073				Versuchsstopp BA, da zu hohe Kolmation!
		D1	**TFlb6**	08:30	15.92	40.25	20	150						127	2.36E-03	19.10	36.62	451	866				
		D1	**TFIIb1**	08:30	0.00	16.83	19	150						134	2.25E-03	19.19	19.19	454	454				
		D1	S7	10:30	2.00	42.25	20	150								2.40	47.78	57	1129				
		D1	TFlb7	10:30	2.00	42.25	20	150								2.40	39.02	57	922				
		D1	**TFIIb2**	10:30	2.00	18.83	19	150								2.28	21.47	54	507				
		D1	S8	12:30	2.00	44.25	20	150								2.40	50.18	57	1186				
		D1	TFlb8	12:30	2.00	44.25	20	150								2.40	41.42	57	979				
		D1	TFIIb3	12:30	2.00	20.83	19	150	70	73						2.28	23.75	54	561				
		D1	S9	14:30	2.00	46.25	20	150								2.40	52.58	57	1243				
		D1	TFlb9	14:30	2.00	46.25	20	150								2.40	43.82	57	1036				
		D1	TFIIb4	14:30	2.00	22.83	19	150								2.28	26.03	54	615				
Behälter 2 (+160 L) in Betrieb genommen										85													
Auffüllung Behälter 1 auf 100 L (+70L)				16:00					0	0	0	0											B1: TFIIb, B2: TFlb, S
		D1	**S10**	16:30	2.00	48.25	20	150								2.40	54.98	57	1300				
		D1	**TFlb10**	16:30	2.00	48.25	20	150								2.40	46.22	57	1092				
		D1	**TFIIb5**	16:30	2.00	24.83	19	150								2.28	28.31	54	669				
			Zulauf 2	16:30																			aus B1 entnommen
	26/01/2013	D1	S11	10:40	18.17	66.42	20	150								21.80	76.78	515	1815				
		D1	**TFlb11**	10:40	18.17	66.42	20	150								21.80	68.02	515	1608				
		D1	**TFIIb6**	10:40	18.17	43.00	19	150	14	21	48	44				20.71	49.02	490	1159				
	28/01/2013	D1	S12	09:00	46.33	112.75	20	150								55.60	132.38	1314	3129				
		D1	**TFlb12**	09:00	46.33	112.75	20	150								55.60	123.62	1314	2922				
		D1	**TFIIb7**	09:00	46.33	89.33	19	150								52.82	101.84	1248	2407				
Auffüllung beider Behälter 1 und 2																							
B1: +75 L, B2: + 145 L				09:00					0	0	0	0											
			Zulauf 3	09:00																			aus B1 entnommen
		D1	S13	11:00	2.00	114.75	20	150								2.40	134.78	57	3186				
		D1	TFlb13	11:00	2.00	114.75	20	150								2.40	126.02	57	2979				
		D1	TFIIb8	11:00	2.00	91.33	19	150								2.28	104.12	54	2461				
		D1	S14	13:00	2.00	116.75	20	150								2.40	137.18	57	3242				
		D1	TFlb14	13:00	2.00	116.75	20	150								2.40	128.42	57	3035				
		D1	TFIIb9	13:00	2.00	93.33	19	150								2.28	106.40	54	2515				
		D1	S15	15:00	2.00	118.75	20	150								2.40	139.58	57	3299				
		D1	TFlb15	15:00	2.00	118.75	20	150								2.40	130.82	57	3092				
		D1	TFIIb10	15:00	2.00	95.33	19	150								2.28	108.68	54	2569				
		D1	S16	17:00	2.00	120.75	20	150								2.40	141.98	57	3356				
		D1	**TFlb16**	17:00	2.00	120.75	20	150								2.40	133.22	57	3149				
		D1	**TFIIb11**	17:00	2.00	97.33	19	150								2.28	110.96	54	2623				
																							über Nacht wurde die Durchflussrate auf ca. 24 ml/min erhöht (250 U/min), in der Früh wurde wieder auf 150 U/min reduziert
	29/01/2013	D1	S17	08:15	15.25	136.00	20	150								18.30	160.28	433	3788				
		D1	**TFlb17**	08:15	15.25	136.00	20	150								18.30	151.52	433	3581				
		D1	**TFIIb12**	08:15	15.25	112.58	19	150								17.39	128.35	411	3034				
		D1	S18	10:15	2.00	138.00	20	150								2.40	162.68	57	3845				
		D1	TFlb18	10:15	2.00	138.00	20	150								2.40	153.92	57	3638				
		D1	TFIIb13	10:15	2.00	114.58	19	150								2.28	130.63	54	3087				
		D1	S19	12:15	2.00	140.00	18	150						141	2.13E-03	2.40	165.08	57	3902				Durchflussrate gesunken!
		D1	TFlb19	12:15	2.00	140.00	19	150						134	2.25E-03	2.40	156.32	57	3695				
		D1	TFIIb14	12:15	2.00	116.58	19	150						134	2.25E-03	2.28	132.91	54	3141				
Auffüllung Behälter				13:00					0	0	0	0											
B1: +70 L, B2: +120 L		D1	S20	14:15	2.00	142.00	18	150								2.16	167.24	51	3953				
		D1	TFlb20	14:15	2.00	142.00	19	150								2.28	158.60	54	3749				

		D1	TFIIb15	14:15	2.00	118.58	19	150								2.28	135.19	54	3195				
		D1	**S21**	16:15	2.00	144.00	18	150								2.16	169.40	51	4004				
		D1	**TFIb21**	16:15	2.00	144.00	19	150								2.28	160.88	54	3803				
		D1	**TFIIb16**	16:15	2.00	120.58	19	150								2.28	137.47	54	3249				
Änderung Durchfluss, Stopp B2	30/01/2013			09:30		161.25	9	70				46					188.03						
						161.25											180.55						
						137.83											157.13						
		D1	**S22**	11:30	19.25	163.25	9	70						282	1.06E-03	19.71	189.11	466	4470				
		D1	**TFIb22**	11:30	19.25	163.25	9	70						282	1.06E-03	20.75	181.63	490	4293				
		D1	**TFIIb17**	11:30	19.25	139.83	9	70						282	1.06E-03	20.75	158.21	490	3739				
		D1	S23	14:45	3.25	166.50	9	70								1.76	190.87	41	4511				
		D1	TFIb23	14:45	3.25	166.50	9	70								1.76	183.38	41	4334				
		D1	TFIIb18	14:45	3.25	143.08	9	70								1.76	159.97	41	3781				B1: Stand bei 78 L
		D1	**S24**	17:00	2.25	168.75	9	70								1.22	192.08	29	4540				
		D1	**TFIb24**	17:00	2.25	168.75	9	70								1.22	184.60	29	4363				
		D1	**TFIIb19**	17:00	2.25	145.33	9	70								1.22	161.18	29	3810				
	31/01/2013	D1	**S25**	09:30	16.50	185.25	9	70								8.91	200.99	211	4751				
		D1	**TFIb25**	09:30	16.50	185.25	9	70								8.91	193.51	211	4574				
		D1	**TFIIb20**	09:30	16.50	161.83	9	70	52							8.91	170.09	211	4020				
																							Änderung Eingangskonzentrationen auf 500 µg/l Pb, Cu, Zn und 100 µg/l Cr, Ni, Behälterentleerung und Neubefüllung
Auffüllung B1 (+100 L), Änderung Eingangskonzentration (500/100)				10:00					0	0	0	0											
			Zulauf 4	10:00																			
Versuchsstart TFIIbRW				11:20	0.00		9	70															Beschickung mit Reinwasser
		D1	TFIIbRW1	11:50	0.50	0.50	**9**	70								0.27	0.27	6	6				
		D1	**S26**	12:00	2.50	187.75	9	70					6.6			1.35	202.34	32	4783				pH-Wert im Ablauf gemessen (T=19°C)
		D1	**TFIb26**	12:00	2.50	187.75	9	70					6.5			1.35	194.86	32	4606				pH-Wert im Ablauf gemessen (T=19°C)
		D1	**TFIIb21**	12:00	2.50	164.33	9	70					6.0			1.35	171.44	32	4052				pH-Wert im Ablauf gemessen (T=19°C)
		D1	TFIIbRW2	12:20	0.50	1.00	9	70								0.27	0.54	6	13				
		D1	S27	14:00	2.00	189.75	9	70								1.08	203.42	26	4808				
		D1	TFIb27	14:00	2.00	189.75	9	70								1.08	195.94	26	4631				
		D1	TFIIb22	14:00	2.00	166.33	9	70								1.08	172.52	26	4078				Versuchsende TFIIbRW
		D1	**S28**	16:00	2.00	191.75	9	70								1.08	204.50	26	4834				
		D1	**TFIb28**	16:00	2.00	191.75	9	70								1.08	197.02	26	4657				
		D1	**TFIIb23**	16:00	2.00	168.33	9	70								1.08	173.60	26	4103				
	01/02/2013	D1	**S29**	09:00	17.00	208.75	9	70								9.18	213.68	217	5051				
		D1	**TFIb29**	09:00	17.00	208.75	9	70								9.18	206.20	217	4874				
		D1	**TFIIb24**	09:00	17.00	185.33	9	70								9.18	182.78	217	4320				
		D1	S30	12:30	3.50	212.25	9	70								1.89	215.57	45	5095				
		D1	TFIb30	12:30	3.50	212.25	9	70								1.89	208.09	45	4918				
		D1	TFIIb25	12:30	3.50	188.83	9	70								1.89	184.67	45	4365				
		D1	S31	14:30	2.00	214.25	9	70								1.08	216.65	26	5121				
		D1	TFIb31	14:30	2.00	214.25	9	70								1.08	209.17	26	4944				
		D1	TFIIb26	14:30	2.00	190.83	9	70	42	46						1.08	185.75	26	4390	125.44	9.41	18.82	
Versuchsstopp				17:00						48													
Versuchsreihe 3																							
Versuchsstart, B1 (+100L) Sneu, TFIbneu, TFIIbneu Konzentration 100/50	07/02/2013			11:10			**4.8**	40	0	0			5.5										
TFIb = TFIc		D1	**S32**	13:10	0.00	2.00	4.8	40						529	5.67E-04	0.58	0.58	14	14				
		D1	**TFIb32**	13:10	0.00	2.00	4.8	40						529	5.67E-04	0.58	0.58	14	14				
		D1	**TFIIB27**	13:10	0.00	2.00	4.8	40						529	5.67E-04	0.58	0.58	14	14				
		D1	S33	15:10	2.00	4.00	4.8	40								0.58	1.15	14	27				
		D1	TFIb33	15:10	2.00	4.00	**4.8**	40								0.58	1.15	14	27				
		D1	TFIIB28	15:10	2.00	4.00	4.8	40								0.58	1.15	14	27				
			Zulauf 5	15:25																			
		D1	**S34**	17:10	2.00	6.00	4.8	40								0.58	1.73	14	41				
		D1	**TFIb34**	17:10	2.00	6.00	4.8	40								0.58	1.73	14	41				
		D1	**TFIIB29**	17:10	2.00	6.00	4.8	40								0.58	1.73	14	41				
	08/02/2013	D1	**S35**	09:00	15.83	21.83	4.8	40								4.56	6.29	108	149				
		D1	**TFIb35**	09:00	15.83	21.83	4.8	40								4.56	6.29	108	149				
		D1	**TFIIb30**	09:00	15.83	21.83	4.8	40								4.56	6.29	108	149				
		D1	S36	11:00	2.00	23.83	**4.8**	40	19	21						0.58	6.86	14	162				
		D1	TFIb36	11:00	2.00	23.83	4.8	40								0.58	6.86	14	162				
		D1	TFIIb31	11:00	2.00	23.83	4.8	40								0.58	6.86	14	162				
		D1	**S37**	13:00	2.00	25.83	**4.8**	40								0.58	7.44	14	176				
		D1	**TFIb37**	13:00	2.00	25.83	4.8	40								0.58	7.44	14	176				
		D1	**TFIIb32**	13:00	2.00	25.83	4.8	40								0.58	7.44	14	176				
		D1	S38	15:00	2.00	27.83	**4.8**	40								0.58	8.02	14	189				
		D1	TFIb38	15:00	2.00	27.83	4.8	40								0.58	8.02	14	189				
		D1	TFIIb33	15:00	2.00	27.83	4.8	40								0.58	8.02	14	189				
		D1	**S39**	17:00	2.00	29.83	**4.8**	40								0.58	8.59	14	203				
		D1	**TFIb39**	17:00	2.00	29.83	4.8	40								0.58	8.59	14	203				
		D1	**TFIIb34**	17:00	2.00	29.83	4.8	40								0.58	8.59	14	203				
	09/02/2013	D1	**S40**	10:45	17.75	47.58	4.8	40								5.11	13.70	121	324				
		D1	**TFIb40**	10:45	17.75	47.58	4.8	40								5.11	13.70	121	324				
		D1	**TFIIb35**	10:45	17.75	47.58	4.8	40								5.11	13.70	121	324				
Versuchsende				11:00		47.83			41	41													

Versuchsfortführung	11/02/2013			09:00															
		D1	S41	11:00	2.25	49.83	4.8	40					0.65	14.35	15	339			
		D1	TFIb41	11:00	2.25	49.83	4.8	40					0.65	14.35	15	339			
		D1	TFIIb36	11:00	2.25	49.83	**4.8**	40					0.65	14.35	15	339			
		D1	S42	13:00	2.00	51.83	4.8	40					0.58	14.93	14	353			
		D1	TFIb42	13:00	2.00	51.83	4.8	40					0.58	14.93	14	353			
		D1	TFIIb37	13:00	2.00	51.83	4.8	40					0.58	14.93	14	353			
		D1	S43	15:00	2.00	53.83	4.8	40					0.58	15.50	14	366			
		D1	TFIb43	15:00	2.00	53.83	4.8	40					0.58	15.50	14	366			
		D1	TFIIb38	15:00	2.00	53.83	4.8	40					0.58	15.50	14	366			
		D1	S44	17:00	2.00	55.83	4.8	40					0.58	16.08	14	380			
		D1	TFIb44	17:00	2.00	55.83	4.8	40					0.58	16.08	14	380			
		D1	TFIIb39	17:00	2.00	55.83	4.8	40					0.58	16.08	14	380			
	12/02/2013	D1	S45	08:30	15.50	71.33	4.8	40					4.46	20.54	106	486			
		D1	TFIb45	08:30	15.50	71.33	4.8	40					4.46	20.54	106	486			
		D1	TFIIb40	08:30	15.50	71.33	4.8	40					4.46	20.54	106	486			
Änderung Durchfluss auf ca. 11 ml/min				09:00		71.83		90						20.69					
		D1	S46	10:30	2.00	73.33	**10.8**	90			235	1.28E-03	1.30	21.66	31	512			
		D1	TFIb46	10:30	2.00	73.33	**10**	90			254	1.18E-03	1.20	21.59	28	510			
		D1	TFIIb41	10:30	2.00	73.33	11	90	65	65	231	1.30E-03	1.32	21.68	31	512			
		D1	S47	12:30	2.00	75.33	10.8	90					1.30	22.96	31	543			
		D1	TFIb47	12:30	2.00	75.33	10	90					1.20	22.79	28	539			
		D1	TFIIb42	12:30	2.00	75.33	11	90					1.32	23.00	31	544			
		D1	S48	14:30	2.00	77.33	10.8	90					1.30	24.25	31	573			
		D1	TFIb48	14:30	2.00	77.33	10	90					1.20	23.99	28	567			
		D1	TFIIb43	14:30	2.00	77.33	11	90					1.32	24.32	31	575			
		D1	S49	16:30	2.00	79.33	10.8	90					1.30	25.55	31	604			
		D1	TFIb49	16:30	2.00	79.33	10	90					1.20	25.19	28	595			
		D1	TFIIb44	16:30	2.00	79.33	11	90					1.32	25.64	31	606			
Änderung Durchfluss auf ca. 5 ml/min				16:30				40											
	13/02/2013	D1	S50b	08:30	16.00	95.33	4.8	90			529	5.67E-04	4.61	35.92	109	849			
		D1	TFIb50b	08:30	16.00	95.33	4.8	90			529	5.67E-04	4.61	34.79	109	822			
		D1	TFIIb45	08:30	16.00	95.33	4.8	90		91	529	5.67E-04	4.61	36.20	109	856			
Versuchsstopp				12:00		98.83				94									
Versuchsreihe 4																			
																		Durchführung Versuchsreihe 3 Tadele und Miguel,	
Versuchsstart, B1 (+100L)	20/02/2013			11:30						0								selbst nicht anwesend	
Konzentration 100/50			Zulauf 6	11:30															
Sneu2, TFIbneu2, TFIIBneu2		D1	**S50**	13:30	0.00	2.00	22				115	2.60E-03	2.64	2.64	62	62		Durchfluss am Anfang nicht 22 ml/min	
TFIb = TFIc		D1	**TFIb50**	13:30	0.00	2.00	7				363	8.27E-04	0.84	0.84	20	20			
		D1	**TFIIb46**	13:30	0.00	2.00	7				363	8.27E-04	0.84	0.84	20	20			
		D1	S51	15:30	2.00	4.00	22						2.64	5.28	62	125			
		D1	TFIb51	15:30	2.00	4.00	7						0.84	1.68	20	40			
		D1	**TFIIb47**	15:30	2.00	4.00	7						0.84	1.68	20	40			
		D1	**S52**	17:30	2.00	6.00	22						2.64	7.92	62	187			
		D1	**TFIb52**	17:30	2.00	6.00	7						0.84	2.52	20	60			
		D1	TFIIb48	17:30	2.00	6.00	7						0.84	2.52	20	60			
	21/02/2013	D1	**S53**	09:00	15.50	21.50	22						20.46	28.38	484	671			
		D1	**TFIb53**	09:00	15.50	21.50	7						6.51	9.03	154	213			
		D1	**TFIIb49**	09:00	15.50	21.50	7						6.51	9.03	154	213			
		D1	**S54**	12:00	3.00	24.50	22						3.96	32.34	94	764			
		D1	TFIb54	12:00	3.00	24.50	7						1.26	10.29	30	243			
		D1	TFIIb50	12:00	3.00	24.50	7						1.26	10.29	30	243			
		D1	**S55**	16:00	3.00	27.50	22						3.96	36.30	94	858			
		D1	**TFIb55**	16:00	3.00	27.50	7						1.26	11.55	30	273			
		D1	**TFIIb51**	16:00	3.00	27.50	7						1.26	11.55	30	273			
	22/02/2013	D1	**S56**	09:30	17.50	45.00	22			97.2			23.10	59.40	546	1404			
		D1	**TFIb56**	09:30	17.50	45.00	7						7.35	18.90	174	447			
		D1	**TFIIb52**	09:30	17.50	45.00	7						7.35	18.90	174	447			
		D1	S57	11:30	2.00	47.00	22						2.64	62.04	62	1466			
		D1	TFIb57	11:30	2.00	47.00	7						0.84	19.74	20	467			
		D1	TFIIb53	11:30	2.00	47.00	7						0.84	19.74	20	467			
		D1	S58	13:30	2.00	49.00	22			105.84			2.64	64.68	62	1529			
		D1	**TFIb58**	13:30	2.00	49.00	7						0.84	20.58	20	486			
		D1	**TFIIb54**	13:30	2.00	49.00	7						0.84	20.58	20	486			
		D1	S59	15:00	1.50	50.50	22						1.98	66.66	47	1576			
		D1	**TFIb59**	15:00	1.50	50.50	7						0.63	21.21	15	501			
		D1	**TFIIb55**	15:00	1.50	50.50	7						0.63	21.21	15	501		Behälter mit 100 L ist sich ausgegangen	
Versuchsende				15:00		50.50													
Versuchsstart Bodensäule BA	25/02/2013			10:00															
selber Zulauf wie Versuchsreihe 3		D2	**BA1**	12:30	0.00	2.50	2	150					0.30	0.30	3	3			
Konzentration 100/50		D2	BA2	15:30	3.00	5.50	2	150					0.36	0.66	3	6		trüb!	
Versuchsfortführung, B1 (+50L)	26/02/2013			10:00					0									Erhöhung Durchfluss auf 7 ml/min	
TFIbneu2, TFIIbneu2																			
		D2	**BA3**	10:00	17.50	23.00	6.25	250					2.10	2.76	18	24			
		D1	TFIb60	12:00	2.00	52.50	**6.75**	250			376	7.98E-04	0.81	22.02	19	520			

		D1	TFIIb56	12:00	2.00	52.50	**6.75**	250				376	7.98E-04	0.81	22.02	19	520				
		D2	BA4	12:00	2.00	25.00	**6.25**	250				1095	2.74E-04	0.75	3.51	7	31				
		D1	**TFIb61**	14:00	2.00	54.50	6.75	250						0.81	22.83	19	540				
		D1	**TFIb57**	14:00	2.00	54.50	6.75	250						0.81	22.83	19	540				
		D2	**BA5**	14:00	2.00	27.00	6.25	250						0.75	4.26	7	37				
		D1	**TFIb62**	16:00	2.00	56.50	6.75	250						0.81	23.64	19	559				
		D1	**TFIb58**	16:00	2.00	56.50	6.75	250						0.81	23.64	19	559				
		D2	**BA6**	16:00	2.00	29.00	6.25	250						0.75	5.01	7	44				
	27/02/2013	D2	BA7	11:00	19.00	48.00	**6.67**	250	25	29.625		1026	2.92E-04	7.60	12.14	67	106				
		D2	BA8	13:00	2.00	50.00	6.67	250						0.80	12.94	7	113				
		D2	BA9	15:00	2.00	52.00	6.67	250						0.80	13.74	7	120				
		D1	TFIb63	15:00	23.00	79.50	6.75	250						9.32	32.96	220	779				
		D1	TFIIb59	15:00	23.00	79.50	6.75	250						9.32	32.96	220	779				
Versuchsstopp TFIbneu2, TFIIbneu2				16:30		81.00															
	28/02/2013	D2	BA10	10:15	19.25	71.25	**6**	250	88			1140	2.63E-04	6.93	21.44	61	188				
		D2	BA11	12:15	2.00	73.25	6	250						0.72	22.16	6	194				
		D2	BA12	14:15	2.00	75.25	6	250						0.72	22.88	6	201				
		D2	BA13	16:15	2.00	77.25	6	250						0.72	23.60	6	207				
	01/03/2013	D2	BA14	09:45	17.50	94.75	6	250	98					6.30	29.90	55	262				
Versuchsende			ca.	15:15		100.25			100												
Versuchsreihe 5																					
Versuchsstart, B2 (+160L)	04/04/2013			09:35							0	5.6									pH-Zulauf
Konzentration 400/100/50																					
neue Säulen TFIc, TFIIb, BA d = 32 mm			**Zulauf 8**	11:00																	
		D3	BA15	12:35	0.00	3.00	**12.5**	500				772	2.59E-04	2.25	2.25	14	14	0.27	0.02	0.04	
		D3	TFIc64	12:35	0.00	3.00	**27**	500				357	5.60E-04	4.86	4.86	30	30	0.58	0.04	0.09	
		D3	**TFIIb60**	12:35	0.00	3.00	**39.5**	500				244	8.19E-04	7.11	7.11	44	44	0.84	0.06	0.13	
		D3	**BA16**	15:35	3.00	6.00	**12.5**	500						2.25	4.50	14	28	0.53	0.04	0.08	
		D3	**TFIc65**	15:35	3.00	6.00	**27**	500						4.86	9.72	30	60	1.15	0.09	0.17	
		D3	**TFIIb61**	15:35	3.00	6.00	**39**	500						7.02	14.04	44	87	1.66	0.12	0.25	
	05/04/2013	D3	**BA17**	09:05	17.50	23.50	**12.5**	500			9.2			13.13	17.63	82	110	2.09	0.16	0.31	pH-Ablauf
		D3	**TFIc66**	09:05	17.50	23.50	**26**	500			9.4			28.35	38.07	176	237	4.51	0.34	0.68	pH-Ablauf
		D3	**TFIIb62**	09:05	17.50	23.50	**37**	500		110 111	9.3			40.95	**54.99**	255	342	6.51	0.49	**0.98**	pH-Ablauf
		D3	BA18	12:05	3.00	26.50	12.5	500						2.25	19.88	14	124	2.35	0.18	0.35	
		D3	TFIc67	12:05	3.00	26.50	26	500						4.68	42.75	29	266	5.06	0.38	0.76	
		D3	TFIIb63	12:05	3.00	26.50	37	500						6.66	61.65	41	383	7.30	0.55	1.10	
		D3	**BA19**	15:05	3.00	29.50	12.5	500						2.25	22.13	14	138	2.62	0.20	0.39	
		D3	**TFIc68**	15:05	3.00	29.50	26	500						4.68	47.43	29	295	5.62	0.42	0.84	
		D3	**TFIIb64**	15:05	3.00	29.50	37	500						6.66	68.31	41	425	8.09	0.61	1.21	
Stopp Pumpe				15:20						140 134											
Versuchsfortführung und Versuchsstart 5	08/04/2013			11:10																	
			5	11:30			**59**	300													
			BA	11:30			**7.75**	300													
			TFIc	11:30			**35**	300													
			TFIIb	11:30			**35**	300													
			Zulauf 9	12:00							5.6										
Wechsel Behälter, B2 (+160L)				12:55						0 0											
		D3	**560**	13:40	0.00	2.50	59	300						8.85	**8.85**	55	55	**1.05**	0.08	0.16	
		D3	**BA20**	13:40	2.75	32.25	7.75	300						1.28	**23.48**	8	146	**2.78**	0.21	0.42	
		D3	**TFIc69**	13:40	2.75	32.25	35	300						5.78	**53.07**	36	330	6.28	0.47	**0.94**	
		D3	TFIIb65	13:40	2.75	32.25	35	300						5.78	74.12	36	461	8.78	0.66	1.32	
		D3	**561**	16:00	2.33	4.83	59	300						8.25	**17.10**	51	106	**2.02**	0.15	0.30	
		D3	**BA21**	16:00	2.33	34.58	7.75	300						1.08	24.56	7	153	2.91	0.22	0.44	
		D3	**TFIc70**	16:00	2.33	34.58	35	300						4.89	57.96	30	360	6.86	0.51	1.03	
		D3	**TFIIb66**	16:00	2.33	34.58	35	300		28				4.89	79.01	30	491	9.36	0.70	1.40	
																					Stopp Sandsäule (wird jeweils am Tagesende abgedreht und am Beginn wieder in Betrieb genommen)
			5	16:00																	
	09/04/2013		5	09:05			**55**				7.3										Start Sandsäule, hat sich entleert, pH Ablauf
		D3	**BA22**	09:05	17.08	51.66	**7.25**	300			9.5			7.94	**32.50**	49	202	**3.85**	0.29	0.58	pH-Ablauf
		D3	**TFIc71**	09:05	17.08	51.66	**32.5**	300			9.3			35.87	93.84	223	583	11.11	0.83	1.67	pH-Ablauf
		D3	**TFIIb67**	09:05	17.08	51.66	**32.5**	300		105 104	9.1			35.87	114.**88**	223	714	13.60	**1.02**	**2.04**	pH-Ablauf
		D3	**562**	11:20	2.25	7.08	55	300						7.43	**24.52**	46	152	**2.90**	0.22	0.44	
		D3	BA23	11:20	2.25	53.91	7.25	300						0.98	33.48	6	208	3.96	0.30	0.59	
		D3	TFIc72	11:20	2.25	53.91	32.5	300						4.39	98.22	27	611	11.63	0.87	1.74	
		D3	TFIIb68	11:20	2.25	53.91	32.5	300		122 121				4.39	119.27	27	741	14.12	1.06	2.12	
		D3	**563**	14:20	3.00	10.08	55	300				13.47		9.90	**34.42**	62	214	**4.08**	0.31	0.61	
			5	14:20																	Stopp Sandsäule (aus Schwermetallmangel)
		D3	BA24	14:20	3.00	56.91	7.25	300						1.31	34.79	8	216	4.12	0.31	0.62	
		D3	TFIc73	14:20	3.00	56.91	32.5	300						5.85	104.07	36	647	12.32	0.92	1.85	
		D3	TFIIb69	14:20	3.00	56.91	32.5	300		144				5.85	125.12	36	778	14.82	1.11	2.22	
			Zulauf 10	16:00							5.6										
		D3	**BA25**	16:00	1.66	58.57	7.25	300						0.72	35.51	4	221	4.20	0.32	0.63	
		D3	**TFIc74**	16:00	1.66	58.57	32.5	300						3.24	**107.31**	20	667	12.71	**0.95**	**1.91**	
		D3	**TFIIb70**	16:00	1.66	58.57	32.5	300		151				3.24	128.36	20	798	15.20	1.14	2.28	
Wechsel Behälter, B2 (+160L)				16:15						0 0											
	10/04/2013	D3	**BA26**	09:00	17.00	75.57	**7.25**	300						7.40	42.90	46	267	5.08	0.38	0.76	
		D3	**TFIc75**	09:00	17.00	75.57	**32.5**	300						33.15	140.46	206	873	16.63	1.25	2.49	

		D3	**TFIIb71**	09:00	17.00	75.57	**32.5**	300		80	73				33.15	161.51	206	1004	19.13	1.43	**2.87**	
		D3	BA27	13:00	4.00	79.57	7.25	300							1.74	44.64	11	278	5.29	0.40	0.79	
		D3	TFIc76	13:00	4.00	79.57	32.5	300							7.80	148.26	48	922	17.56	1.32	2.63	
		D3	TFIIb72	13:00	4.00	79.57	32.5	300		85	90				7.80	169.31	48	1053	20.05	1.50	3.01	
		D3	**BA28**	16:00	3.00	82.57	7.25	300							1.31	45.95	8	286	5.44	0.41	0.82	
		D3	**TFIc77**	16:00	3.00	82.57	32.5	300							5.85	154.11	36	958	18.25	1.37	**2.74**	
		D3	**TFIIb73**	16:00	3.00	82.57	32.5	300			103				5.85	175.16	36	1089	20.74	1.56	3.11	
Wechsel TFIIb auf neuen Behälter (+160L)				16:00							0											
Betrieb 2 Behälter gleichzeitig			Zulauf 11	16:00								5.9										
	11/04/2013	D3	**BA29**	09:00	17.00	99.57	**7**	300				9.4			7.40	53.34	46	332	6.32	0.47	**0.95**	pH-Ablauf
		D3	**TFIc78**	09:00	17.00	99.57	**32**	300		147	144	9.4			33.15	187.26	206	1164	22.18	1.66	3.33	pH-Ablauf
		D3	**TFIIb74**	09:00	17.00	99.57	**32**	300		33	33	8.7			33.15	208.31	206	1295	24.67	1.85	3.70	pH-Ablauf
Ein Behälter leer, Wechsel TFIc, BA auf				12:40																		
anderen Behälter		D3	BA30	13:00	4.00	103.57	7	300							1.68	55.02	10	342	6.52	0.49	0.98	
		D3	TFIc79	13:00	4.00	103.57	32	300							7.68	194.94	48	1212	23.08	1.73	3.46	Wechsel Pumpenschlauf wegen Luftblasenbildung
		D3	TFIIb75	13:00	4.00	103.57	32	300		40	40				7.68	215.99	48	1343	25.58	1.92	3.84	
		D3	**BA31**	16:00	3.00	106.57	7	300							1.26	56.28	8	350	6.66	0.50	1.00	
		D3	**TFIc80**	16:00	3.00	106.57	32	300							5.76	**200.70**	36	1248	23.77	**1.78**	**3.57**	
		D3	**TFIIb76**	16:00	3.00	106.57	32	300		55	53				5.76	**221.75**	36	1379	26.26	**1.97**	**3.94**	
	12/04/2013	D3	**BA32**	09:00	17.00	123.57	**7.25**	300							7.14	63.42	44	394	7.51	0.56	1.13	
		D3	**TFIc81**	09:00	17.00	123.57	**33**	300							32.64	233.34	203	1451	27.63	2.07	4.14	
		D3	**TFIIb77**	09:00	17.00	123.57	**28.5**	300		129	123				32.64	254.39	203	1582	30.12	2.26	4.52	
			TFIIb	09:45		124.32	33	300								255.87						Wechsel Pumpenschlauch wegen Luftblasenbildung
		D3	BA33	12:00	3.00	126.57	7.25	300							1.31	64.73	8	402	7.67	0.57	1.15	
		D3	TFIc82	12:00	3.00	126.57	33	300							5.94	239.28	37	1488	28.34	2.13	4.25	
		D3	TFIIb78	12:00	3.00	126.57	33	300		142	142				5.94	260.33	37	1618	30.83	2.31	4.62	
		D3	**BA34**	15:00	3.00	129.57	7.25	300							1.31	66.03	8	411	7.82	0.59	1.17	Probe nur halb voll
		D3	TFIc	15:00	3.00	129.57	33	300							5.94	245.22	37	1525	29.04	2.18	4.36	
		D3	**TFIIb79**	15:00	3.00	129.57	33	300		160					5.94	266.27	37	1655	31.53	2.36	4.73	Probe nur halb voll, TFIc keine Probenahme (Behälter leer)
Stopp Pumpe				15:00																		
Start BA, S, TFIc, TFIIb	15/04/2013			10:55								5.6										
neuer Behälter (+320 L)																						
				11:05																		Stopp, Einstellung Pumpenschläuche
			S	11:20	0.17	10.25	**43**	300							0.43	34.85	3	217	4.13	0.31	0.62	Start
			BA		0.17	129.74	**7.75**	300							0.08	66.11	0	411	7.83	0.59	1.17	
			TFIc		3.17	129.74	**22**	300							4.18	245.44	26	1526	29.06	2.18	4.36	
			TFIIb		0.17	129.74	**35**	300							0.35	266.62	2	1658	31.57	2.37	4.74	
			S	11:55	0.75	10.83	**60**	300							2.70	36.36	17	226	4.31	0.32	0.65	Wechsel Schläuche
			BA		0.75	130.32	**7.75**	300							0.35	66.38	2	413	7.86	0.59	1.18	
			TFIc		3.75	130.32	**22**	300							4.95	246.21	31	1531	29.16	2.19	4.37	
			TFIIb		0.75	130.32	**19**	300							0.86	267.84	5	1665	31.72	2.38	4.76	
			S	12:15	1.08	11.16	**76**	400							4.94	37.56	31	233	4.45	0.33	0.67	Erhöhung Drehzahl auf 400 U/min
			BA		1.08	130.66	**10.25**	400							0.67	66.54	4	414	7.88	0.59	1.18	
			TFIc		4.08	130.66	**28**	400							6.86	246.65	43	1533	29.21	2.19	4.38	
			TFIIb		1.08	130.66	**25**	400		10					1.63	268.22	10	1668	31.76	2.38	4.76	
		D3	**S64**	14:00	3.08	13.16	76	400							14.06	46.68	87	290	5.53	0.41	0.83	
		D3	**BA35**	14:00	3.08	132.66	10.25	400							1.90	67.77	12	421	8.02	0.60	1.20	
		D3	**TFIc83**	14:00	6.08	132.66	28	400							10.22	250.01	64	1554	29.61	2.22	4.44	
		D3	**TFIIb80**	14:00	3.08	132.66	25	400			25				4.63	271.22	29	1686	32.12	2.41	4.82	
			Zulauf 12																			
		D3	**S65**	17:00	3.00	16.16	76	400							13.68	60.36	85	375	7.15	0.54	**1.07**	
		D3	**BA36**	17:00	3.00	135.66	10.25	400							1.85	69.61	11	433	8.24	0.62	1.24	
		D3	**TFIc84**	17:00	3.00	135.66	28	400							5.04	255.05	31	1586	30.20	2.27	4.53	
		D3	**TFIIb81**	17:00	3.00	135.66	25	400			50				4.50	275.72	28	1714	32.65	2.45	4.90	
Start S	16/04/2013	D3	**S66**	09:00	16.00	32.16	**68**	400							72.96	**133.32**	454	829	15.79	**1.18**	**2.37**	
		D3	**BA37**	09:00	16.00	151.66	**10**	400							9.84	79.45	61	494	9.41	0.71	1.41	
		D3	**TFIc85**	09:00	16.00	151.66	**24**	400							26.88	281.93	167	1753	33.39	2.50	5.01	
		D3	**TFIIb82**	09:00	16.00	151.66	**19**	400							24.00	299.72	149	1863	35.49	2.66	5.32	
Behälterstand B2(1): 35L B2(2): 115L			Zulauf 13	09:30						170	166											
		D3	S67	12:00	3.00	35.16	68	400							12.24	145.56	76	905	17.24	1.29	2.59	
		D3	BA38	12:00	3.00	154.66	10	400							1.80	81.25	11	505	9.62	0.72	1.44	
		D3	TFIc86	12:00	3.00	154.66	24	400							4.32	286.25	27	1780	33.90	2.54	5.08	
um 13 Uhr Umfüllung auf einen Behälter		D3	TFIIb83	12:00	3.00	154.66	19	400			188				3.42	303.14	21	1885	35.90	2.69	5.38	
		D3	**S68**	16:00	4.00	39.16	68	400							16.32	161.88	101	1006	19.17	1.44	**2.88**	
		D3	**BA39**	16:00	4.00	158.66	10	400							2.40	83.65	15	520	9.91	0.74	1.49	
		D3	**TFIc87**	16:00	4.00	158.66	24	400							5.76	292.01	36	1815	34.58	2.59	5.19	
Auffüllung Behälter B2 (+100 L), insgesamt 420 L		D3	**TFIIb84**	16:00	4.00	158.66	19	400			217				4.56	307.70	28	1913	36.44	2.73	5.47	
	17/04/2013	D3	S69	09:00	17.00	56.16	68	400							69.36	**231.24**	431	1438	27.38	**2.05**	**4.11**	
		D3	**BA40**	09:00	17.00	175.66	10	400							10.20	93.85	63	583	11.11	0.83	1.67	
		D3	**TFIc88**	09:00	17.00	175.66	24	400							24.48	316.49	152	1968	37.48	2.81	5.62	
		D3	**TFIIb85**	09:00	17.00	175.66	19	400			340				19.38	327.08	120	2033	38.73	2.90	5.81	
		D3	S70	12:00	3.00	59.16	68	400							12.24	243.48	76	1514	28.83	2.16	4.32	
		D3	BA41	12:00	3.00	178.66	10	400							1.80	95.65	11	595	11.33	0.85	1.70	
		D3	TFIc89	12:00	3.00	178.66	24	400							4.32	320.81	27	1994	37.99	2.85	5.70	
		D3	TFIIb86	12:00	3.00	178.66	19	400							3.42	330.50	21	2055	39.14	2.94	5.87	
Erhöhung Drehzahl auf 450 U/min			S	15:00		62.16	**72**	450								255.72						
			BA	15:00		181.66	11	450								97.45						

			TFIc	15:00		181.66	**24**	450							325.13						
			TFIIb	15:00		181.66	**24**	450							333.92						
		D3	S71	16:00	4.00	63.16	72	450						17.28	260.04	107	1617	30.79	2.31	4.62	
		D3	**BA42**	16:00	4.00	182.66	11	450						2.64	98.11	16	610	11.62	0.87	1.74	
		D3	**TFIc90**	16:00	4.00	182.66	24	450						5.76	**326.57**	36	2030	38.67	**2.90**	5.80	
		D3	**TFIIb87**	16:00	4.00	182.66	24	450						5.76	**335.36**	36	2085	39.71	**2.98**	5.96	
Stopp Sandsäule, Auffüllung B2 (+160L) insg 600 L			S	16:00																	
	18/04/2013	D3	**BA43**	09:00	17.00	199.66	**10**	450						10.20	**109.33**	63	680	12.95	**0.97**	**1.94**	
		D3	**TFIc91**	09:00	17.00	199.66	**27**	450						27.54	351.05	171	2182	41.57	3.12	6.24	
		D3	**TFIIb88**	09:00	17.00	199.66	**20.5**	450			500			20.91	359.84	130	2237	42.61	3.20	6.39	
Start Sandsäule			S	09:15			**35**	450													
Stopp Sandsäule			S	09:50																	
		D3	BA44	12:00	3.00	202.66	10	450						1.80	111.13	11	691	13.16	0.99	1.97	
		D3	TFIc92	12:00	3.00	202.66	27	450						4.86	355.91	30	2213	42.15	3.16	6.32	
		D3	TFIIb89	12:00	3.00	202.66	20.5	450		510	512			3.69	363.53	23	2260	43.05	3.23	6.46	
		D3	**BA45**	15:00	3.00	205.66	10	450						1.80	112.93	11	702	13.37	1.00	2.01	
		D3	**TFIc93**	15:00	3.00	205.66	27	450						4.86	360.77	30	2243	42.72	3.20	6.41	
		D3	**TFIIb90**	15:00	3.00	205.66	20.5	450		520	522			3.69	367.22	23	2283	43.49	3.26	6.52	
	19/04/2013	D3	**BA46**	09:00	18.00	223.66	**9.25**	450						10.80	123.73	67	769	14.65	1.10	2.20	
		D3	**TFIc94**	09:00	18.00	223.66	**24.75**	450						29.16	389.93	181	2424	46.18	3.46	6.93	
		D3	**TFIIb91**	09:00	18.00	223.66	**19.5**	450		580	580			22.14	389.36	138	2421	46.11	3.46	6.92	
		D3	BA47	12:00	3.00	226.66	9.25	450						1.67	125.40	10	780	14.85	1.11	2.23	
		D3	TFIc95	12:00	3.00	226.66	24.75	450						4.46	394.39	28	2452	46.70	**3.50**	7.01	
		D3	TFIIb92	12:00	3.00	226.66	19.5	450						3.51	392.87	22	2442	46.52	**3.49**	6.98	
			BA	14:00	2.00	228.66	9.25	450						1.11	126.51	7	786	14.98	1.12	2.25	
			TFIc	14:00	2.00	228.66	24.75	450						2.97	397.36	18	2470	47.05	3.53	7.06	
			TFIIb	14:00	2.00	228.66	19.5	450		600	596			2.34	395.21	15	2457	46.80	3.51	7.02	
Stopp Pumpe, B2 leer				14:30																	geschätzter Zeitpunkt 14 Uhr Behälter leer, Säulen noch nicht entleert!!
Start TFIc,TFIIb,BA	22/04/2013		BA	10:00			**9.25**	450		0	0										
neuer Behälter B2 (+160L)			TFIc	10:00			**26.5**	450													
			TFIIb	10:00			**21.5**	450													
		D3	**BA48**	13:00	5.00	231.66	9.25	450						2.78	128.17	17	797	15.18	1.14	2.28	
		D3	**TFIc96**	13:00	5.00	231.66	26.5	450						7.74	402.13	48	2500	47.62	3.57	7.14	
		D3	**TFIIb93**	13:00	5.00	231.66	21.5	450						6.21	399.08	39	2481	47.26	3.54	7.09	
			Zulauf 14	13:30																	
		D3	**BA49**	16:00	3.00	234.66	9.25	450						1.67	129.84	10	807	15.38	1.15	2.31	
		D3	**TFIc97**	16:00	3.00	234.66	26.5	450						4.77	406.90	30	2530	48.18	3.61	7.23	
		D3	**TFIIb94**	16:00	3.00	234.66	21.5	450			21			3.87	402.95	24	2505	47.72	3.58	7.16	
	23/04/2013	D3	**BA50**	09:00	17.00	251.66	**8.25**	450						8.42	138.25	52	860	16.37	1.23	2.46	
		D3	**TFIc98**	09:00	17.00	251.66	**25**	450						25.50	432.40	159	2688	51.20	3.84	7.68	
		D3	**TFIIb95**	09:00	17.00	251.66	**8**	450		66	63			8.16	411.11	51	2556	48.68	3.65	7.30	
			BA	09:30	0.50	252.16	**8.25**	450						0.25	138.50						Neueinspannung Pumpenschlauch bei TFIIb
			TFIc	09:30	0.50	252.16	**25**	450						0.75	433.15						
			TFIIb	09:30	0.50	252.16	**21.5**	450						0.24	411.35						
		D3	BA51	12:00	3.00	254.66	8.25	450						1.49	139.74	9	869	16.55	1.24	2.48	
		D3	TFIc99	12:00	3.00	254.66	25	450						4.50	436.90	28	2716	51.74	3.88	7.76	
		D3	TFIIb96	12:00	3.00	254.66	21.5	450		75	76			3.47	414.58	22	2577	49.09	3.68	7.36	
		D3	**BA52**	15:00	3.00	257.66	**7.75**	450						1.49	141.22	9	878	16.72	1.25	2.51	
		D3	**TFIc100**	15:00	3.00	257.66	**25**	450						4.50	**441.40**	28	2744	52.27	3.92	7.84	
		D3	**TFIIb97**	15:00	3.00	257.66	**18**	450		85	86			3.87	**418.45**	24	2601	49.55	3.72	7.43	
	24/04/2013	D3	**BA53**	09:00	18.00	275.66	**6.8**	450						7.91	149.14	49	927	17.66	1.32	2.65	
		D3	**TFIc101**	09:00	18.00	275.66	**22.5**	450						25.80	467.20	160	2905	55.32	4.15	8.30	
		D3	**TFIIb98**	09:00	18.00	275.66	**16.25**	450		138	138			18.60	437.05	116	2717	51.75	3.88	7.76	
Eröhung Durchfluss auf DZ = 550			BA	09:45	0.75	276.41	**8.5**	550						0.31	149.44						
			TFIc	09:45	0.75	276.41	**27.5**	550						1.01	468.21						
			TFIIb	09:45	0.75	276.41	**21**	550						0.73	437.78						
			BA	10:00	0.15	276.56	**10.5**	650						0.08	149.52						
			TFIc	10:00	0.15	276.56	**34**	650						0.25	468.46						
			TFIIb	10:00	0.15	276.56	**27.5**	650						0.19	437.97						
		D3	**BA54**	12:00	3.00	278.66	10.5	650			149			1.71	150.84	11	938	17.86	1.34	2.68	
		D3	**TFIc102**	12:00	3.00	278.66	34	650						5.54	472.74	34	2939	55.98	4.20	8.40	
		D3	**TFIIb99**	12:00	3.00	278.66	27.5	650						4.39	441.43	27	2744	52.27	3.92	7.84	
Stopp Pumpe, Behälter leer				13:00						160											
Start Pumpe, B2 (+160 L)				13:45						0	0	5.7									
		D3	**BA55**	15:45	3.00	281.66	11	650						1.95	152.79	12	950	18.09	1.36	2.71	
		D3	**TFIc103**	15:45	3.00	281.66	**36**	650						6.36	479.10	40	2979	56.73	4.26	8.51	
		D3	**TFIIb99b**	15:45	3.00	281.66	**33**	650		11	10			5.61	447.04	35	2779	52.94	3.97	7.94	
	25/04/2013	D3	**BA56**	09:00	17.25	298.91	**9**	650						10.79	**163.58**	67	1017	19.37	1.45	**2.91**	
		D3	**TFIc104**	09:00	17.25	298.91	**31.5**	650						35.91	515.01	223	3202	60.99	4.57	9.15	
		D3	**TFIIb100**	09:00	17.25	298.91	**27.5**	650		89	89			32.51	479.55	202	2981	56.79	4.26	8.52	
																					Pumpenschlauchwechsel wegen Luftblasenbildung, Pumpe zurückgedreht auf 600 U/min
			BA	09:30	0.5	299.41	**7.75**	550						0.27	163.85						
			TFIc	09:30	0.5	299.41	**33**	550						0.95	515.96						
			TFIIb	09:30	0.5	299.41	**34.5**	550		91	91			0.83	480.37						
		D3	**BA57**	12:00	3.00	301.91	7.75	550						1.43	165.28	9	1028	19.57	1.47	2.94	
		D3	**TFIc105**	12:00	3.00	301.91	33	550						5.90	521.85	37	3244	61.80	4.63	9.27	
		D3	**TFIIb101**	12:00	3.00	301.91	34.5	550		102	102			6.00	486.37	37	3024	57.60	4.32	8.64	
			Zulauf 15	12:00																	

		D3	**BA58**	15:00	3.00	304.91	7.75	550						1.40	166.67	9	1036	19.74	1.48	2.96		
		D3	**TFlc105**	15:00	3.00	304.91	33	550						5.94	527.79	37	3281	62.50	4.69	9.38		
		D3	**TFllb102**	15:00	3.00	304.91	34.5	550		116				6.21	492.58	39	3062	58.33	4.37	8.75		
Auffüllung B2 (+56L), insgesamt 216 L				16:00					116													
	26/04/2013	D3	BA	09:00	18.00	322.91		550													BA Zulauf ausgefallen, daher keine Probenahme! Schätzung Ausfall ca 16:00	
		D3	**TFlc107**	09:00	18.00	322.91	33	550						35.64	563.43	222	3503	66.72	5.00	10.01		
		D3	**TFllb103**	09:00	18.00	322.91	34.5	550	185	185				37.26	529.84	232	3294	62.74	4.71	9.41		
Stopp Pumpe, da BA kein Zulauf				09:40																		
–> Schlauchwechsel																						
Start Pumpe			BA	10:00			15.5	550														
			TFlc	10:00			**31**	550														
			TFllb	10:00			**27.5**	550														
		D3	**BA59**	12:00	3.00	307.91	15.5	550						2.33	169.00	14	1051	20.01	1.50	3.00		
		D3	TFlc108	12:00	2.67	325.57	31	550						5.04	568.47	31	3534	67.32	5.05	10.10		
		D3	**TFllb104**	12:00	2.67	325.57	27.5	550	196	197				4.68	534.52	29	3323	63.30	4.75	9.49		
		D3	**BA60**	15:00	3.00	310.91	15.5	550						2.79	171.79	17	1068	20.34	1.53	3.05		
		D3	**TFlc109**	15:00	3.00	328.57	31	550						5.58	574.05	35	3569	67.98	5.10	10.20		
		D3	**TFllb105**	15:00	3.00	328.57	27.5	550		210				4.95	539.47	31	3354	63.88	4.79	9.58		
Stopp Pumpe				15:00																		
Start Pumpe, B2 (+160 L)	29/04/2013			09:30					0	0												
Verringerung Durchfluss auf DZ = 450			BA	09:30			**12.75**	450														
			TFlc	09:30			**27**	450														
			TFllb	09:30			**23.5**	450														
		D3	**BA61**	12:30	3.00	313.91	12.75	450	11	11				2.30	174.08	14	1082	20.61	1.55	3.09		
		D3	**TFlc110**	12:30	3.00	331.57	27	450						4.86	578.91	30	3599	68.55	5.14	10.28		
		D3	**TFllb106**	12:30	3.00	331.57	23.5	450						4.23	543.70	26	3380	64.38	4.83	9.66		
			Zulauf 16	12:30																		
		D3	**BA62**	15:30	3.00	316.91	12.75	450						2.30	176.38	14	1097	20.89	1.57	3.13		
		D3	**TFlc111**	15:30	3.00	334.57	27	450						4.86	583.77	30	3629	69.13	5.18	10.37		
		D3	**TFllb107**	15:30	3.00	334.57	23.5	450		23				4.23	547.93	26	3406	64.89	4.87	9.73		
	30/04/2013	D3	**BA63**	09:00	17.50	334.41	**12.25**	450						13.39	189.77	83	1180	22.47	1.69	3.37		
		D3	**TFlc112**	09:00	17.50	352.07	**24.75**	450						28.35	612.12	176	3806	72.49	5.44	10.87		
		D3	**TFllb108**	09:00	17.50	352.07	21.5	450	88	89				24.68	572.61	153	3560	67.81	5.09	10.17		
		D3	BA64	12:00	3.00	337.41	12.25	450						2.21	191.97	14	1193	22.73	1.70	3.41		
		D3	TFlc113	12:00	3.00	355.07	24.75	450						4.46	616.58	28	3833	73.01	5.48	10.95		
		D3	TFllb109	12:00	3.00	355.07	21.5	450	97	99				3.87	576.48	24	3584	68.27	5.12	10.24		
		D3	**BA65**	15:00	3.00	340.41	12.25	450						2.21	194.18	14	1207	22.99	1.72	3.45		
		D3	**TFlc114**	15:00	3.00	358.07	24.75	450						4.46	621.03	28	3861	73.54	5.52	11.03		
		D3	**TFllb110**	15:00	3.00	358.07	21.5	450	108	108				3.87	580.35	24	3608	68.72	5.15	10.31		
Stopp Pumpe				15:00																		
Start Pumpe	02/05/2013			08:00																		
			BA	09:15			**12.5**	450														
			TFlc	09:15			**23.5**	450														
			TFllb	09:15			**20.75**	450	113	112												
		D3	**BA66**	11:00	3.00	343.41	12.5	450						2.25	196.43	14	1221	23.26	1.74	3.49		
		D3	**TFlc115**	11:00	3.00	361.07	23.5	450						4.23	625.26	26	3887	74.04	5.55	11.11		
		D3	**TFllb111**	11:00	3.00	361.07	20.75	450	119	122				3.74	584.08	23	3631	69.17	5.19	10.37		
		D3	BA67	14:00	3.00	346.41	12.5	450						2.25	198.68	14	1235	23.53	1.76	3.53		
		D3	TFlc116	14:00	3.00	364.07	23.5	450						4.23	629.49	26	3914	74.54	5.59	11.18		
		D3	TFllb112	14:00	3.00	364.07	20.75	450		129				3.74	587.82	23	3654	69.61	5.22	10.44		
		D3	**BA68**	16:30	2.50	348.91	12.5	450						1.88	200.55	12	1247	23.75	1.78	3.56		
		D3	**TFlc117**	16:30	2.50	366.57	23.5	450						3.53	633.02	22	3935	74.96	5.62	11.24		
		D3	**TFllb113**	16:30	2.50	366.57	20.75	450		138				3.11	590.93	19	3674	69.98	5.25	10.50		
Auffüllung B2 (+56L), insgesamt 216 L				16:30																		
	03/05/2013	D3	**BA69**	09:00	16.50	365.41	**12**	450						12.38	212.93	77	1324	25.21	1.89	3.78		
		D3	**TFlc118**	09:00	16.50	383.07	**23**	450						23.27	656.28	145	4080	77.72	5.83	11.66		
		D3	**TFllb114**	09:00	16.50	383.07	**20**	450	199	194				20.54	611.47	128	3802	72.41	5.43	10.86		
		D3	BA70	12:00	3.00	368.41	12	450						2.16	214.59	13	1334	25.41	1.91	3.81		
		D3	TFlc119	12:00	3.00	386.07	23	450						4.14	659.93	26	4103	78.15	5.86	11.72		
		D3	TFllb115	12:00	3.00	386.07	20	450		209				3.60	614.33	22	3819	72.75	5.46	10.91		
Stopp, Versuchsende				13:00																	ca 13 uhr B2 leer	
Versuchsreihe 6																						
Versuchsstart, B2 (+160L)	14/05/2013			09:50					0	0	5.6											
Konzentration Pb,Ni,Cr 50/Cu 100/Zn 400																						
neue Säule TFlb, d = 32 mm																						
gleichzeitig Zeolith-Säule mit Q = 50 ml/min		D3	**TFlb1**	12:50	0.00	3.00	**46.50**	999	17	17	9.5			8.37	**8.37**	52	52	**0.99**	0.07	0.15	pH-Ablauf	
			Zulauf 17	15:50																		
		D3	TFlb2	15:50	3.00	6.00	46.50	999	35	35	9.7			8.37	16.74	52	104	**1.98**	0.15	0.30	pH-Ablauf	
	15/05/2013	D3	TFlb3	09:00	17.17	23.17	**36.00**	999	128	128	9.6			43.48	**60.22**	270	374	7.13	0.53	**1.07**	pH-Ablauf	
				09:15			**58.00**	550													Wechsel der Pumpenschläuche (beide), weil undicht.	
		D3	**TFlb4**	12:00	3.00	26.17	**54.00**	550	146	145				10.11	70.33	63	437	8.33	0.62	1.25		
Stopp Pumpe				13:20																		
Auffüllung B2 (+160L)									0	0	5.7											
Start Pumpe				14:00																		
			Zulauf 18	15:40																		
		D3	**TFlb5**	15:40	3.00	29.17	**54.00**	550	10	10	9.2			9.72	80.05	60	498	9.48	0.71	1.42		

	16/05/2013	D3	**TFIb6**	09:00	17.33	46.50	**50.00**	550		98	98				54.15	**134.20**	337	834	15.89	**1.19**	**2.38**	
Erhöhung DZ auf 650				09:15			**59.00**	650														
		D3	TFIb7	12:00	3.00	49.50	59.00	650		114	114				10.49	144.68	65	899	17.13	1.28	2.57	
Auffüllung B2 (+100L) gesamt 260L				14:45																		
		D3	**TFIb8**	15:00	3.00	52.50	**59.00**	650			132	7.3			10.62	**155.30**	66	966	18.39	1.38	**2.76**	
			Zulauf 19									5.6										
	17/05/2013	D3	**TFIb9**	09:00	18.00	70.50	**58.00**	650		232	232	7.5			63.12	**218.42**	392	1358	25.87	**1.94**	**3.88**	
		D3	TFIb10	12:00	3.00	73.50	58.00	650		249	249				10.44	228.86	65	1423	27.10	2.03	4.07	
Stopp Pumpe				13:00			**58.00**			260												
Start Pumpe, Auffüllung B2 (+160L)	21/05/2013			09:00						0	0											
		D3	**TFIb11**	11:00	3.00	76.50	**59.00**	650		12	11	7.5			10.56	239.42	66	1488	28.35	2.13	4.25	pH-Ablauf
			Zulauf 20	11:00																		
Änderung Durchfluss DZ 800		D3	**TFIb12**	14:00	3.00	79.50	53.00	800		28	28				10.62	250.04	66	1555	29.61	2.22	4.44	
		D3	TFIb13	17:00	3.00	82.50	53.00	800			47				9.54	259.58	59	1614	30.74	2.31	4.61	
																						pH-Ablauf, Zeitpunkt unbekannt ab wann Schlauch
Abwesenheit 22.-24.5.	22/05/2013	D3	**TFIb14**	10:00	17.00	99.50	**21.00**					7.5			21.42	281.00	133	1747	33.28	2.50	4.99	kaputt
Auffüllung B2 (+100L) gesamt 260L				12:00																		
		D3	TFIb15	13:00	3.00	102.50	**17.00**					7.3			3.06	284.06	19	1766	33.64	2.52	5.05	pH-Ablauf
Wechsel Pumpenschlauch				14:00			**50.00**															Schlauch war kaputt, Wechsel
		D3	**TFIb16**	16:00	3.00	105.50	**48.00**					7.3			6.78	290.84	42	1808	34.44	2.58	5.17	pH-Ablauf
	23/05/2013	D3	**TFIb17**	08:00	16.00	121.50	48.00								46.08	**336.92**	286	2095	39.90	**2.99**	5.98	
		D3	TFIb18	11:00	3.00	124.50	48.00								8.64	345.56	54	2148	40.92	3.07	6.14	
		D3	TFIb19	14:00	3.00	127.50	48.00								8.64	354.20	54	2202	41.94	3.15	6.29	
		D3	**TFIb20**	17:00	3.00	130.50	48.00								8.64	362.84	54	2256	42.97	3.22	6.45	
Auffüllung B2 (+110L) gesamt 370L																						
	24/05/2013	D3	**TFIb21**	08:00	15.00	145.50	48.00								43.20	406.04	269	2524	48.08	3.61	7.21	
		D3	TFIb22	12:00	4.00	149.50	48.00								11.52	417.56	72	2596	49.45	3.71	7.42	
Stopp Pumpe		D3	**TFIb23**	15:00	3.00	152.50	48.00			347	365				8.64	426.20	54	2650	50.47	3.79	7.57	Volumenüberprüfung schwierig, da Abwesenheit
Auffüllung B2 (+160L), Start Pumpe	09/07/2013			09:00							0											Tadele und Miguel Versuchsdurchführung
			Zulauf 4	11:00								5.5										
			TF Ib24	11:00	2.00	154.50	**48**					7.3			5.76	431.96	36	2686	51.15	3.84	7.67	
			S31	11:00	2.00		**48**					7.1			5.76							
			TF Ib25	13:00	2.00	156.50	48					7.4			5.76	437.72	36	2721	51.83	3.89	7.78	
			S32	13:00	2.00		48					7.3			5.76							
			TF Ib26	15:00	2.00	158.50	48								5.76	443.48	36	2757	52.52	3.94	7.88	
			S33	15:00	2.00		48								5.76							
			TF Ib27	17:00	2.00	160.50	48								5.76	**449.24**	36	2793	53.20	**3.99**	7.98	
			S34	17:00	2.00		**48.00**								5.76							
	10/07/2013		**TF Ib28**	09:00	16.00	176.50	48								46.08	495.32	286	3079	58.66	4.40	8.80	
			S35	09:00	16.00		48								46.08							
			TF Ib29	11:00	2.00	178.50	48								5.76	501.08	36	3115	59.34	4.45	8.90	
			S36	11:00	2.00		48								5.76							
			TF Ib30	13:00	2.00	180.50	48								5.76	506.84	36	3151	60.02	4.50	9.00	
			S32	13:00	2.00		48								5.76							
			TF Ib31	15:00	2.00	182.50	48								5.76	512.60	36	3187	60.70	4.55	9.11	
			S37	15:00	2.00		48				167.04				5.76							
Auffüllung B2 (+160L)				15:00			48				0											
			TF Ib32a	17:00	2.00	184.50	48								5.76	518.36	36	3223	61.38	4.60	9.21	
			S38	17:00	2.00		**48.00**								5.76							
	11/07/2013		**TF Ib32b**	09:00	16.00	200.50	48								46.08	564.44	286	3509	66.84	5.01	10.03	
			S39	09:00	16.00		48								46.08							
			TF Ib33	12:00	3.00	203.50	48								8.64	573.08	54	3563	67.86	5.09	10.18	
			S40	12:00	3.00		48								8.64							
			TF Ib34	14:00	2.00	205.50	48								5.76	578.84	36	3599	68.55	5.14	10.28	
			S41	14:00	2.00		48								5.76							
Auffüllung (+110L) gesamt 270L				15:00			48				132.48				0.00							
			TF Ib35	17:00	3.00	208.50	48								8.64	587.48	54	3652	69.57	5.22	10.44	
			S42	17:00	3.00		**48.00**								8.64							
	12/07/2013		**TF Ib36**	09:00	16.00	224.50	48								46.08	633.56	286	3939	75.03	5.63	11.25	
			S43	09:00	16.00		48								46.08							
			TF Ib37	11:00	2.00	226.50	48								5.76	639.32	36	3975	75.71	5.68	11.36	
			S44	11:00	2.00		48								5.76							
			TF Ib38	13:00	2.00	228.50	50								6.00	645.08	37	4012	76.39	5.73	11.46	
			S45	13:00	2.00		50								6.00							
Flow interupted due to tube connection problem				15:00																		
Start	15/07/2013			10:00																		
			TF Ib39	12:00	4.00	232.50	50								12.00	657.08	75	4087	77.81	5.84	11.67	
				12:00																		
Neue Säule TFIb von unten TFIb U			TFIb U	12:00							276.48											
Auffüllung B2 (+160L), Start Pumpe				12:00							0											
			TF Ib40	15:00	3.00	235.50	**50**								9.00	666.08	56	4143	78.88	5.92	11.83	
			TF IbU1	15:00	3.00	3.00	50								9.00	**9.00**	62	62	**1.07**	0.08	0.16	
			TF Ib41	17:00	2.00	237.50	50								6.00	672.08	37	4180	79.59	5.97	11.94	
			TF IbU2	17:00	2.00	5.00	**50.00**								6.00	**15.00**	41	103	**1.78**	0.13	0.27	
	16/07/2013		**TF Ib42**	09:30	16.30	253.80	50					7.1			48.90	720.98	304	4484	85.38	6.40	12.81	
			TF IbU3	09:30	16.30	21.30	50					8.4			48.90	**63.90**	337	441	7.57	0.57	1.14	
			TF Ib43	11:30	2.00	255.80	50					6.9			6.00	726.98	37	4521	86.09	6.46	12.91	
			TF IbU4	11:30	2.00	23.30	50					8.4			6.00	69.90	41	482	8.28	0.62	1.24	
			TF Ib44	13:30	2.00	257.80	50					7.1			6.00	732.98	37	4558	86.80	6.51	13.02	
			TF IbU5	13:30	2.00	25.30	50					8.3			6.00	75.90	41	523	8.99	0.67	1.35	

			TF Ib45	15:30	2.00	259.80	50				7.2			6.00	738.98	37	4596	87.51	6.56	13.13		
			TF IbU6	15:30	2.00	27.30	50				8.2			6.00	81.90	41	565	9.70	0.73	1.45		
Auffüllung B2 (+100L), gesamt 260L				15:45						163.8	5.5											
			TF Ib46	17:30	2.00	261.80	50				7.5			6.00	744.98	37	4633	88.22	6.62	13.23		
			TF IbU7	17:30	2.00	29.30	**50.00**				8			6.00	87.90	41	606	10.41	0.78	1.56		
	17/07/2013		**TF Ib47**	09:00	15.30	277.10	50				7.7			45.90	790.88	285	4918	93.66	7.02	14.05		
			TF IbU8	09:00	15.30	44.60	50				8.4			45.90	**133.80**	317	923	15.84	**1.19**	**2.38**		
			TF Ib48	11:00	2.00	279.10	50							6.00	796.88	37	4956	94.37	7.08	14.15		
			TF IbU9	11:00	2.00	46.60	50			279.6				6.00	139.80	41	964	16.55	1.24	2.48		
Auffüllung B2 (+160L), Start Pumpe				13:00						0												
Flow interupted due to tube connection problem (TF Ib flow interupted)																						
Stopp TFIb				13:00																		
			TF IbU10	14:00	2.00	48.60	50							6.00	145.80	41	1006	17.27	1.29	2.59		
			TF IbU11	16:00	2.00	50.60	**50.00**							6.00	151.**80**	41	1047	17.98	1.35	**2.70**		
	18/07/2013		**TF IbU12**	09:30	17.50	68.10	50							52.50	204.30	362	1409	24.19	1.81	3.63		
			Zulauf 5	09:30																		
			TF IbU13	11:30	2.00	70.10	50							6.00	210.30	41	1450	24.90	1.87	3.74		
			TF IbU14	13:30	2.00	72.10	50							6.00	216.30	41	1492	25.61	1.92	3.84		
			TF IbU15	15:30	2.00	74.10	50.00							6.00	**222.30**	41	1533	26.32	**1.97**	**3.95**		
	19/07/2013		**TF IbU16**	08:30	17.00	91.10	50				8.3			51.00	273.30	352	1885	32.36	2.43	4.85		
			TF IbU17	10:30	2.00	93.10	50				8.2			6.00	279.30	41	1926	33.07	2.48	4.96		
Auffüllung B2 (+100L), gesamt 260L				10:40						136.5	5.4											
			Zulauf 6	11:00			50															
			TF IbU18	12:30	2.00	95.10	50							6.00	285.30	41	1968	33.78	2.53	5.07		
			TF IbU19	14:30	2.00	97.10	50							6.00	291.30	41	2009	34.50	2.59	5.17		
Flow through the colum was continued				14:30	29.30																	
over the week end (Saturday 20 h)						126.40	50.00			236					**379.20**			44.90	**3.37**	6.74		
Auffüllung B2 (+160L), Start Pumpe	22/07/2013			09:00						0												
Start				09:00																		
			TF IbU20	11:00	31.30	128.40	50							93.90	385.20	648	2657	45.61	3.42	6.84		
			TF IbU21	13:00	2.00	130.40	50							6.00	391.20	41	2698	46.33	3.47	6.95		
Start				15:00																		
			TF IbU22	15:00	2.00	132.40	50							6.00	397.20	41	2739	47.04	3.53	7.06		
	23/07/2013		**TF IbU23**	09:00	18.00	150.40	50				9.1			54.00	**451.20**	372	3112	53.43	**4.01**	8.01		
			TF Ib49	09:00	20.00	299.10	50				8.5			60.00	856.88	373	5329	101.47	7.61	15.22		
			TF IbU24	11:00	2.00	152.40	50							6.00	457.20	41	3153	54.14	4.06	8.12		
			TF Ib50	11:00	2.00	301.10	50							6.00	862.88	37	5366	102.18	7.66	15.33		
			TF IbU25	13:00	2.00	154.40	50							6.00	463.20	41	3194	54.85	4.11	8.23		
			TF Ib51	13:00	2.00	303.10	50							6.00	868.88	37	5403	102.89	7.72	15.43		
Auffüllung B2 (+110 L) gesamt 270L				13:00						156												
			Zulauf 7	13:00																		
			TF IbU26	15:00	2.00	156.40	50				8.8			6.00	469.20	41	3236	55.56	4.17	8.33		
			TF Ib52	15:00	2.00	305.10	50				8			6.00	874.88	37	5441	103.60	7.77	15.54		
Auffüllung B2 (+160L)	24/07/2013																					
			Zulauf 8							264	6											
			TF IbU27	09:00	18.00	174.40	**47**			0	8.8			50.76	519.96	350	3586	61.57	4.62	9.24		
			TF Ib 53	09:00	18.00	323.10	44				7.3			47.52	922.40	295	5736	109.23	8.19	16.38		
			TF IbU28	11:00	2.00	176.40	47							5.64	525.60	39	3625	62.24	4.67	9.34		
			TF Ib 54	11:00	2.00	325.10	44							5.28	927.68	33	5769	109.86	8.24	16.48		
			TF IbU29	13:00	2.00	178.40	47							5.64	531.24	39	3664	62.91	4.72	9.44		
			TFIb 55	13:00	2.00	327.10	44							5.28	932.96	33	5802	110.48	8.29	16.57		
			TF IbU30	15:00	2.00	180.40	47				9			5.64	536.88	39	3703	63.58	4.77	9.54		
			TFIb 56	15:00	2.00	329.10	44				7.7			5.28	938.24	33	5835	111.11	8.33	16.67		
Auffüllung B2 (+110L) gesamt 270L				15:00						33												
	25/07/2013		**TF IbU31**	09:00	18.00	198.40	**49**				9.3			52.92	589.80	365	4068	69.84	5.24	10.48		
			TFIb 57	09:00	18.00	347.10	**47**				8.3			50.76	989.00	316	6150	117.12	8.78	17.57		
			TF IbU32	11:00	2.00	200.40	49							5.88	595.68	41	4108	70.54	5.29	10.58		
			TFIb 58	11:00	2.00	349.10	47							5.64	994.64	35	6185	117.78	8.83	17.67		
			TF IbU33	13:00	2.00	202.40	49							5.88	601.56	41	4149	71.24	5.34	10.69		
			TFIb 59	13:00	2.00	351.10	47							5.64	1000.28	35	6220	118.45	8.88	17.77		
			TF IbU34	15:00	2.00	204.40	49							5.88	607.44	41	4189	71.93	5.39	10.79		
			TFIb 60	15:00	2.00	353.10	47			170 164				5.64	1005.92	35	6255	119.12	8.93	17.87		
Behälter leer (zw. 4 und 8 Uhr)	26/07/2013			04:00																		
Auffüllung B2 (+160L), Start				09:00						0												
			TF IbU35	11:00	14.00	218.40	54							41.16	652.80	284	4473	77.30	5.80	11.60		
			TF Ib61	11:00	14.00	367.10	54							39.48	1051.28	245	6501	124.49	9.34	18.67		
			Zulauf 9	12:00																		
			TF IbU36	13:00	2.00	220.40	54							6.48	659.28	45	4518	78.07	5.86	11.71		
			TF Ib62	13:00	2.00	369.10	54							6.48	1057.76	40	6541	125.26	9.39	18.79		
			TF IbU37	17:00	4.00	224.40	54							12.96	672.24	89	4607	79.61	5.97	11.94		
			TFIb 63	17:00	4.00	373.10	54			51.84				12.96	1070.72	81	6622	126.79	9.51	19.02		
Stopp Pumpe				17:00																		
Auffüllung B2 (+160L)	29/07/2013			09:30						0												
Start Pumpe				10:15																		
			TF IbU38	12:00	1.75	226.15	**50**							5.25	677.49	36	4643	80.23	6.02	12.03		
			TFIb 64	12:00	1.75	374.85	**50**							5.25	1075.97	33	6654	127.42	9.56	19.11		
			TFIb U39	14:00	2.00	228.15	50							6.00	683.49	41	4685	80.94	6.07	12.14		
			TFIb 65	14:00	2.00	376.85	50							6.00	1081.97	37	6692	128.13	9.61	19.22		

Auffüllung B2 (+50L) gesamt 210L				17:00					40.5											
	30/07/2013																			
			TFlb U40	09:00	19.00	247.15	50						57.00	740.49	393	5078	87.69	6.58	13.15	
			TFlb 66	09:00	19.00	395.85	50						57.00	1138.97	354	7046	134.88	10.12	20.23	
			TFlb U41	11:00	2.00	249.15	50						6.00	746.49	41	5119	88.40	6.63	13.26	
			TFlb 67	11:00	2.00	397.85	50						6.00	1144.97	37	7083	135.59	10.17	20.34	
			TFlb U42	13:00	2.00	251.15	50						6.00	752.49	41	5161	89.11	6.68	13.37	
			TFlb 68	13:00	2.00	399.85	50		160.5				6.00	1150.97	37	7121	136.30	10.22	20.44	
Auffüllung B2 (+160L)				14:30					0											
			TFlb U43	15:00	2.00	253.15	50						6.00	758.49	41	5202	89.82	6.74	13.47	
			TFlb 69	15:00	2.00	401.85	50						6.00	1156.97	37	7158	137.01	10.28	20.55	
			Zulauf 10	16:00																
	31/07/2013		**TFlb U44**	10:00	19.00	272.15	50						57.00	815.49	393	5595	96.57	7.24	14.49	
			TFlb 70	10:00	19.00	420.85	50						57.00	1213.97	354	7512	143.76	10.78	21.56	
			TFlb U45	12:00	2.00	274.15	50						6.00	821.49	41	5636	97.28	7.30	14.59	
			TFlb 71	12:00	2.00	422.85	50						6.00	1219.97	37	7549	144.47	10.84	21.67	
			TFlb U46	14:00	2.00	276.15	50						6.00	827.49	41	5678	97.99	7.35	14.70	
			TFlb 72	14:00	2.00	424.85	50		141				6.00	1225.97	37	7587	145.18	10.89	21.78	
Auffüllung B2 (+160L)				15:00					0											
	01/08/2013		**TFlb U47**	10:00	20.00	296.15	50						60.00	887.49	414	6092	105.10	7.88	15.76	
			TFlb 73	10:00	20.00	444.85	50						60.00	1285.97	373	7960	152.28	11.42	22.84	
			TFlb U48	12:00	2.00	298.15	50						6.00	893.49	41	6133	105.81	7.94	15.87	
			TFlb 74	12:00	2.00	446.85	50		126				6.00	1291.97	37	7997	152.99	11.47	22.95	
Auffüllung B2 (+160L)				14:00					0											
			TFlb U49	16:00	2.00	300.15	50						6.00	899.49	41	6174	106.52	7.99	15.98	
			TFlb 75	16:00	2.00	448.85	50						6.00	1297.97	37	8034	153.70	11.53	23.06	
			Zulauf 11	16:30																
	02/08/2013		TFlb U50	08:30	16.50	316.65	50						49.50	948.99	341	6516	112.38	8.43	16.86	
			TFlb 76	08:30	16.50	465.35	50						49.50	1347.47	308	8342	159.57	11.97	23.93	
			TFlb U51	10:30	2.00	318.65	50						6.00	954.99	41	6557	113.09	8.48	16.96	
Stopp Pumpe			**TFlb 77**	10:30	2.00	467.35	50		123				6.00	1353.47	37	8379	160.28	12.02	24.04	
Auffüllung B2 (+160L)	05/08/2013																			
Start				11:00					0											
			TFlb U52	13:00	2.50	321.15	45						6.75	961.74	47	6604	113.89	8.54	17.08	
			TFlb 78	13:00	2.50	469.85	47						7.05	1360.52	44	8423	161.11	12.08	24.17	
			TFlb U53	15:00	2.00	323.15	45						5.40	967.14	37	6641	114.53	8.59	17.18	
			TFlb 79	15:00	2.00	471.85	47						5.64	1366.16	35	8458	161.78	12.13	24.27	
	06/08/2013		TFlb U54	09:30	18.50	341.65	45						49.95	1017.09	344	6985	120.44	9.03	18.07	
			TFlb 80	09:30	18.50	490.35	47						52.17	1418.33	324	8783	167.96	12.60	25.19	
			TFlb U55	11:30	2.00	343.65	45						5.40	1022.49	37	7023	121.08	9.08	18.16	
			TFlb 81	11:30	2.00	492.35	47		138				5.64	1423.97	35	8818	168.63	12.65	25.29	
Auffüllung B2 (+160L) gesamt 320L				12:00																
			TFlb U56	14:00	2.50	346.15	45						6.75	1029.24	47	7069	121.88	9.14	18.28	
			TFlb 82	14:00	2.50	494.85	47						7.05	1431.02	44	8862	169.46	12.71	25.42	
			TFlb U 57	16:00	2.00	348.15	45						5.40	1034.64	37	7106	122.52	9.19	18.38	
			TFlb 83	16:00	2.00	496.85	47						5.64	1436.66	35	8897	170.13	12.76	25.52	
	07/08/2013		Zulauf 12	10:00																
			TFlb U58	12:00	20.00	368.15	45						54.00	1088.64	372	7479	128.92	9.67	19.34	
			TFlb 84	12:00	20.00	516.85	47						56.40	1493.06	351	9247	176.81	13.26	26.52	
			TFlb U59	14:00	2.00	370.15	45						5.40	1094.04	37	7516	129.55	9.72	19.43	
			TFlb 85	14:00	2.00	518.85	47						5.64	1498.70	35	9282	177.47	13.31	26.62	
			TFlb U60	16:00	2.00	372.15	45						5.40	1099.44	37	7553	130.19	9.76	19.53	
			TFlb 86	16:00	2.00	520.85	47						5.64	1504.34	35	9317	178.14	13.36	26.72	
	08/08/2013		**TFlb U61**	09:00	17.00	389.15	45						45.90	1145.34	317	7870	135.63	10.17	20.34	
			TFlb 87	09:00	17.00	537.85	47		386.4				47.94	1552.28	298	9615	183.82	13.79	27.57	
Stopp Pumpe				12:00																

8.4 Auswertungstabelle der Ergebnisse der Batchversuche zur Ermittlung des Schwermetallrückhaltes

Auswertung Batchversuche

V 50 ml
Masse Material 5 g

Schwermetall-Fracht in Lösung [µg] = C_x*V
Schwermetall-Fracht in Ausgangskonzentration [µg] = C_0*V

Probe	Pb [µg/l]	Mittelwert [mg/l]	Mit.w. [µg/l]	Cr [µg/l]	Mittelwert [mg/l]	Cu [µg/l]	Mittelwert [mg/l]	Mit.w. [µg/l]	Ni [µg/l]	Mittelwert [mg/l]	Zn [µg/l]	Mittelwert [mg/l]	Mit.w. [µg/l]	Pb [µg]	Mittelwert [mg]	Cr [µg]	Mittelwert [mg]	Cu [µg]	Mittelwert [mg]	Ni [µg]	Mittelwert [mg]	Zn [µg]	Mittelwert [mg]
C1 50/500	82.7			41.5		84.1			57.9		528			4.135		2.075		4.205		2.895		26.4	
TFlc 1	2.3			1.5		2.8			1.5		8.6			0.115		0.075		0.14		0.075		0.43	
TFlc 2	1.4	0.00185	1.85	1.6	0.00155	3.1	0.00295	2.95	1.2	0.00135	6.5	0.00755	7.55	0.07	0.0000925	0.08	0.0000775	0.155	0.0001475	0.06	0.0000675	0.325	0.0003775
TFlb 3	1			4		3.4			3		15			0.05		0.2		0.17		0.15		0.75	
TFlb 4	1.2	0.0011	1.1	3.7	0.00385	4	0.0037	3.7	3.6	0.0033	17.8	0.0164	16.4	0.06	0.000055	0.185	0.0001925	0.2	0.000185	0.18	0.000165	0.89	0.00082
C2 500/5000	586			460		470			447		5190			29.3		23		23.5		22.35		259.5	
TFlc 5	1.5			11.4		3			22.3		106			0.075		0.57		0.15		1.115		5.3	
TFlc 6	1.3	0.0014	1.4	10.1	0.01075	3.1	0.00305	3.05	21.8	0.02205	83.2	0.0946	94.6	0.065	0.00007	0.505	0.0005375	0.155	0.0001525	1.09	0.0011025	4.16	0.00473
TFlb 7	3.3			7.4		4.4			11.1		31.3			0.165		0.37		0.22		0.555		1.565	
TFlb 8	4	0.00365	3.65	8.6	0.008	5.5	0.00495	4.95	12.3	0.0117	37.8	0.03455	34.55	0.2	0.0001825	0.43	0.0004	0.275	0.0002475	0.615	0.000585	1.89	0.0017275
C3 1000/10000	1040			866		1050			999		10750			52		43.3		52.5		49.95		537.5	
TFlc 9	3.8			12.5		8.4			12.8		33.6			0.19		0.625		0.42		0.64		1.68	
TFlc 10	4.6	0.0042	4.2	16.2	0.01435	13.3	0.01085	10.85	15.7	0.01425	61.9	0.04775	47.75	0.23	0.00021	0.81	0.0007175	0.665	0.0005425	0.785	0.0007125	3.095	0.0023875
TFlb 11	5			15		16.1			11.6		284			0.25		0.75		0.805		0.58		14.2	
TFlb 12	3	0.004	4	10.6	0.0128	10.1	0.0131	13.1	10.7	0.01115	61.1	0.17255	172.55	0.15	0.0002	0.53	0.00064	0.505	0.000655	0.535	0.0005575	3.055	0.0086275
C4 5000/50000	4320			3930		4210			4700		51500			216		196.5		210.5		235		2575	
TFlc 13	12.7			48.5		44.5			182		1900			0.635		2.425		2.225		9.1		95	
TFlc 14	9	0.01085	10.85	39.2	0.04385	33.6	0.03905	39.05	168	0.175	1440	1.67	1670	0.45	0.0005425	1.96	0.0021925	1.68	0.0019525	8.4	0.00875	72	0.0835
TFlb 15	42.5			89		87.5			105		1090			2.125		4.45		4.375		5.25		54.5	
TFlb 16	37.7	0.0401	40.1	50.1	0.06955	58	0.07275	72.75	124	0.1145	1120	1.105	1105	1.885	0.002005	2.505	0.0034775	2.9	0.0036375	6.2	0.005725	56	0.05525
C5 10000/100000	8760			8690		10490			9860		127600			438		434.5		524.5		493		6380	
TFlc 17	19.2			71		64.6			438		2760			0.96		3.55		3.23		21.9		138	
TFlc 18	17.8	0.0185	18.5	55.2	0.0631	50	0.0573	57.3	457	0.4475	2170	2.465	2465	0.89	0.000925	2.76	0.003155	2.5	0.002865	22.85	0.022375	108.5	0.12325
TFlb 19	39.2			109		88.5			463		1710			1.96		5.45		4.425		23.15		85.5	
TFlb 20	42	0.0406	40.6	134	0.1215	103	0.09575	95.75	542	0.5025	2170	1.94	1940	2.1	0.00203	6.7	0.006075	5.15	0.0047875	27.1	0.025125	108.5	0.097

Probe	Adsorbierte Schwermetall-Fracht [µg] Pb [µg]	Mittelwert [mg]	Cr [µg]	Mittelwert [mg]	Cu [µg]	Mittelwert [mg]	Ni [µg]	Mittelwert [mg]	Zn [µg]	Mittelwert [mg]	Beladung [mg/kg] Pb [mg/kg]	Mittelwert	Cr [mg/kg]	Mittelwert	Cu [mg/kg]	Mittelwert	Ni [mg/kg]	Mittelwert	Zn [mg/kg]	Mittelwert
C1 50/500																				
TFlc 1	4.02		2		4.065		2.82		25.97		0.804		0.4		0.813		0.564		5.194	
TFlc 2	4.065	0.0040425	1.995	0.0019975	4.05	0.0040575	2.835	0.0028275	26.075	0.0260225	0.813	0.8085	0.399	0.3995	0.81	0.8115	0.567	0.5655	5.215	5.2045
TFlb 3	4.085		1.875		4.035		2.745		25.65		0.817		0.375		0.807		0.549		5.13	
TFlb 4	4.075	0.00408	1.89	0.0018825	4.005	0.00402	2.715	0.00273	25.51	0.02558	0.815	0.816	0.378	0.3765	0.801	0.804	0.543	0.546	5.102	5.116
C2 500/5000																				
TFlc 5	29.225		22.43		23.35		21.235		254.2		5.845		4.486		4.67		4.247		50.84	
TFlc 6	29.235	0.02923	22.495	0.0224625	23.345	0.0233475	21.26	0.0212475	255.34	0.25477	5.847	5.846	4.499	4.4925	4.669	4.6695	4.252	4.2495	51.068	50.954
TFlb 7	29.135		22.63		23.28		21.795		257.935		5.827		4.526		4.656		4.359		51.587	
TFlb 8	29.1	0.0291175	22.57	0.0226	23.225	0.0232525	21.735	0.021765	257.61	0.2577725	5.82	5.8235	4.514	4.52	4.645	4.6505	4.347	4.353	51.522	51.5545
C3 1000/10000																				
TFlc 9	51.81		42.675		52.08		49.31		535.82		10.362		8.535		10.416		9.862		107.164	
TFlc 10	51.77	0.05179	42.49	0.0425825	51.835	0.0519575	49.165	0.0492375	534.405	0.5351125	10.354	10.358	8.498	8.5165	10.367	10.3915	9.833	9.8475	106.881	107.0225
TFlb 11	51.75		42.55		51.695		49.37		523.3		10.35		8.51		10.339		9.874		104.66	
TFlb 12	51.85	0.0518	42.77	0.04266	51.995	0.051845	49.415	0.0493925	534.445	0.5288725	10.37	10.36	8.554	8.532	10.399	10.369	9.883	9.8785	106.889	105.7745
C4 5000/50000																				
TFlc 13	215.365		194.075		208.275		225.9		2480		43.073		38.815		41.655		45.18		496	
TFlc 14	215.55	0.2154575	194.54	0.1943075	208.82	0.2085475	226.6	0.22625	2503	2.4915	43.11	43.0915	38.908	38.8615	41.764	41.7095	45.32	45.25	500.6	498.3
TFlb 15	213.875		192.05		206.125		229.75		2520.5		42.775		38.41		41.225		45.95		504.1	
TFlb 16	214.115	0.213995	193.995	0.1930225	207.6	0.2068625	228.8	0.229275	2519	2.51975	42.823	42.799	38.799	38.6045	41.52	41.3725	45.76	45.855	503.8	503.95
C5 10000/100000																				
TFlc 17	437.04		430.95		521.27		471.1		6242		87.408		86.19		104.254		94.22		1248.4	
TFlc 18	437.11	0.437075	431.74	0.431345	522	0.521635	470.15	0.470625	6271.5	6.25675	87.422	87.415	86.348	86.269	104.4	104.327	94.03	94.125	1254.3	1251.35
TFlb 19	436.04		429.05		520.075		469.85		6294.5		87.208		85.81		104.015		93.97		1258.9	
TFlb 20	435.9	0.43597	427.8	0.428425	519.35	0.5197125	465.9	0.467875	6271.5	6.283	87.18	87.194	85.56	85.685	103.87	103.9425	93.18	93.575	1254.3	1256.6

8.5 Auswertungstabelle der Ergebnisse der Säulenversuche zur Ermittlung des Schwermetallrückhaltes

Auswertung der Ergbnisse der Säulenversuche für den Schwermetallrückhalt

Analyse 1 — **3 Säulen mit d = 13,4 mm, Versuchsreihe 1+2**

28/01/2013		23.01. - 28.01.
Probe	#	Nummern
S	D1	1,2,5,6,10,11,12
TFlb	D1	1,2,5,6,10,11,12
TFllb	D1	1,2,5,6,7
Zulauf		1

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Pb,Zn,Cu/Ni,Cr [µg/l] — TFlb = TFlc (wurde falsch protokolliert) — $J_x = V_{ges}/Q_j$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichn	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
12	100/50	TFlb 1	0.6	1.5	3.7	2.9	6	2.00	2.00	1.4	1.4	1.0	0.1	0.1
12	100/50	TFlb 2	*0.5*	3.3	1.6	0.7	*3*	16.33	18.33	11.8	13.2	8.9	1.3	0.7
20	100/50	TFlb 5	*0.5*	2.7	*1*	*0.5*	*3*	6.00	24.33	4.8	18.0	12.2	1.8	0.9
20	100/50	TFlb 6	*0.5*	3.6	*1*	*0.5*	*3*	15.92	40.25	19.1	37.1	25.1	3.8	1.9
20	100/50	TFlb 10	*0.5*	2.7	*1*	*0.5*	*3*	8.00	48.25	9.6	46.7	31.5	4.7	2.4
20	100/50	TFlb 11	*0.5*	2.4	*1*	*0.5*	*3*	18.17	66.42	21.8	68.5	46.3	6.9	3.5
20	100/50	TFlb 12	1.5	24	99.2	177	140	46.33	112.75	56	**123.6**	**83.5**	12.5	6.3
18	100/50	S 1	*0.5*	6.4	4.3	13.8	15.6	2.00	2.00	2.2	2.2	1.5	0.2	0.1
18	100/50	S 2	18.7	10.2	66.7	109	130	16.33	18.33	17.6	19.8	13.4	2.0	1.0
20	100/50	S 5	55	13.1	123	112	197	6.00	24.33	6.6	26.4	17.8	2.7	1.3
20	100/50	S 6	129	50.6	149	84.7	175	15.92	40.25	19.1	45.5	30.7	4.6	2.3
20	100/50	S 10	99.5	45.7	114	72.7	141	8.00	48.25	9.6	55.1	37.2	5.6	2.8
20	100/50	S 11	95.3	44.8	111	69.1	131	18.17	66.42	21.8	76.9	51.9	7.8	3.9
20	100/50	S 12	1080	524	1390	144	294	46.33	112.75	56	**132.4**	**89.4**	13.4	6.7
19	100/50	TFllb 1	33.3	87.6	67.3	49.2	44.4	16.83	16.83	19.2	19.2	13.0	1.9	1.0
19	100/50	TFllb 2	25.9	81.6	57.8	40.1	33.9	2.00	18.83	2.3	21.5	14.5	2.2	1.1
19	100/50	TFllb 5	37.1	88.1	74.1	69.8	62.5	6.00	24.83	6.8	28.3	19.1	2.9	1.4
19	100/50	TFllb 6	40.9	49.9	52	76.7	78.2	18.17	43.00	20.7	49.0	33.1	5.0	2.5
19	100/50	TFllb 7	69.3	84.9	99.5	79.6	125	46.33	89.33	53	**101.8**	**68.8**	10.3	5.2
		Zulauf 1 (100	91.8	67.2	102	45.7	113							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L
V_{ges} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_x ... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_j ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ — $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ — SM-Frachtablauf = Ce*V

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
132.2	96.8	146.9	65.8	162.7	132.2	96.8	146.9	65.8	162.7	0.9	2.2	5.3	4.2	8.6
1211.8	887.0	1346.4	603.2	1491.6	1079.6	790.3	1199.5	537.4	1328.9	*5.9*	38.8	18.8	8.2	*35.3*
1652.4	1209.6	1836.0	822.6	2034.0	440.6	322.6	489.6	219.4	542.4	*2.4*	13.0	*4.8*	*2.4*	*14.4*
3405.8	2493.1	3784.2	1695.5	4192.3	1753.4	1283.5	1948.2	872.9	2158.3	*9.6*	68.8	*19.1*	*9.6*	*57.3*
4287.1	3138.2	4763.4	2134.2	5277.1	881.3	645.1	979.2	438.7	1084.8	*4.8*	25.9	*9.6*	*4.8*	*28.8*
6288.3	4603.2	6987.0	3130.5	7740.5	2001.2	1465.0	2223.6	996.3	2463.4	*10.9*	52.3	*21.8*	*10.9*	*65.4*
11348.3	8307.3	12609.2	5649.4	13969.1	5104.1	3736.3	5671.2	2540.9	6282.8	83.4	1334.4	5515.5	9841.2	7784.0
198.3	145.2	220.3	98.7	244.1	198.3	145.2	220.3	98.7	244.1	1.1	13.8	9.3	29.8	33.7
1817.6	1330.6	2019.6	904.9	2237.4	1619.4	1185.4	1799.3	806.1	1993.3	329.9	179.9	1176.6	1922.8	2293.2
2423.5	1774.1	2692.8	1206.5	2983.2	605.9	443.5	673.2	301.6	745.8	363.0	86.5	811.8	739.2	1300.2
4176.9	3057.6	4641.0	2079.4	5141.5	1753.4	1283.5	1948.2	872.9	2158.3	2463.9	966.5	2845.9	1617.8	3342.5
5058.2	3702.7	5620.2	2518.1	6226.3	881.3	645.1	979.2	438.7	1084.8	955.2	438.7	1094.4	697.9	1353.6
7059.4	5167.7	7843.8	3514.3	8689.7	2001.2	1465.0	2223.6	996.3	2463.4	2077.5	976.6	2419.8	1506.4	2855.8
12152.5	8895.9	13502.8	6049.8	14958.9	5104.1	3736.3	5671.2	2540.9	6282.8	60048.0	29134.4	77284.0	8006.4	16346.4
1761.6	1289.6	1957.4	877.0	2168.5	1761.6	1289.6	1957.4	877.0	2168.5	639.0	1681.0	1291.5	944.1	852.0
1970.9	1442.8	2189.9	981.2	2426.1	209.3	153.2	232.6	104.2	257.6	59.1	186.0	131.8	91.4	77.3
2598.9	1902.4	2887.6	1293.8	3199.0	627.9	459.6	697.7	312.6	772.9	253.8	602.6	506.8	477.4	427.5
4500.0	3294.1	5000.0	2240.2	5539.3	1901.2	1391.7	2112.4	946.4	2340.2	847.0	1033.4	1076.9	1588.5	1619.5
9348.9	6843.6	10387.7	4654.1	11507.9	4848.9	3549.5	5387.6	2413.9	5968.7	3660.4	4484.4	5255.6	4204.5	6602.5

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ ... Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf ... Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM,Ablauf}/C_{SM,Zulauf}$ * 100)

Rückgehaltene Schwermetallfracht: Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
131.3	94.6	141.6	61.6	154.1	4.4	3.1	4.7	2.0	5.1	4.4	3.1	4.7	2.0	5.1	30.1	99.3	97.8	96.4	98.7	94.7
1073.7	751.5	1180.7	529.2	1293.6	35.7	25.0	39.2	17.6	43.0	40.0	28.1	43.9	19.6	48.1		99.5	95.1	98.4	98.5	97.3
438.2	309.6	484.8	217.0	528.0	14.6	10.3	16.1	7.2	17.5	54.6	38.4	60.0	26.8	65.6		*99.5*	96.0	*99.0*	*98.9*	97.3
1743.8	1214.8	1929.1	863.3	2101.0	57.9	40.4	64.1	28.7	69.8	112.5	78.8	124.1	55.5	135.4		*99.5*	94.6	*99.0*	*98.9*	97.3
876.5	619.2	989.6	433.9	1056.0	29.1	20.6	32.2	14.4	35.1	141.6	99.3	156.3	69.9	170.5		*99.5*	96.0	*99.0*	*98.9*	97.3
1990.3	1412.6	2201.8	985.4	2398.0	66.1	46.9	73.1	32.7	79.7	207.8	146.3	229.5	102.7	250.2		*99.5*	96.4	*99.0*	*98.9*	97.3
5020.7	2401.9	155.7	-7300.3	-1501.2	166.8	79.8	5.2	0.0	0.0	374.6	226.1	234.7	102.7	250.2		98.4	64.3	2.7	-287.3	-23.9
197.2	131.3	211.0	88.9	210.4	3.0	2.0	3.2	1.0	3.1	3.0	2.0	3.2	1.0	3.1	S	*99.5*	90.5	95.8	69.8	86.2
1289.5	1005.5	622.7	-1116.6	-299.9	19.3	15.1	9.3	0.0	0.0	22.3	17.0	12.5	1.0	3.1	66.8	79.6	84.8	84.6	-138.5	-15.0
242.9	357.1	-138.6	-437.6	-554.4	3.6	5.3	0.0	0.0	0.0	25.9	22.4	12.5	1.0	3.1		40.1	80.5	-20.6	-145.1	-74.3
-710.5	317.1	-897.7	-744.9	-1184.2	0.0	4.7	0.0	0.0	0.0	25.9	27.1	12.5	1.0	3.1		-40.5	24.7	-46.1	-85.3	-54.9
-73.9	206.4	-115.2	-259.2	-268.8	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	25.9	30.2	12.5	1.0	3.1		-8.4	32.0	-11.8	-59.1	-24.8
-76.3	488.3	-196.2	-510.1	-392.4	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0	25.9	37.5	12.5	1.0	3.1		-3.8	33.3	-8.8	-51.2	-15.9
-54943.9	-25398.1	-71612.8	-5465.5	-10063.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	37.5	12.5	1.0	3.1		-1076.5	-679.8	-1262.7	-215.1	-160.2
1122.6	-391.5	665.9	-67.2	1316.4	40.2	0.0	23.9	0.0	47.2	40.2	0.0	23.9	0.0	47.2	TFIIb	63.7	-30.4	34.0	-7.7	80.7
150.3	-32.8	100.8	12.8	180.3	5.4	0.0	3.6	0.5	6.5	5.4	0.0	3.6	0.5	6.5	27.9	71.8	-21.4	43.3	12.3	70.0
374.1	-143.0	190.8	-164.8	345.4	13.4	0.0	6.8	0.0	12.4	13.4	0.0	6.8	0.0	12.4		59.6	-31.1	27.4	-52.7	44.7
1054.1	358.3	1035.5	-642.0	720.7	37.8	12.8	37.1	0.0	25.8	37.8	12.8	37.1	0.0	25.8		55.4	25.7	49.0	-67.8	30.8
1188.5	-934.9	132.1	-1790.6	-633.8	42.6	0.0	4.7	0.0	0.0	42.6	0.0	4.7	0.0	0.0		24.5	-26.3	2.5	-74.2	-10.6

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{Pb}$ = SM-Fracht$_{Pb}$/SM_{Pb}

SM-JF = SM-Fracht/SM_{Pb}

SM-Jahresfrachten$_{Pb}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{Pb}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{Pb}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
0.9	1.3	1.0	0.9	1.1	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
8.2	12.0	9.1	8.1	10.1	7.3	10.7	8.1	7.3	9.0	1.2	1.8	1.4	1.2	1.5	1.1	1.6	1.2	1.1	1.3	0.6	1.4	0.7	0.6	0.8	0.5	1.2	0.6	0.5	0.7
11.2	16.3	12.4	11.1	13.7	3.0	4.4	3.3	3.0	3.7	1.7	2.5	1.9	1.7	2.1	0.4	0.7	0.5	0.4	0.5	0.8	1.9	0.9	0.8	1.0	0.2	0.5	0.2	0.2	0.3
23.0	33.7	25.6	22.9	28.3	11.8	17.3	13.2	11.8	14.6	3.4	5.1	3.8	3.4	4.2	1.8	2.6	2.0	1.8	2.2	1.7	3.8	1.9	1.7	2.1	0.9	2.0	1.0	0.9	1.1
29.0	42.4	32.2	28.8	35.6	6.0	8.7	6.6	5.9	7.3	4.3	6.4	4.8	4.3	5.3	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1	2.2	4.8	2.4	2.2	2.7	0.4	1.0	0.5	0.4	0.5
42.5	62.2	47.2	42.3	52.3	13.5	19.8	15.0	13.5	16.6	6.4	9.3	7.1	6.3	7.8	2.0	3.0	2.3	2.0	2.5	3.2	7.1	3.5	3.2	3.9	1.0	2.3	1.1	1.0	1.2
76.6	112.2	85.2	76.3	94.3	34.5	50.5	38.3	34.3	42.4	11.5	16.8	12.8	11.4	14.2	5.2	7.6	5.7	5.1	6.4	5.7	12.8	6.4	5.7	7.1	2.6	5.7	2.9	2.6	3.2
1.3	2.0	1.5	1.3	1.6	1.3	2.0	1.5	1.3	1.6	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
12.3	18.0	13.6	12.2	15.1	10.9	16.0	12.2	10.9	13.5	1.8	2.7	2.0	1.8	2.3	1.6	2.4	1.8	1.6	2.0	0.9	2.0	1.0	0.9	1.1	0.8	1.8	0.9	0.8	1.0
16.4	24.0	18.2	16.3	20.1	4.1	6.0	4.5	4.1	5.0	2.5	3.6	2.7	2.4	3.0	0.6	0.9	0.7	0.6	0.8	1.2	2.7	1.4	1.2	1.5	0.3	0.7	0.3	0.3	0.4
28.2	41.3	31.3	28.1	34.7	11.8	17.3	13.2	11.8	14.6	4.2	6.2	4.7	4.2	5.2	1.8	2.6	2.0	1.8	2.2	2.1	4.7	2.4	2.1	2.6	0.9	2.0	1.0	0.9	1.1
34.2	50.0	38.0	34.0	42.0	6.0	8.7	6.6	5.9	7.3	5.1	7.5	5.7	5.1	6.3	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1	2.6	5.7	2.8	2.6	3.2	0.4	1.0	0.5	0.4	0.5
47.7	69.8	53.0	47.5	58.7	13.5	19.8	15.0	13.5	16.6	7.2	10.5	7.9	7.1	8.8	2.0	3.0	2.3	2.0	2.5	3.6	7.9	4.0	3.6	4.4	1.0	2.3	1.1	1.0	1.2
82.1	120.2	91.2	81.7	101.0	34.5	50.5	38.3	34.3	42.4	12.3	18.0	13.7	12.3	15.2	5.2	7.6	5.7	5.1	6.4	6.2	13.7	6.8	6.1	7.6	2.6	5.7	2.9	2.6	3.2
11.9	17.4	13.2	11.8	14.6	11.9	17.4	13.2	11.8	14.6	1.8	2.6	2.0	1.8	2.2	1.8	2.6	2.0	1.8	2.2	0.9	2.0	1.0	0.9	1.1	0.9	2.0	1.0	0.9	1.1
13.3	19.5	14.8	13.3	16.4	1.4	2.1	1.6	1.4	1.7	2.0	2.9	2.2	2.0	2.5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	1.0	2.2	1.1	1.0	1.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
17.6	25.7	19.5	17.5	21.6	4.2	6.2	4.7	4.2	5.2	2.6	3.9	2.9	2.6	3.2	0.6	0.9	0.7	0.6	0.8	1.3	2.9	1.5	1.3	1.6	0.3	0.7	0.4	0.3	0.4
30.4	44.5	33.8	30.3	37.4	12.8	18.8	14.3	12.8	15.8	4.6	6.7	5.1	4.5	5.6	1.9	2.8	2.1	1.9	2.4	2.3	5.1	2.5	2.3	2.8	1.0	2.1	1.1	1.0	1.2
63.1	92.4	70.2	62.9	77.7	32.7	47.9	36.4	32.6	40.3	9.5	13.9	10.5	9.4	11.7	4.9	7.2	5.5	4.9	6.0	4.7	10.5	5.3	4.7	5.8	2.5	5.5	2.7	2.4	3.0
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_{J.}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	82.1	120.2	91.2	81.7	101.0	12.3	18.0	13.7	12.3	15.2	6.2	13.7	6.8	6.1	7.6
TFlb	76.6	112.2	85.2	76.3	94.3	11.5	16.8	12.8	11.4	14.2	5.7	12.8	6.4	5.7	7.1
TFllb	63.1	92.4	70.2	62.9	77.7	9.5	13.9	10.5	9.4	11.7	4.7	10.5	5.3	4.7	5.8

SM$_J$ ... mittlere Schwermetallkonzentration pro Jahr [µg]
J_s ... simulierte Betriebsjahre [a]

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert										Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
2.00	0.97	1.4	TFlb 1	0.6	1.5	3.7	2.9	6	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.02	0.04	0.06	0.05
18.33	8.91	13.2	TFlb 2	0.5	3.3	1.6	0.7	3	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.05	0.02	0.02	0.03
24.33	12.16	18.0	TFlb 5	0.5	2.7	1	0.5	3	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03
40.25	25.05	37.1	TFlb 6	0.5	3.6	1	0.5	3	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.05	0.01	0.01	0.03
48.25	31.54	46.7	TFlb 10	0.5	2.7	1	0.5	3	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03
66.42	46.26	68.5	TFlb 11	0.5	2.4	1	0.5	3	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03
112.75	83.48	123.6	TFlb 12	1.5	24	99.2	177	140	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.02	0.36	0.97	3.87	1.24
2.00	1.46	2.2	S 1	0.5	6.4	4.3	13.8	15.6	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.01	0.10	0.04	0.30	0.14
18.33	13.37	19.8	S 2	18.7	10.2	66.7	109	130	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.20	0.15	0.65	2.39	1.15
24.33	17.83	26.4	S 5	55	13.1	123	112	197	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.60	0.19	1.21	2.45	1.74
40.25	30.73	45.5	S 6	129	50.6	149	84.7	175	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	1.41	0.75	1.46	1.85	1.55
48.25	37.21	55.1	S 10	99.5	45.7	114	72.7	141	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	1.08	0.68	1.12	1.59	1.25
66.42	51.93	76.9	S 11	95.3	44.8	111	69.1	131	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	1.04	0.67	1.09	1.51	1.16
112.75	89.40	132.4	S 12	1080	524	1390	144	294	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	11.76	7.80	13.63	3.15	2.60
16.83	12.96	19.2	TFllb 1	33.3	87.6	67.3	49.2	44.4	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.36	1.30	0.66	1.08	0.39
18.83	14.50	21.5	TFllb 2	25.9	81.6	57.8	40.1	33.9	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.28	1.21	0.57	0.88	0.30
24.83	19.12	28.3	TFllb 5	37.1	88.1	74.1	69.8	62.5	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.40	1.31	0.73	1.53	0.55
43.00	33.10	49.0	TFllb 6	40.9	49.9	52	76.7	78.2	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.45	0.74	0.51	1.68	0.69
89.33	68.77	101.8	TFllb 7	69.3	84.9	99.5	79.6	125	0.10	0.67	0.20	0.39	0.50	0.75	1.26	0.98	1.74	1.11
			Zulauf 1 (10	91.8	67.2	102	45.7	113										

Analyse 2

Versuchsfortsetzung Versuchsreihe 1+2, Achtung: Konzentrationsänderung

01/02/2013		28.01. - 01.02.
Probe	ø	Nummern
S	D1	16,17,21,22,24,25,26,28,29
TFlb	D1	17,21,22,24,25,26,28,29
TFllb	D1	11,12,16,17,19,20,21,23,24
Zulauf		4

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Pb,Zn,Cu/Ni,Cr [µg/l] TFlb = TFlc (wurde falsch protokolliert) $J_s = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichn	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_s [a] Av15	J_s [a] Av100	J_s [a] Av200
20	100/50	TFlB 16	*0.5*	6.3	157	112	161	8.00	120.75	9.6	133.2	90.0	13.5	6.7
20	100/50	TFlB 17	4	5.8	108	72.9	106	15.25	136.00	18.3	151.5	102.3	15.3	7.7
19	100/50	TFlB 21	*0.5*	4.3	8.2	14.2	9.1	8.00	144.00	9.4	160.9	108.6	16.3	8.1
9	100/50	TFlB 22	*0.5*	9.2	32.3	55.5	46.8	19.25	163.25	20.7	181.6	122.7	18.4	9.2
9	100/50	TFlB 24	*0.5*	11.8	42.9	73.2	63.5	5.50	168.75	3.0	184.6	124.7	18.7	9.3
9	100/50	TFlB 25	*0.5*	14.4	79	122	147	16.50	185.25	8.9	193.5	130.7	19.6	9.8
9	500/100	TFlB 26	*0.5*	5	10.2	33.8	19.2	2.50	187.75	1.4	194.9	131.6	19.7	9.9
9	500/100	TFlB 28	*0.5*	6.9	7.7	21.1	10.2	4.00	191.75	2.2	197.0	133.0	20.0	10.0
9	500/100	TFlB 29	*0.5*	16.6	12.1	8.7	4.2	17.00	208.75	9.2	206.2	139.2	20.9	10.4
20	100/50	S17	130	86	136	59.8	130	23.25	136.00	27.9	160.3	108.2	16.2	8.1
18	100/50	S 21	52.9	15.7	159	65.6	125	8.00	144.00	9.1	169.4	114.4	17.2	8.6
9	100/50	S 22	9.4	170	3.2	122	30.5	19.25	163.25	19.7	189.1	127.7	19.2	9.6
9	100/50	S 24	13.7	44.5	38.7	139	249	5.50	168.75	3.0	192.1	129.7	19.5	9.7
9	100/50	S 25	139	84.7	182	82.6	253	16.50	185.25	8.9	201.0	135.7	20.4	10.2
9	500/100	S 26	4.4	21	17.2	74.9	118	2.50	187.75	1.4	202.3	136.6	20.5	10.2
9	500/100	S 28	5.4	61.2	145	103	329	4.00	191.75	2.2	204.5	138.1	20.7	10.4
9	500/100	S 29	62.7	115	325	106	431	17.00	208.75	9.2	213.7	144.3	21.6	10.8
19	100/50	TFlB 11	66.5	76	111	83.3	223	8.00	97.33	9.1	111.0	74.9	11.2	5.6
19	100/50	TFlB 12	118	139	234	65.6	227	15.25	112.58	17.4	128.3	86.7	13.0	6.5
19	100/50	TFlB 16	104	97.8	155	79.9	270	8.00	120.58	9.1	137.5	92.8	13.9	7.0
9	100/50	TFlB 17	59.2	52.2	83.2	75.2	176	19.25	139.83	20.7	158.2	106.8	16.0	8.0
9	100/50	TFlB 19	124	107	190	86.4	302	5.50	145.33	3.0	161.2	108.8	16.3	8.2
9	100/50	TFlB 20	137	201	344	86.2	282	16.50	161.83	8.9	170.1	114.9	17.2	8.6
9	500/100	TFlB 21	63.1	151	268	64.7	287	2.50	164.33	1.4	171.4	115.8	17.4	8.7
9	500/100	TFlB 22	storno	storno	storno	storno	storno	2.00	166.33	1.1	172.5	116.5	17.5	8.7
9	500/100	TFlB 23	58	113	238	70	287	2.00	168.33	1.1	173.6	117.2	17.6	8.8
9	500/100	TFlB 24	107	122	247	74.6	298	17.00	185.33	9.2	182.8	123.4	18.5	9.3
		Zulauf 4 (500	360	101	426	77.3	434							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_s ... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ | $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ | nur bei Ce > Bestimmungsgrenze: $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
12229.6	8952.4	13588.4	6088.2	15053.9	881.3	645.1	979.2	438.7	1084.8	*4.8*	60.5	1507.2	1075.2	1545.6
13909.5	10182.1	15455.0	6924.5	17121.8	1679.9	1229.8	1866.6	836.3	2067.9	73.2	106.1	1976.4	1334.1	1939.8
14768.8	10811.1	16409.8	7352.2	18179.4	859.2	629.0	954.7	427.8	1057.7	*4.7*	40.2	76.8	132.9	*85.2*
16673.2	12205.2	18525.8	8300.3	20523.6	1904.4	1394.1	2116.0	948.0	2344.2	*10.4*	190.9	670.1	1151.3	970.9
16945.8	12404.8	18828.7	8436.0	20859.2	272.6	199.6	302.9	135.7	335.6	*1.5*	35.0	127.4	217.4	188.6
17763.8	13003.5	19737.5	8843.2	21866.1	817.9	598.8	908.8	407.2	1006.8	*4.5*	128.3	703.9	1087.0	1309.8
18249.8	13139.9	20312.6	8947.5	22452.0	486.0	136.4	575.1	104.4	585.9	*0.7*	6.8	13.8	45.6	25.9
19027.4	13358.0	21232.8	9114.5	23389.4	777.6	218.2	920.2	167.0	937.4	*1.1*	14.9	16.6	45.6	22.0
22332.2	14285.2	25143.5	9824.1	27373.5	3304.8	927.2	3910.7	709.6	3984.1	*4.6*	152.4	111.1	79.9	38.6
14713.7	10770.8	16348.6	7324.8	18111.6	2561.2	1874.9	2845.8	1275.0	3152.7	3627.0	2399.4	3794.4	1668.4	3627.0
15550.9	11383.7	17278.8	7741.6	19142.2	837.2	612.9	930.2	416.8	1030.6	482.4	143.2	1450.1	598.3	1140.0
17360.3	12708.2	19289.2	8642.3	21369.4	1809.4	1324.5	2010.4	900.7	2227.2	106.4	3350.7	63.1	2404.6	601.2
17632.9	12907.8	19592.2	8778.1	21705.0	272.6	199.6	302.9	135.7	335.6	40.7	132.2	114.9	353.4	739.5
18450.9	13506.5	20501.0	9185.2	22711.9	817.9	598.8	908.8	407.2	1006.8	1238.5	754.7	1621.6	736.0	2254.2
18936.9	13642.9	21076.1	9289.6	23297.8	486.0	136.4	575.1	104.4	585.9	5.9	28.4	23.2	101.1	159.3
19714.5	13861.0	21996.2	9456.6	24235.2	777.6	218.2	920.2	167.0	937.4	11.7	132.2	313.2	222.5	710.6
23019.3	14788.2	25906.9	10166.2	28219.3	3304.8	927.2	3910.7	709.6	3984.1	575.6	1055.7	2983.5	973.1	3956.6
10186.1	7456.5	11317.9	5070.9	12538.5	837.2	612.9	930.2	416.8	1030.6	606.5	693.1	1012.3	759.7	2033.8
11782.1	8624.8	13091.2	5865.4	14503.0	1595.9	1168.3	1773.3	794.5	1964.5	2051.4	2416.5	4068.1	1140.5	3946.4
12619.3	9237.6	14021.4	6282.2	15533.5	837.2	612.9	930.2	416.8	1030.6	948.5	891.9	1413.6	728.7	2462.4
14523.7	10631.7	16137.4	7230.2	17877.7	1904.4	1394.1	2116.0	948.0	2344.2	1228.1	1082.9	1726.0	1560.0	3651.1
14796.3	10831.3	16440.4	7365.9	18213.3	272.6	199.6	302.9	135.7	335.6	368.3	317.8	564.3	256.6	896.9
15614.3	11430.0	17349.2	7773.1	19220.2	817.9	598.8	908.8	407.2	1006.8	1220.7	1790.9	3065.0	768.0	2512.6
16100.3	11566.4	17924.3	7877.5	19806.1	486.0	136.4	575.1	104.4	585.9	85.2	203.9	361.8	87.3	387.5
16489.1	11675.5	18384.4	7961.0	20274.8	388.8	109.1	460.1	83.5	468.7	storna	storna	storna	storna	storna
16877.9	11784.6	18844.4	8044.4	20743.5	388.8	109.1	460.1	83.5	468.7	62.6	122.0	257.0	75.6	310.0
20182.7	12711.7	22755.1	8754.1	24727.6	3304.8	927.2	3910.7	709.6	3984.1	982.3	1120.0	2267.5	684.8	2735.6

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFlb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
876.5	584.6	-528.0	-636.5	-460.8	29.1	19.4	0.0	0.0	0.0	403.7	245.5	234.7	102.7	250.2	30.1	*99.5*	90.6	-53.9	-145.1	-42.5
1606.7	1123.6	-109.8	-497.8	128.1	53.4	37.3	0.0	0.0	4.3	457.1	282.8	234.7	102.7	254.4		*95.6*	91.4	-5.9	-59.5	6.2
854.6	588.7	878.0	294.8	972.5	28.4	19.6	29.2	9.8	32.3	485.5	302.4	263.8	112.5	286.8		*99.5*	93.6	92.0	68.9	91.9

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

1894.0	1203.2	1445.9	-203.3	1373.3	62.9	40.0	48.0	0.0	45.6	548.4	342.3	311.9	112.5	332.4		99.5	86.3	68.3	-21.4	58.6
271.2	164.5	175.5	-81.7	147.0	9.0	5.5	5.8	0.0	4.9	557.4	347.8	317.7	112.5	337.3		99.5	82.4	57.9	-60.2	43.8
813.5	470.4	204.9	-679.8	-302.9	27.0	15.6	6.8	0.0	0.0	584.4	363.4	324.5	112.5	337.3		99.5	78.6	22.5	-167.0	-30.1
485.3	129.6	561.3	58.7	560.0	16.1	4.3	18.6	2.0	18.6	600.5	367.7	343.2	114.4	355.9		99.9	95.0	97.6	56.3	95.6
776.5	203.3	903.5	121.4	915.4	25.8	6.8	30.0	4.0	30.4	626.3	374.5	373.2	118.5	386.3		99.9	93.2	98.2	72.7	97.6
3300.2	774.8	3799.6	629.7	3945.6	109.6	25.7	126.2	20.9	131.1	736.0	400.2	499.4	139.4	517.4		99.9	83.6	97.2	88.7	99.0
-1065.8	-524.5	-948.6	-393.4	-474.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.9	37.5	12.5	1.0	3.1	S	-41.6	-28.0	-33.3	-30.9	-15.0
354.8	469.7	-519.8	-181.5	-109.4	5.3	7.0	0.0	0.0	0.0	31.2	44.5	12.5	1.0	3.1	66.8	42.4	76.6	-55.9	-43.5	-10.6
1702.9	-2026.2	1947.3	-1503.9	1626.1	25.5	0.0	29.2	0.0	24.3	56.7	44.5	41.6	1.0	27.5		94.1	-153.0	96.9	-167.0	73.0
232.0	67.4	188.0	-217.7	-403.9	3.5	1.0	2.8	0.0	0.0	60.2	45.6	44.4	1.0	27.5		85.1	33.8	62.1	-160.4	-120.4
-420.6	-155.9	-712.8	-328.8	-1247.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.2	45.6	44.4	1.0	27.5		-51.4	-26.0	-78.4	-80.7	-123.9
480.1	108.0	551.9	3.2	426.6	7.2	1.6	8.3	0.0	6.4	67.4	47.2	52.7	1.1	33.9		98.8	79.2	96.0	3.1	72.8
765.9	86.0	607.0	-55.5	226.8	11.5	1.3	9.1	0.0	3.4	78.8	48.5	61.8	1.1	37.3		98.5	39.4	66.0	-33.2	24.2
2729.2	-128.5	927.2	-263.5	27.5	40.9	0.0	13.9	0.0	0.4	119.7	48.5	75.7	1.1	37.7		82.6	-13.9	23.7	-37.1	0.7
230.7	-80.3	-82.1	-342.9	-1003.2	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	50.9	0.0	4.7	0.0	0.0	TFIIb	27.6	-13.1	-8.8	-82.3	-97.3
-455.5	-1248.2	-2294.8	-346.0	-1981.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.9	0.0	4.7	0.0	0.0	27.9	-28.5	-106.8	-129.4	-43.5	-100.9
-111.3	-279.1	-483.4	-311.9	-1431.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.9	0.0	4.7	0.0	0.0		-13.3	-45.5	-52.0	-74.8	-138.9
676.3	311.2	390.0	-612.0	-1306.9	24.2	11.2	14.0	0.0	0.0	75.1	11.2	18.7	0.0	0.0		35.5	22.3	18.4	-64.6	-55.8
-95.6	-118.2	-261.4	-120.9	-561.3	0.0	0.0	-9.4	0.0	0.0	75.1	11.2	9.3	0.0	0.0		-35.1	-59.2	-86.3	-89.1	-167.3
-402.7	-1192.2	-2156.2	-360.9	-1505.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	75.1	11.2	9.3	0.0	0.0		-49.2	-199.1	-237.3	-88.6	-149.6
400.8	-67.5	213.3	17.0	198.5	14.4	0.0	7.6	0.6	7.1	89.5	11.2	17.0	0.6	7.1		82.5	-49.5	37.1	16.3	33.9
starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna	starna		starna	starna	starna	starna	starna
326.2	-13.0	203.0	7.9	158.8	11.7	0.0	7.3	0.3	5.7	101.2	11.2	24.3	0.9	12.8		83.9	-11.9	44.1	9.4	33.9
2322.5	-192.8	1643.2	24.8	1248.5	83.2	0.0	58.9	0.9	44.7	184.4	11.2	83.2	1.8	57.6		70.3	-20.8	42.0	3.5	31.3

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges} = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_{J}$

$SM\text{-}JF = SM\text{-}Fracht/SM_{J}$

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
82.6	120.9	91.8	82.2	101.7	6.0	8.7	6.6	5.9	7.3
93.9	137.5	104.4	93.5	115.6	11.3	16.6	12.6	11.3	14.0
99.7	146.0	110.8	99.3	122.8	5.8	8.5	6.4	5.8	7.1
112.6	164.8	125.1	112.1	138.6	12.9	18.8	14.3	12.8	15.8
114.4	167.5	127.2	113.9	140.9	1.8	2.7	2.0	1.8	2.3
120.0	175.6	133.3	119.4	147.7	5.5	8.1	6.1	5.5	6.8
123.2	177.5	137.2	120.8	151.6	3.3	1.8	3.9	1.4	4.0
128.5	180.4	143.4	123.1	158.0	5.3	2.9	6.2	2.3	6.3
150.8	192.9	169.8	132.7	184.9	22.3	12.5	26.4	9.6	26.9
99.4	145.5	110.4	98.9	122.3	17.3	25.3	19.2	17.2	21.3
105.0	153.8	116.7	104.6	129.3	5.7	8.3	6.3	5.6	7.0
117.2	171.6	130.3	116.7	144.3	12.2	17.9	13.6	12.2	15.0
119.1	174.3	132.3	118.6	146.6	1.8	2.7	2.0	1.8	2.3
124.6	182.4	138.4	124.1	153.4	5.5	8.1	6.1	5.5	6.8
127.9	184.3	142.3	125.5	157.3	3.3	1.8	3.9	1.4	4.0
133.1	187.2	148.5	127.7	163.7	5.3	2.9	6.2	2.3	6.3
155.5	199.7	175.0	137.3	190.6	22.3	12.5	26.4	9.6	26.9
68.8	100.7	76.4	68.5	84.7	5.7	8.3	6.3	5.6	7.0
79.6	116.5	88.4	79.2	97.9	10.8	15.8	12.0	10.7	13.3
85.2	124.8	94.7	84.8	104.9	5.7	8.3	6.3	5.6	7.0
98.1	143.6	109.0	97.7	120.7	12.9	18.8	14.3	12.8	15.8
99.9	146.3	111.0	99.5	123.0	1.8	2.7	2.0	1.8	2.3
105.4	154.4	117.2	105.0	129.8	5.5	8.1	6.1	5.5	6.8
108.7	156.2	121.0	106.4	133.8	3.3	1.8	3.9	1.4	4.0
111.4	157.7	124.2	107.5	136.9	2.6	1.5	3.1	1.1	3.2
114.0	159.2	127.3	108.7	140.1	2.6	1.5	3.1	1.1	3.2
136.3	171.7	153.7	118.2	167.0	22.3	12.5	26.4	9.6	26.9
Av = 15					Av = 15				

SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
12.4	18.1	13.8	12.3	15.2	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1
14.1	20.6	15.7	14.0	17.3	1.7	2.5	1.9	1.7	2.1
15.0	21.9	16.6	14.9	18.4	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1
16.9	24.7	18.8	16.8	20.8	1.9	2.8	2.1	1.9	2.4
17.2	25.1	19.1	17.1	21.1	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
18.0	26.3	20.0	17.9	22.1	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
18.5	26.6	20.6	18.1	22.7	0.5	0.3	0.6	0.2	0.6
19.3	27.1	21.5	18.5	23.7	0.8	0.4	0.9	0.3	0.9
22.6	28.9	25.5	19.9	27.7	3.3	1.9	4.0	1.4	4.0
14.9	21.8	16.6	14.8	18.3	2.6	3.8	2.9	2.6	3.2
15.8	23.1	17.5	15.7	19.4	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
17.6	25.7	19.5	17.5	21.6	1.8	2.7	2.0	1.8	2.3
17.9	26.2	19.8	17.8	22.0	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
18.7	27.4	20.8	18.6	23.0	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
19.2	27.6	21.3	18.8	23.6	0.5	0.3	0.6	0.2	0.6
20.0	28.1	22.3	19.2	24.5	0.8	0.4	0.9	0.3	0.9
23.3	30.0	26.2	20.6	28.6	3.3	1.9	4.0	1.4	4.0
10.3	15.1	11.5	10.3	12.7	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
11.9	17.5	13.3	11.9	14.7	1.6	2.4	1.8	1.6	2.0
12.8	18.7	14.2	12.7	15.7	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
14.7	21.5	16.3	14.6	18.1	1.9	2.8	2.1	1.9	2.4
15.0	21.9	16.7	14.9	18.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3
15.8	23.2	17.6	15.7	19.5	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
16.3	23.4	18.2	16.0	20.1	0.5	0.3	0.6	0.2	0.6
16.7	23.7	18.6	16.1	20.5	0.4	0.2	0.5	0.2	0.5
17.1	23.9	19.1	16.3	21.0	0.4	0.2	0.5	0.2	0.5
20.4	25.8	23.1	17.7	25.0	3.3	1.9	4.0	1.4	4.0
Av = 100					Av = 100				

SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
6.2	9.1	6.9	6.2	7.6	0.4	0.7	0.5	0.4	0.5
7.0	10.3	7.8	7.0	8.7	0.9	1.2	0.9	0.8	1.0
7.5	11.0	8.3	7.4	9.2	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
8.4	12.4	9.4	8.4	10.4	1.0	1.4	1.1	1.0	1.2
8.6	12.6	9.5	8.5	10.6	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
9.0	13.2	10.0	9.0	11.1	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
9.2	13.3	10.3	9.1	11.4	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3
9.6	13.5	10.8	9.2	11.8	0.4	0.2	0.5	0.2	0.5
11.3	14.5	12.7	10.0	13.9	1.7	0.9	2.0	0.7	2.0
7.5	10.9	8.3	7.4	9.2	1.3	1.9	1.4	1.3	1.6
7.9	11.5	8.8	7.8	9.7	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
8.8	12.9	9.8	8.8	10.8	0.9	1.3	1.0	0.9	1.1
8.9	13.1	9.9	8.9	11.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
9.3	13.7	10.4	9.3	11.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
9.6	13.8	10.7	9.4	11.8	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3
10.0	14.0	11.1	9.6	12.3	0.4	0.2	0.5	0.2	0.5
11.7	15.0	13.1	10.3	14.3	1.7	0.9	2.0	0.7	2.0
5.2	7.6	5.7	5.1	6.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
6.0	8.7	6.6	5.9	7.3	0.8	1.2	0.9	0.8	1.0
6.4	9.4	7.1	6.4	7.9	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
7.4	10.8	8.2	7.3	9.1	1.0	1.4	1.1	1.0	1.2
7.5	11.0	8.3	7.5	9.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
7.9	11.6	8.8	7.9	9.7	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5
8.2	11.7	9.1	8.0	10.0	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3
8.4	11.8	9.3	8.1	10.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
8.5	11.9	9.5	8.1	10.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2
10.2	12.9	11.5	8.9	12.5	1.7	0.9	2.0	0.7	2.0
Av = 200					Av = 200				

Simulierte Betriebsjahre

$J_{s} = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_{J}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	155.5	199.7	175.0	137.3	190.6	23.3	30.0	26.2	20.6	28.6	11.7	15.0	13.1	10.3	14.3
TFIb	150.8	192.9	169.8	132.7	184.9	22.6	28.9	25.5	19.9	27.7	11.3	14.5	12.7	10.0	13.9
TFIIb	136.3	171.7	153.7	118.2	167.0	20.4	25.8	23.1	17.7	25.0	10.2	12.9	11.5	8.9	12.5

SM_{J} ... mittlere Schwermetallkonzentration pro Jahr [µg]

J_{s} ... simulierte Betriebsjahre [a]

Analyse 3

neue Säulen mit d = 13,4 mm, Versuchsreihe 3

13/02/2013 07.02. - 09.02.

Probe	#	Nummern
S	D1	32,34,35,37,39,40
TFIb	D1	32,34,35,37,39,40
TFIIb	D1	27,29,30,32,34,35
Zulauf		5

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Pb,Zn,Cu/Ni,Cr [µg/l] TFIb = TFIc (wurde falsch protokolliert) $J_A = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeichnung	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_A [a] Av15	J_A [a] Av100	J_A [a] Av200
4.8	100/50	TFIB 32	0.9	5.7	5.1	12.3	*3*	2.00	2.00	0.6	0.6	0.4	0.1	0.0
4.8	100/50	TFIB 34	2.5	7	6.2	9.1	*3*	4.00	6.00	1.2	1.7	1.2	0.2	0.1
4.8	100/50	TFIB 35	0.5	8.9	6.3	7.4	*3*	15.83	21.83	4.6	6.3	4.2	0.6	0.3
4.8	100/50	TFIB 37	0.5	12	8.4	7.1	*3*	4.00	25.83	1.2	7.4	5.0	0.8	0.4
4.8	100/50	TFIB 39	6.9	15.1	13.3	6.6	6.9	4.00	29.83	1.2	8.6	5.8	0.9	0.4
4.8	100/50	TFIB 40	0.5	23.6	15.6	6.2	4.2	17.75	47.58	5.1	13.7	9.3	1.4	0.7
4.8	100/50	S 32	*0.5*	15.3	10.4	4.5	7	2.00	2.00	0.6	0.6	0.4	0.1	0.0
4.8	100/50	S 34	3	16.6	11	3.7	9.2	4.00	6.00	1.2	1.7	1.2	0.2	0.1
4.8	100/50	S 35	1.1	57	35.6	22.7	25.6	15.83	21.83	4.6	6.3	4.2	0.6	0.3
4.8	100/50	S 37	1	72.4	39.5	28.3	30.9	4.00	25.83	1.2	7.4	5.0	0.8	0.4
4.8	100/50	S 39	1.8	75.2	44.4	34.8	45.2	4.00	29.83	1.2	8.6	5.8	0.9	0.4
4.8	100/50	S 40	1.4	82.1	52.1	59.3	72.8	17.75	47.58	5.1	13.7	9.3	1.4	0.7
4.8	100/50	TFIIB 27	1.5	46.7	36	9.1	20.3	2.00	2.00	0.6	0.6	0.4	0.1	0.0
4.8	100/50	TFIIB 29	1.7	39.5	25.6	4.3	11.6	4.00	6.00	1.2	1.7	1.2	0.2	0.1
4.8	100/50	TFIIB 30	2.7	32.2	20.7	3.2	10	15.83	21.83	4.6	6.3	4.2	0.6	0.3
4.8	100/50	TFIIB 32	1.7	35.5	19.6	3.4	8.4	4.00	25.83	1.2	7.4	5.0	0.8	0.4
4.8	100/50	TFIIB 34	2.1	35.7	20.7	3.9	11.1	4.00	29.83	1.2	8.6	5.8	0.9	0.4
4.8	100/50	TFIIB 35	2.5	39.5	16	4.3	5.2	17.75	47.58	5.1	13.7	9.3	1.4	0.7
		Zulauf 5 (100	98	57	108	47.7	105							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_A... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ nur bei Ce > Bestimmungsgrenze $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	0.5	3.3	2.9	7.1	1.7
169.3	98.5	186.6	82.4	181.4	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	2.9	8.1	7.1	10.5	3.5
616.2	358.4	679.1	299.9	660.2	446.9	259.9	492.5	217.5	478.8	2.3	40.6	28.7	33.7	13.7
729.1	424.1	803.5	354.9	781.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	0.6	13.8	9.7	8.2	3.5
842.0	489.7	927.9	409.8	902.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	7.9	17.4	15.3	7.6	7.9
1343.0	781.1	1480.0	653.7	1438.9	501.0	291.4	552.1	243.8	536.8	2.6	120.6	79.7	31.7	21.5
56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	*0.3*	8.8	6.0	2.6	4.0
169.3	98.5	186.6	82.4	181.4	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	3.5	19.1	12.7	4.3	10.6
616.2	358.4	679.1	299.9	660.2	446.9	259.9	492.5	217.5	478.8	5.0	259.9	162.3	103.5	116.7
729.1	424.1	803.5	354.9	781.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	1.2	83.4	45.5	32.6	35.6

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die ablöuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

842.0	489.7	927.9	409.8	902.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	2.1	86.6	51.1	40.1	52.1
1343.0	781.1	1480.0	653.7	1438.9	501.0	291.4	552.1	243.8	536.8	7.2	419.7	266.3	303.1	372.2
56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	56.4	32.8	62.2	27.5	60.5	0.9	26.9	20.7	5.2	11.7
189.3	98.5	186.6	82.4	181.4	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	2.0	45.5	29.5	5.0	13.4
616.2	358.4	679.1	299.9	660.2	446.9	259.9	492.5	217.5	478.8	12.3	146.8	94.4	14.6	45.6
729.1	424.1	803.5	354.9	781.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	2.0	40.9	22.6	3.9	9.7
842.0	489.7	927.9	409.8	902.2	112.9	65.7	124.4	55.0	121.0	2.4	41.1	23.8	4.5	12.8
1343.0	781.1	1480.0	653.7	1438.9	501.0	291.4	552.1	243.8	536.8	12.8	201.9	81.8	22.0	26.6

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM\ Ablauf}/C_{SM\ Zulauf}$ * 100)

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
55.9	29.5	59.3	20.4	58.8	1.9	1.0	2.0	0.7	2.0	1.9	1.0	2.0	0.7	2.0	30	99.1	90.0	95.3	74.2	97.1
110.0	57.6	117.3	44.5	117.5	3.7	1.9	3.9	1.5	3.9	5.5	2.9	5.9	2.2	5.9		97.4	87.7	94.3	80.9	97.1
444.6	219.3	463.8	188.8	465.1	14.8	7.3	15.5	6.1	15.5	20.4	10.2	21.3	8.3	21.4		99.5	84.4	94.2	84.5	97.1
112.3	51.8	114.7	46.8	117.5	3.7	1.7	3.8	1.6	3.9	24.1	11.9	25.2	9.8	25.3		99.5	78.9	92.2	85.1	97.1
104.9	48.3	109.1	47.3	113.0	3.5	1.6	3.6	1.6	3.8	27.6	13.6	28.8	11.4	29.1		93.0	73.5	87.7	86.2	93.4
498.4	170.7	472.3	212.1	515.3	16.6	5.7	15.7	7.1	17.2	44.2	19.2	44.5	18.5	46.2		99.5	58.6	85.6	87.0	96.0
56.2	24.0	56.2	24.9	56.4	0.8	0.3	0.8	0.4	0.8	0.8	0.3	0.8	0.4	0.8	S	99.5	73.2	90.4	90.6	93.3
109.4	46.5	111.7	50.7	110.4	1.6	0.7	1.6	0.7	1.6	2.4	1.0	2.4	1.1	2.4	70	96.9	70.9	89.8	92.2	91.2
441.9	0.0	330.1	114.0	362.1	6.3	0.0	4.7	1.6	5.2	8.7	1.0	7.1	2.7	7.6		98.9	0.0	67.0	52.4	75.6
111.7	-17.7	78.9	22.3	85.4	1.6	0.0	1.1	0.3	1.2	10.3	1.0	8.2	3.0	8.8		99.0	-27.0	63.4	40.7	70.6
110.8	-21.0	73.3	14.9	68.9	1.6	0.0	1.0	0.2	1.0	11.9	1.0	9.3	3.2	9.8		98.2	-31.9	58.9	27.0	57.0
493.8	-128.3	285.8	-59.3	164.6	7.1	0.0	4.1	0.0	2.4	18.9	1.0	13.4	3.2	12.1		98.6	-44.0	51.8	-24.3	30.7
55.6	5.9	41.5	22.2	48.8	1.9	0.2	1.4	0.7	1.6	1.9	0.2	1.4	0.7	1.6	TFIIb	98.5	18.1	66.7	80.9	80.7
110.9	20.2	94.9	50.0	107.6	3.7	0.7	3.2	1.7	3.6	5.6	0.9	4.5	2.4	5.2	30	98.3	30.7	76.3	91.0	89.0
434.6	113.1	398.1	202.9	433.2	14.5	3.8	13.3	6.8	14.4	20.0	4.6	17.8	9.2	19.7		97.2	43.5	80.8	93.3	90.5
110.9	24.8	101.8	51.0	111.3	3.7	0.8	3.4	1.7	3.7	23.7	5.5	21.2	10.9	23.4		98.3	37.7	81.9	92.9	92.0
110.5	24.5	100.6	50.5	108.2	3.7	0.8	3.4	1.7	3.6	27.4	6.3	24.6	12.6	27.0		97.9	37.4	80.8	91.8	89.4
488.2	89.5	470.3	221.9	510.2	16.3	3.0	15.7	7.4	17.0	43.7	9.3	40.2	20.0	44.0		97.4	30.7	85.2	91.0	95.0

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{av}$ = $SM\text{-}Fracht_{av}/SM_{J..}$

SM-JF = SM-Fracht/$SM_{J..}$

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

SM-Jahresfrachten$_{av}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{av}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{av}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	1.3	1.3	1.1	1.2	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4.2	4.8	4.6	4.1	4.5	3.0	3.5	3.3	2.9	3.2	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
4.9	5.7	5.4	4.8	5.3	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5.7	6.6	6.3	5.5	6.1	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	3.4	3.9	3.7	3.3	3.6	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	1.3	1.3	1.1	1.2	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4.2	4.8	4.6	4.1	4.5	3.0	3.5	3.3	2.9	3.2	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
4.9	5.7	5.4	4.8	5.3	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5.7	6.6	6.3	5.5	6.1	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	3.4	3.9	3.7	3.3	3.6	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	1.3	1.3	1.1	1.2	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4.2	4.8	4.6	4.1	4.5	3.0	3.5	3.3	2.9	3.2	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
4.9	5.7	5.4	4.8	5.3	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5.7	6.6	6.3	5.5	6.1	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	3.4	3.9	3.7	3.3	3.6	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_{i,s}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)					SM$_i$ ... mittlere Schwermetallkonzentration pro Jahr [µg]
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	J_s ... simulierte Betriebsjahre [a]
S	9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	
TFl(b)c	9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	
TFIIb	9.1	10.6	10.0	8.8	9.7	1.4	1.6	1.5	1.3	1.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert										Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
2.00	0.39	0.6	TFIB 32	0.9	5.7	5.1	12.3	*3*	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	0.10	0.05	0.26	0.03
6.00	1.17	1.7	TFIB 34	2.5	7	6.2	9.1	*3*	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.03	0.12	0.06	0.19	0.03
21.83	4.25	6.3	TFIB 35	0.5	8.9	6.3	7.4	*3*	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	0.16	0.06	0.16	0.03
25.83	5.02	7.4	TFIB 37	0.5	12	8.4	7.1	*3*	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	0.21	0.08	0.15	0.03
29.83	5.80	8.6	TFIB 39	6.9	15.1	13.3	6.6	6.9	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.07	0.26	0.12	0.14	0.07
47.58	9.25	13.7	TFIB 40	0.5	23.6	15.6	6.2	4.2	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	0.41	0.14	0.13	0.04
2.00	0.39	0.6	S 32	*0.5*	15.3	10.4	4.5	7	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	0.27	0.10	0.09	0.07
6.00	1.17	1.7	S 34	3	16.6	11	3.7	9.2	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.03	0.29	0.10	0.08	0.09
21.83	4.25	6.3	S 35	1.1	57	35.6	22.7	25.6	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	1.00	0.33	0.48	0.24
25.83	5.02	7.4	S 37	1	72.4	39.5	28.3	30.9	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	1.27	0.37	0.59	0.29
29.83	5.80	8.6	S 39	1.8	75.2	44.4	34.8	45.2	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.02	1.32	0.41	0.73	0.43
47.58	9.25	13.7	S 40	1.4	82.1	52.1	59.3	72.8	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.01	1.44	0.48	1.24	0.69
2.00	0.39	0.6	TFIIB 27	1.5	46.7	36	9.1	20.3	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.02	0.82	0.33	0.19	0.19
6.00	1.17	1.7	TFIIB 29	1.7	39.5	25.6	4.3	11.6	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.02	0.69	0.24	0.09	0.11
21.83	4.25	6.3	TFIIB 30	2.7	32.2	20.7	3.2	10	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.03	0.56	0.19	0.07	0.10
25.83	5.02	7.4	TFIIB 32	1.7	35.5	19.6	3.4	8.4	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.02	0.62	0.18	0.07	0.08
29.83	5.80	8.6	TFIIB 34	2.1	35.7	20.7	3.9	11.1	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.02	0.63	0.19	0.08	0.11
47.58	9.25	13.7	TFIIB 35	2.5	39.5	16	4.3	5.2	0.09	0.79	0.20	0.38	0.50	0.03	0.69	0.15	0.09	0.05
			Zulauf 5 (10	98	57	108	47.7	105										

Analyse 4

neue Säulen mit d = 13,4 mm, Versuchsreihe 4

25/02/2013 20.02. - 22.02.

Probe	ø	Nummern
S	D1	50,52,53,55,56
TFIb	D1	50,52,53,55,56,58
TFIIb	D1	46,47,49,51,52,54
Zulauf		6

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Pb,Zn,Cu/Ni,Cr [µg/l] TFIb = TFIc (wurde falsch protokolliert) $J_A = V_{ges}/Q_j$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichnu	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_A [a] Av15	J_A [a] Av100	J_A [a] Av200	t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
7	100/50	TF Ib 50	*0.5*	1.3	33.5	5.5	4.6	2.00	2.00	0.84	0.8	0.6	0.1	0.0	t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
7	100/50	TF Ib 52	*0.5*	1.4	2	4.5	*3*	4.00	6.00	1.68	2.5	1.7	0.3	0.1	V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
7	100/50	TF Ib 53	*0.5*	1.5	1	2.1	*3*	15.50	21.50	6.51	9.0	6.1	0.9	0.5	V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
7	100/50	TF Ib 55	*0.5*	1.5	13.5	1.6	6.9	6.00	27.50	2.52	11.6	7.8	1.2	0.6	J_A... aufberachte Jahresfrachten [a]
7	100/50	TF Ib 56	*0.5*	2.9	2.1	*0.5*	*3*	17.50	45.00	7.35	18.9	12.8	1.9	1.0	Q_j ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]
7	100/50	TF Ib 58	*0.5*	1.7	1	*0.5*	*3*	4.00	49.00	1.68	20.6	13.9	2.1	1.0	
22	100/50	S 50	*0.5*	1.8	1	10.7	11.3	2.00	2.00	2.64	2.6	1.8	0.3	0.1	
22	100/50	S 52	*0.5*	1.8	1	22.9	22.3	4.00	6.00	5.28	7.9	5.3	0.8	0.4	
22	100/50	S 53	*0.5*	2.2	24.2	65.8	92.1	15.50	21.50	20.46	28.4	19.2	2.9	1.4	
22	100/50	S 55	7.2	8.9	53.5	86.4	116	6.00	27.50	7.92	36.3	24.5	3.7	1.8	
22	100/50	S 56	56.2	20	67.1	69.7	122	17.50	45.00	23.10	59.4	40.1	6.0	3.0	
7	100/50	TF IIb 46	0.7	12.9	9.7	0.8	4.4	2.00	2.00	0.84	0.8	0.6	0.1	0.0	

7	100/50	TFIIb 47	*0.5*	11.2	8.2	0.6	*3*	2.00	4.00	0.84	1.7	1.1	0.2	0.1
7	100/50	TFIIb 49	*0.5*	3.9	3	*0.5*	*3*	17.50	21.50	7.35	9.0	6.1	0.9	0.5
7	100/50	TFIIb 51	*0.5*	4.4	3.1	*0.5*	*3*	6.00	27.50	2.52	11.6	7.8	1.2	0.6
7	100/50	TFIIb 52	*0.5*	1.7	*1*	1	*3*	17.50	45.00	7.35	18.9	12.8	1.9	1.0
7	100/50	TFIIb 54	*0.5*	4.7	1.4	3.6	*3*	4.00	49.00	1.68	20.6	13.9	2.1	1.0
		Zulauf 6 (100	93.1	58.9	104	48.8	121							

Schwermetall-Frachten

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ | $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ | $SM\text{-}Frachtablauf = Ce*V$

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
78.2	49.5	87.4	41.0	101.6	78.2	49.5	87.4	41.0	101.6	*0.4*	1.1	28.1	4.6	3.9
234.6	148.4	262.1	123.0	304.9	156.4	99.0	174.7	82.0	203.3	*0.8*	2.4	3.4	7.6	*5.0*
840.7	531.9	939.1	440.7	1092.6	606.1	383.4	677.0	317.7	787.7	*3.3*	9.8	*6.5*	13.7	*19.5*
1075.3	680.3	1201.2	563.6	1397.6	234.6	148.4	262.1	123.0	304.9	*1.3*	3.8	34.0	4.0	17.4
1759.6	1113.2	1965.6	922.3	2286.9	684.3	432.9	764.4	358.7	889.4	*3.7*	21.3	15.4	*3.7*	*22.1*
1916.0	1212.2	2140.3	1004.3	2490.2	156.4	99.0	174.7	82.0	203.3	*0.8*	2.9	*1.7*	*0.8*	*5.0*
245.8	155.5	274.6	128.8	319.4	245.8	155.5	274.6	128.8	319.4	*1.3*	4.8	*2.6*	28.2	29.8
737.4	466.5	823.7	386.5	958.3	491.6	311.0	549.1	257.7	638.9	*2.6*	9.5	*5.3*	120.9	117.7
2642.2	1671.6	2951.5	1384.9	3434.0	1904.8	1205.1	2127.8	998.4	2475.7	*10.2*	45.0	495.1	1346.3	1884.4
3379.5	2138.1	3775.2	1771.4	4392.3	737.4	466.5	823.7	386.5	958.3	57.0	70.5	423.7	684.3	918.7
5530.1	3498.7	6177.6	2898.7	7187.4	2150.6	1360.6	2402.4	1127.3	2795.1	1298.2	462.0	1550.0	1610.1	2818.2
78.2	49.5	87.4	41.0	101.6	78.2	49.5	87.4	41.0	101.6	0.6	10.8	8.1	0.7	3.7
156.4	99.0	174.7	82.0	203.3	78.2	49.5	87.4	41.0	101.6	*0.4*	9.4	6.9	0.5	*2.5*
840.7	531.9	939.1	440.7	1092.6	684.3	432.9	764.4	358.7	889.4	*3.7*	28.7	22.1	*3.7*	*22.1*
1075.3	680.3	1201.2	563.6	1397.6	234.6	148.4	262.1	123.0	304.9	*1.3*	11.1	7.8	*1.3*	*7.6*
1759.6	1113.2	1965.6	922.3	2286.9	684.3	432.9	764.4	358.7	889.4	*3.7*	12.5	*7.4*	*7.4*	*22.1*
1916.0	1212.2	2140.3	1004.3	2490.2	156.4	99.0	174.7	82.0	203.3	*0.8*	7.9	2.4	6.0	*5.0*

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ ... Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist [µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht: Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
77.8	48.4	59.2	36.4	97.8	2.7	1.7	2.0	1.3	3.4	2.7	1.7	2.0	1.3	3.4	29	*99.5*	97.8	67.8	88.7	96.2
155.6	96.6	171.4	74.4	198.2	5.4	3.3	5.9	2.6	6.8	8.0	5.0	8.0	3.8	10.2		*99.5*	97.6	98.1	90.8	*97.5*
602.8	373.7	670.5	304.0	768.2	20.8	12.9	23.1	10.5	26.5	28.8	17.9	31.1	14.3	36.7		*99.5*	97.5	*99.0*	95.7	*97.5*
233.4	144.6	228.1	118.9	287.5	8.0	5.0	7.9	4.1	9.9	36.9	22.9	38.9	18.4	46.6		*99.5*	97.5	87.0	96.7	94.3
680.6	411.6	749.0	355.0	867.3	23.5	14.2	25.8	12.2	29.9	60.3	37.1	64.8	30.6	76.5		*99.5*	95.1	98.0	*99.0*	*97.5*
155.6	96.1	173.0	81.1	198.2	5.4	3.3	6.0	2.8	6.8	65.7	40.4	70.7	33.4	83.4		*99.5*	97.1	*99.0*	*99.0*	*97.5*
244.5	150.7	271.9	100.6	289.6	3.6	2.2	4.1	1.5	4.3	3.6	2.2	4.1	1.5	4.3	5	*99.5*	96.9	*99.0*	78.1	90.7
488.9	301.5	543.8	136.8	521.1	7.3	4.5	8.1	2.0	7.8	10.9	6.7	12.2	3.5	12.1	67	*99.5*	96.9	*99.0*	53.1	81.6
1894.6	1160.1	1632.7	-347.8	591.3	28.3	17.3	24.4	0.0	8.8	39.2	24.1	36.5	3.5	20.9		*99.5*	96.3	76.7	-34.8	23.9
680.3	396.0	400.0	-297.8	39.6	10.2	5.9	6.0	0.0	0.6	49.4	30.0	42.5	3.5	21.5		92.3	84.9	48.6	-77.0	4.1
852.4	898.6	852.4	-482.8	-23.1	12.7	13.4	12.7	0.0	0.0	62.1	43.4	55.2	3.5	21.5		39.6	66.0	35.5	-42.8	-0.8
77.6	38.6	79.2	40.3	97.9	2.7	1.3	2.7	1.4	3.4	2.7	1.3	2.7	1.4	3.4	TFIIb	99.2	78.1	90.7	98.4	96.4
77.8	40.1	80.5	40.5	99.1	2.7	1.4	2.8	1.4	3.4	5.4	2.7	5.5	2.8	6.8	29	*99.5*	81.0	92.1	98.8	*97.5*
680.6	404.3	742.4	355.0	867.3	23.5	13.9	25.6	12.2	29.9	28.8	16.7	31.1	15.0	36.7		*99.5*	93.4	97.1	*99.0*	*97.5*
233.4	137.3	254.3	121.7	297.4	8.0	4.7	8.8	4.2	10.3	36.9	21.4	39.9	19.2	47.0		*99.5*	92.5	97.0	*99.0*	*97.5*
680.6	420.4	757.1	351.3	867.3	23.5	14.5	26.1	12.1	29.9	60.3	35.9	66.0	31.3	76.9		*99.5*	97.1	*99.0*	98.0	*97.5*
155.6	91.1	172.4	75.9	198.2	5.4	3.1	5.9	2.6	6.8	65.7	39.0	71.9	34.0	83.7		*99.5*	92.0	98.7	92.6	*97.5*

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze
SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{Av15}$ = SM-Fracht$_{Av15}$/SM_{J_x}.

SM-JF = SM-Fracht/SM_{J_x}.

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

SM-Jahresfrachten$_{Av15}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{Av100}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{Av200}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
1.6	2.0	1.8	1.7	2.1	1.1	1.3	1.2	1.1	1.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5.7	7.2	6.3	6.0	7.4	4.1	5.2	4.6	4.3	5.3	0.9	1.1	1.0	0.9	1.1	0.6	0.8	0.7	0.6	0.8	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4
7.3	9.2	8.1	7.6	9.4	1.6	2.0	1.8	1.7	2.1	1.1	1.4	1.2	1.1	1.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
11.9	15.0	13.3	12.5	15.4	4.6	5.8	5.2	4.8	6.0	1.8	2.3	2.0	1.9	2.3	0.7	0.9	0.8	0.7	0.9	0.9	1.1	1.0	0.9	1.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
12.9	16.4	14.5	13.6	16.8	1.1	1.3	1.2	1.1	1.4	1.9	2.5	2.2	2.0	2.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.0	1.2	1.1	1.0	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1.7	2.1	1.9	1.7	2.2	1.7	2.1	1.9	1.7	2.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
5.0	6.3	5.6	5.2	6.5	3.3	4.2	3.7	3.5	4.3	0.7	0.9	0.8	0.8	1.0	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
17.8	22.6	19.9	18.7	23.2	12.9	16.3	14.4	13.5	16.7	2.7	3.4	3.0	2.8	3.5	1.9	2.4	2.2	2.0	2.5	1.3	1.7	1.5	1.4	1.7	1.0	1.2	1.1	1.0	1.3
22.8	28.9	25.5	23.9	29.7	5.0	6.3	5.6	5.2	6.5	3.4	4.3	3.8	3.6	4.4	0.7	0.9	0.8	0.8	1.0	1.7	2.2	1.9	1.8	2.2	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5
37.3	47.3	41.7	39.2	48.5	14.5	18.4	16.2	15.2	18.9	5.6	7.1	6.3	5.9	7.3	2.2	2.8	2.4	2.3	2.8	2.8	3.5	3.1	2.9	3.6	1.1	1.4	1.2	1.1	1.4
0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
1.1	1.3	1.2	1.1	1.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
5.7	7.2	6.3	6.0	7.4	4.6	5.8	5.2	4.8	6.0	0.9	1.1	1.0	0.9	1.1	0.7	0.9	0.8	0.7	0.9	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
7.3	9.2	8.1	7.6	9.4	1.6	2.0	1.8	1.7	2.1	1.1	1.4	1.2	1.1	1.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
11.9	15.0	13.3	12.5	15.4	4.6	5.8	5.2	4.8	6.0	1.8	2.3	2.0	1.9	2.3	0.7	0.9	0.8	0.7	0.9	0.9	1.1	1.0	0.9	1.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
12.9	16.4	14.5	13.6	16.8	1.1	1.3	1.2	1.1	1.4	1.9	2.5	2.2	2.0	2.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.0	1.2	1.1	1.0	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

Simulierte Betriebsjahre

J_x = SM-Fracht$_{Av15}$/SM_{J_x}.

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
S	37.3	47.3	41.7	39.2	48.5	5.6	7.1	6.3	5.9	7.3	2.8	3.5	3.1	2.9	3.6
TFIb	12.9	16.4	14.5	13.6	16.8	1.9	2.5	2.2	2.0	2.5	1.0	1.2	1.1	1.0	1.3
TFIIb	12.9	16.4	14.5	13.6	16.8	1.9	2.5	2.2	2.0	2.5	1.0	1.2	1.1	1.0	1.3

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_x [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert											Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
2.00	0.57	0.8	TF Ib 50	*0.5*	1.3	33.5	5.5	4.6	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.02	0.32	0.11	0.04
6.00	1.70	2.5	TF Ib 52	*0.5*	1.4	2	4.5	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.02	0.02	0.09	0.02
21.50	6.10	9.0	TF Ib 53	*0.5*	1.5	1	2.1	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.04	0.02
27.50	7.80	11.6	TF Ib 55	*0.5*	1.5	13.5	1.6	6.9	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.13	0.03	0.06
45.00	12.76	18.9	TF Ib 56	*0.5*	2.9	2.1	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.05	0.02	0.01	0.02
49.00	13.90	20.6	TF Ib 58	*0.5*	1.7	1	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02
2.00	1.78	2.6	S 50	*0.5*	1.8	1	10.7	11.3	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.22	0.09
6.00	5.35	7.9	S 52	*0.5*	1.8	1	22.9	22.3	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.47	0.18
21.50	19.17	28.4	S 53	*0.5*	2.2	24.2	65.8	92.1	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.04	0.23	1.35	0.76
27.50	24.51	36.3	S 55	7.2	8.9	53.5	86.4	116	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.08	0.15	0.51	1.77	0.96
45.00	40.11	59.4	S 56	56.2	20	67.1	69.7	122	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.60	0.34	0.65	1.43	1.01
2.00	0.57	0.8	TF IIb 46	0.7	12.9	9.7	0.8	4.4	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.22	0.09	0.02	0.04
4.00	1.13	1.7	TF IIb 47	*0.5*	11.2	8.2	0.6	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.19	0.08	0.01	0.02
21.50	6.10	9.0	TF IIb 49	*0.5*	3.9	3	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.07	0.03	0.01	0.02
27.50	7.80	11.6	TF IIb 51	*0.5*	4.4	3.1	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.07	0.03	0.01	0.02
45.00	12.76	18.9	TF IIb 52	*0.5*	1.7	1	1	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02
49.00	13.90	20.6	TF IIb 54	*0.5*	4.7	1.4	3.6	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.08	0.01	0.07	0.02
			Zulauf 6 (10	93.1	58.9	104	48.8	121										

Analyse 5

27/02/2013 22.02. - 26.02. **Versuchsfortführung Versuchsreihe 4**

Probe	ø	Nummern	
BA	D2	1,3,5,6	**BA - mit Säule d = 22 mm**
TFIb	D1	59,61,62	
TFIIb	D1	55,57,58	

Zulauf 6

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Pb,Zn,Cu/Ni,Cr [µg/l] TFIb = TFIc (wurde falsch protokolliert) $J_x = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichn	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
7	100/50	TF Ib 59	*0.5*	1.8	1	1.2	*3*	1.50	50.50	0.63	21.2	14.3	2.1	1.1
6.75	100/50	TF Ib 61	*0.5*	1.3	1	2	*3*	4.00	54.50	1.62	22.8	15.4	2.3	1.2
6.75	100/50	TF Ib 62	*0.5*	1.4	1	1.4	*3*	2.00	56.50	0.81	23.6	16.0	2.4	1.2
2	100/50	BA 1	2.2	10.5	20.7	4	7.4	2.50	2.50	0.30	0.3	0.1	0.0	0.0
6.25	100/50	BA 3	0.5	2.5	3.2	0.7	*3*	20.50	23.00	2.46	2.8	0.7	0.1	0.1
6.25	100/50	BA 5	*0.5*	6.1	5.5	*0.5*	*3*	4.00	27.00	1.50	4.3	1.1	0.2	0.1
6.25	100/50	BA 6	0.5	5.7	5.1	*0.5*	*3*	2.00	29.00	0.75	5.0	1.3	0.2	0.1
7	100/50	TF IIb 55	*0.5*	2.6	1.5	7.7	*3*	1.50	50.50	0.63	21.2	14.3	2.1	1.1
6.75	100/50	TF IIb 57	*0.5*	2	1	0.7	*3*	4.00	54.50	1.62	22.8	15.4	2.3	1.2
6.75	100/50	TF IIb 58	1.1	10.2	7.2	5.3	7	2.00	56.50	0.81	23.6	16.0	2.4	1.2
		Zulauf 6 (100	93.1	58.9	104	48.8	121							

selber Zulauf wie Analyse 4

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_x ... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ nur bei Ce > Bestimmungsgrenze SM-Frachtablauf = Ce*V

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
1974.7	1249.3	2205.8	1035.0	2566.4	58.7	37.1	65.5	30.7	76.2	*0.3*	1.1	*0.6*	0.8	*1.9*
2125.5	1344.7	2374.3	1114.1	2762.4	150.8	95.4	168.5	79.1	196.0	*0.8*	2.1	*1.6*	3.2	*4.9*
2200.9	1392.4	2458.6	1153.6	2860.4	75.4	47.7	84.2	39.5	98.0	*0.4*	1.1	*0.8*	1.1	*2.4*
27.9	17.7	31.2	14.6	36.3	27.9	17.7	31.2	14.6	36.3	0.7	3.2	6.2	1.2	2.2
257.0	162.6	287.0	134.7	334.0	229.0	144.9	255.8	120.0	297.7	1.2	6.2	7.9	1.7	*7.4*
396.6	250.9	443.0	207.9	515.5	139.7	88.4	156.0	73.2	181.5	*0.8*	9.2	8.3	*0.8*	*4.5*
466.4	295.1	521.0	244.5	606.2	69.8	44.2	78.0	36.6	90.8	0.4	4.3	3.8	*0.4*	*2.3*
1974.7	1249.3	2205.8	1035.0	2566.4	58.7	37.1	65.5	30.7	76.2	*0.3*	1.6	0.9	4.9	*1.9*
2125.5	1344.7	2374.3	1114.1	2762.4	150.8	95.4	168.5	79.1	196.0	*0.8*	3.2	1.6	1.1	*4.9*
2200.9	1392.4	2458.6	1153.6	2860.4	75.4	47.7	84.2	39.5	98.0	0.9	8.3	5.8	4.3	5.7

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die ablöuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf}$ * 100)

Rückgehaltene Schwermetallfracht C*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
58.3	36.0	64.9	30.0	74.3	2.0	1.2	2.2	1.0	2.6	67.7	41.6	73.0	34.5	85.9	29	*99.5*	96.9	*99.0*	97.5	*97.5*
150.0	93.3	166.9	75.8	191.2	5.2	3.2	5.8	2.6	6.6	72.9	44.8	78.7	37.1	92.5		*99.5*	97.8	*99.0*	95.9	*97.5*
75.0	46.6	83.4	38.4	95.6	2.6	1.6	2.9	1.3	3.3	75.5	46.4	81.6	38.4	95.8		*99.5*	97.6	*99.0*	97.1	*97.5*
27.3	14.5	25.0	13.4	34.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	BA	97.6	82.2	80.1	91.8	93.9
227.8	138.7	248.0	118.3	290.3	0.8	0.5	0.8	0.4	1.0	0.9	0.5	0.9	0.5	1.1	292	99.5	95.8	96.9	98.6	*97.5*
138.9	79.2	147.8	72.5	177.0	0.5	0.3	0.5	0.2	0.6	1.3	0.8	1.4	0.7	1.7		*99.5*	89.6	94.7	*99.0*	*97.5*
69.5	39.9	74.2	36.2	88.5	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3	1.6	0.9	1.7	0.8	2.0		99.5	90.3	95.1	*99.0*	*97.5*
58.3	35.5	64.6	25.9	74.3	2.0	1.2	2.2	0.9	2.6	67.7	40.2	74.1	34.9	86.3	TFIIb	*99.5*	95.6	98.6	84.2	*97.5*
150.0	92.2	166.9	77.9	191.2	5.2	3.2	5.8	2.7	6.6	72.9	43.4	79.9	37.5	92.9	29	*99.5*	96.8	99.0	98.6	*97.5*
74.5	39.4	78.4	35.2	92.3	2.6	1.4	2.7	1.2	3.2	75.5	44.8	82.6	38.8	96.0		98.8	82.7	93.1	89.1	94.2

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze
SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges} = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_t$. SM-JF = SM-Fracht/$SM_t$.

SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
13.3	16.9	14.9	14.0	17.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	2.0	2.5	2.2	2.1	2.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	1.3	1.1	1.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14.4	18.2	16.0	15.0	18.7	1.0	1.3	1.1	1.1	1.3	2.2	2.7	2.4	2.3	2.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.1	1.4	1.2	1.1	1.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
14.9	18.8	16.6	15.6	19.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7	2.2	2.8	2.5	2.3	2.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1	1.4	1.2	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6	0.8	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
1.0	1.3	1.1	1.0	1.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.2	1.5	1.3	1.2	1.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13.3	16.9	14.9	14.0	17.3	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	2.0	2.5	2.2	2.1	2.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	1.3	1.1	1.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14.4	18.2	16.0	15.0	18.7	1.0	1.3	1.1	1.1	1.3	2.2	2.7	2.4	2.3	2.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1.1	1.4	1.2	1.1	1.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
14.9	18.8	16.6	15.6	19.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7	2.2	2.8	2.5	2.3	2.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1	1.4	1.2	1.2	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_x = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_x$.

	Is [a] (Av = 15)					Is [a] (Av = 200)					Is [a] (Av = 100)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
BA	1.2	1.5	1.3	1.2	1.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
TFIb	14.9	18.8	16.6	15.6	19.3	2.2	2.8	2.5	2.3	2.9	1.1	1.4	1.2	1.2	1.4
TFIIb	14.9	18.8	16.6	15.6	19.3	2.2	2.8	2.5	2.3	2.9	1.1	1.4	1.2	1.2	1.4

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_x [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert										Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
50.50	14.32	21.2	TF Ib 59	*0.5*	1.8	1	1.2	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02
54.50	15.42	22.8	TF Ib 61	*0.5*	1.3	1	2	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02
56.50	15.96	23.6	TF Ib 62	*0.5*	1.4	1	1.4	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02
2.50	0.08	0.3	BA 1	2.2	10.5	20.7	4	7.4	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.02	0.18	0.20	0.08	0.06
23.00	0.69	2.8	BA 3	0.5	2.5	3.2	0.7	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02
27.00	1.07	4.3	BA 5	*0.5*	6.1	5.5	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.10	0.05	0.01	0.02
29.00	1.26	5.0	BA 6	0.5	5.7	5.1	*0.5*	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.10	0.05	0.01	0.02
50.50	14.32	21.2	TF IIb 55	*0.5*	2.6	1.5	7.7	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.04	0.01	0.16	0.02
54.50	15.42	22.8	TF IIb 57	*0.5*	2	1	0.7	*3*	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02
56.50	15.96	23.6	TF IIb 58	1.1	10.2	7.2	5.3	7	0.10	0.76	0.20	0.37	0.50	0.01	0.17	0.07	0.11	0.06
			Zulauf 6 (10	93.1	58.9	104	48.8	121										

Analyse 6

09/04/2013 04.04. - 09.04. **Neue Säulen mit d = 32mm, Versuchsreihe 5**

Probe	ø	Nummern
TFIc	D3	65,66,68,69,70,71
TFIIb	D3	60,61,62,64,66,67,70
BA	D3	16,17,19,20,21,22,25
S	D3	60,61,62
Zulauf		8

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_x = V_{ges}/Q_j$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichn	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
27	400/100/50	TF 1C 65	*0.5*	1	*3*	3.00	6.00	4.86	9.72	1.2	0.2	0.1
26	400/100/50	TF 1C 66	*0.5*	1	*3*	17.50	23.50	28.35	38.07	4.5	0.7	0.3
26	400/100/50	TF 1C 68	*0.5*	1	*3*	6.00	29.50	9.36	47.43	5.6	0.8	0.4
35	400/100/50	TF 1C 69	*0.5*	1	*3*	2.75	32.25	5.78	53.07	6.3	0.9	0.5
35	400/100/50	TF 1C 70	*0.5*	1	*3*	2.33	34.58	4.89	57.96	6.9	1.0	0.5
32.5	400/100/50	TF 1C 71	*0.5*	1	*3*	17.08	51.66	35.87	93.84	11.1	1.7	0.8
32.5	400/100/50	TF 1C 74	*0.5*	1	*3*	6.91	58.57	13.47	107.31	12.7	1.9	1.0
39.5	400/100/50	TF IIB 60	*0.5*	1.4	*3*	3.00	3.00	7.11	7.11	0.8	0.1	0.1
39	400/100/50	TF IIB 61	*0.5*	1.3	*3*	3.00	6.00	7.02	14.04	1.7	0.2	0.1
37	400/100/50	TF IIB 62	*0.5*	1.5	8.9	17.50	23.50	40.95	54.99	6.5	1.0	0.5

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_x... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_j ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

37	400/100/50	TF IIB 64	*0.5*	1.7	12.2	6.00	29.50	13.32	68.31	8.1	1.2	0.6
35	400/100/50	TF IIB 66	*0.5*	1	5	5.08	34.58	10.67	79.01	9.4	1.4	0.7
32.5	400/100/50	TF IIB 67	*0.5*	1	13	17.08	51.66	35.87	114.88	13.6	2.0	1.0
32.5	400/100/50	TF IIB 70	*0.5*	1	18	6.91	58.57	13.47	128.36	15.2	2.3	1.1
12.5	400/100/50	BA 16	*0.5*	1	*3*	3.00	6.00	2.25	4.50	0.5	0.1	0.0
12.5	400/100/50	BA 17	*0.5*	1	3.9	17.50	23.50	13.13	17.63	2.1	0.3	0.2
12.5	400/100/50	BA 19	*0.5*	1	3.2	6.00	29.50	4.50	22.13	2.6	0.4	0.2
7.75	400/100/50	BA 20	*0.5*	1.3	4.7	2.75	32.25	1.28	23.48	2.8	0.4	0.2
7.75	400/100/50	BA 21	*0.5*	1	5.1	2.33	34.58	1.08	24.56	2.9	0.4	0.2
7.25	400/100/50	BA 22	*0.5*	1	*3*	17.08	51.66	7.94	32.50	3.8	0.6	0.3
7.25	400/100/50	BA 25	*0.5*	1	*3*	6.91	58.57	3.01	35.51	4.2	0.6	0.3
59	400/100/50	S 60	0.9	1.1	66.2	2.50	2.50	8.85	8.85	1.0	0.2	0.1
59	400/100/50	S 61	1.1	3.6	187	2.33	4.83	8.25	17.10	2.0	0.3	0.2
55	400/100/50	S 62	1	5	220	2.25	7.08	7.43	24.52	2.9	0.4	0.2
		Zulauf 8 (400	63.4	135	482							

Schwermetall-Frachten

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM,Zulauf} * V_{ges}$ | SM-Fracht = $C_{SM,Zulauf} * V$ | SM-Frachtablauf = Ce*V

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]			SM-Fracht [µg]			SM-Frachtablauf [µg]			
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	
616.2	1312.2	4685.0	308.1	656.1	2342.5	*2.4*	*4.9*	*14.6*	
2413.6	5139.5	18349.7	1797.4	3827.3	13664.7	*14.2*	*28.4*	*85.1*	
3007.1	6403.1	22861.3	593.4	1263.6	4511.5	*4.7*	*9.4*	*28.1*	
3364.6	7164.5	25579.7	366.1	779.6	2783.6	*2.9*	*5.8*	*17.3*	
3674.9	7825.0	27938.2	310.2	660.6	2358.4	*2.4*	*4.9*	*14.7*	
5949.3	12668.0	45229.6	2274.4	4843.0	17291.4	*17.9*	*35.9*	*107.6*	
6803.6	14487.1	51724.3	854.3	1819.1	6494.7	*6.7*	*13.5*	*40.4*	
450.8	959.9	3427.0	450.8	959.9	3427.0	*3.6*	10.0	*21.3*	
890.1	1895.4	6767.3	445.1	947.7	3383.6	*3.5*	9.1	*21.1*	
3486.4	7423.7	26505.2	2596.2	5528.3	19737.9	*20.5*	61.4	364.5	
4330.9	9221.9	32925.4	844.5	1798.2	6420.2	*6.7*	22.6	162.5	
5009.1	10666.1	38081.9	676.4	1440.2	5142.0	*5.3*	*10.7*	53.3	
7283.5	15509.1	55373.3	2274.4	4843.0	17291.4	*17.9*	*35.9*	466.4	
8137.8	17328.2	61868.0	854.3	1819.1	6494.7	*6.7*	*13.5*	242.5	
285.3	607.5	2169.0	142.7	303.8	1084.5	*1.1*	*2.3*	*6.8*	
1117.4	2379.4	8495.3	832.1	1771.9	6326.3	*6.6*	*13.1*	51.2	
1402.7	2986.9	10664.3	285.3	607.5	2169.0	*2.3*	*4.5*	14.4	
1488.3	3169.1	11315.0	81.1	172.6	616.4	*0.6*	1.7	6.0	
1557.0	3315.4	11837.2	68.7	146.3	522.2	*0.5*	1.1	5.5	
2060.6	4387.8	15666.0	503.6	1072.4	3828.8	*4.0*	*7.9*	*23.8*	
2251.2	4793.6	17114.8	190.6	405.8	1448.8	*1.5*	*3.0*	*9.0*	
561.1	1194.8	4265.7	561.1	1194.8	4265.7	8.0	9.7	585.9	
1084.0	2308.3	8241.3	522.9	1113.5	3975.6	9.1	29.7	1542.4	
1554.8	3310.6	11820.2	470.7	1002.4	3578.9	7.4	37.1	1633.5	

$C_{SM,Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
SM-Fracht$_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM,Ablauf}/C_{SM,Zulauf} * 100$)

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V			Beladung [µg/g]			Beladung gesamt [µg/g]			Masse [g]	SM-Rückhalt [%]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	TFIc	Pb	Cu	Zn
305.7	651.2	2327.9	2.5	5.4	19.4	2.5	5.4	19.4	120.2	*99.2*	*99.3*	*99.4*
1783.2	3798.9	13579.7	14.8	31.6	113.0	17.4	37.0	132.3		*99.2*	*99.3*	*99.4*
588.7	1254.2	4483.4	4.9	10.4	37.3	22.3	47.5	169.6		*99.2*	*99.3*	*99.4*
363.2	773.9	2766.2	3.0	6.4	23.0	25.3	53.9	192.7		*99.2*	*99.3*	*99.4*
307.8	655.7	2343.7	2.6	5.5	19.5	27.9	59.4	212.2		*99.2*	*99.3*	*99.4*
2256.5	4807.2	17183.8	18.8	40.0	143.0	46.6	99.3	355.1		*99.2*	*99.3*	*99.4*
847.5	1805.6	6454.3	7.1	15.0	53.7	53.7	114.4	408.8		*99.2*	*99.3*	*99.4*
447.2	949.9	3405.7	3.0	6.5	23.2	3.0	6.5	23.2	TFIIb	*99.2*	99.0	*99.4*
441.6	938.6	3362.6	3.0	6.4	22.9	6.0	12.8	46.0	147	*99.2*	99.0	*99.4*
2575.8	5466.8	19373.4	17.5	37.2	131.8	23.6	50.0	177.8		*99.2*	98.9	98.2
837.8	1775.6	6257.7	5.7	12.1	42.6	29.3	62.1	220.4		*99.2*	98.7	97.5
671.0	1429.5	5088.6	4.6	9.7	34.6	33.8	71.8	255.0		*99.2*	*99.3*	99.0
2256.5	4807.2	16825.0	15.4	32.7	114.5	49.2	104.5	369.5		*99.2*	*99.3*	97.3
847.5	1805.6	6252.2	5.8	12.3	42.5	54.9	116.8	412.0		*99.2*	*99.3*	96.3

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

141.5	301.5	1077.8	0.5	1.0	3.7	0.5	1.0	3.7	BA	*99.2*	*99.3*	*99.4*
825.6	1758.8	6275.1	2.8	6.0	21.5	3.3	7.1	25.2	292	*99.2*	*99.3*	99.2
283.1	603.0	2154.6	1.0	2.1	7.4	4.3	9.1	32.6		*99.2*	*99.3*	99.3
80.4	171.0	610.3	0.3	0.6	2.1	4.6	9.7	34.6		*99.2*	99.0	99.0
68.1	145.2	516.7	0.2	0.5	1.8	4.8	10.2	36.4		*99.2*	*99.3*	98.9
499.7	1064.4	3805.0	1.7	3.6	13.0	6.5	13.8	49.5		*99.2*	*99.3*	*99.4*
189.1	402.8	1439.8	0.6	1.4	4.9	7.1	15.2	54.4		*99.2*	*99.3*	*99.4*
553.1	1185.0	3679.8	2.2	4.8	14.8	2.2	4.8	14.8	S	98.6	99.2	86.3
513.9	1083.8	2433.2	2.1	4.4	9.8	4.3	9.1	24.6	248.4	98.3	97.3	61.2
463.3	965.3	1945.4	1.9	3.9	7.8	6.2	13.0	32.4		98.4	96.3	54.4

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges}$ = SM-Fracht$_{ges}$/SM_J. SM-JF = SM-Fracht/SM_J.

SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
1.5	1.6	1.4	0.7	0.8	0.7	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5.7	6.1	5.4	4.3	4.5	4.0	0.9	0.9	0.8	0.6	0.7	0.6	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3
7.1	7.6	6.8	1.4	1.5	1.3	1.1	1.1	1.0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.6	0.5	0.1	0.1	0.1
8.0	8.5	7.6	0.9	0.9	0.8	1.2	1.3	1.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1
8.7	9.3	8.3	0.7	0.8	0.7	1.3	1.4	1.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.7	0.6	0.1	0.1	0.1
14.1	15.0	13.4	5.4	5.7	5.1	2.1	2.3	2.0	0.8	0.9	0.8	1.1	1.1	1.0	0.4	0.4	0.4
16.1	17.2	15.3	2.0	2.2	1.9	2.4	2.6	2.3	0.3	0.3	0.3	1.2	1.3	1.1	0.2	0.2	0.1
1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2.1	2.2	2.0	1.1	1.1	1.0	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
8.3	8.8	7.8	6.1	6.5	5.8	1.2	1.3	1.2	0.9	1.0	0.9	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4
10.3	10.9	9.7	2.0	2.1	1.9	1.5	1.6	1.5	0.3	0.3	0.3	0.8	0.8	0.7	0.2	0.2	0.1
11.9	12.6	11.3	1.6	1.7	1.5	1.8	1.9	1.7	0.2	0.3	0.2	0.9	0.9	0.8	0.1	0.1	0.1
17.3	18.4	16.4	5.4	5.7	5.1	2.6	2.8	2.5	0.8	0.9	0.8	1.3	1.4	1.2	0.4	0.4	0.4
19.3	20.5	18.3	2.0	2.2	1.9	2.9	3.1	2.7	0.3	0.3	0.3	1.4	1.5	1.4	0.2	0.2	0.1
0.7	0.7	0.6	0.3	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2.6	2.8	2.5	2.0	2.1	1.9	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1
3.3	3.5	3.2	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0
3.5	3.8	3.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
3.7	3.9	3.5	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
4.9	5.2	4.6	1.2	1.3	1.1	0.7	0.8	0.7	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
5.3	5.7	5.1	0.5	0.5	0.4	0.8	0.9	0.8	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0
1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2.6	2.7	2.4	1.2	1.3	1.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
3.7	3.9	3.5	1.1	1.2	1.1	0.6	0.6	0.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
Av = 15			Av = 15			Av = 100			Av = 100			Av = 200			Av = 200		

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM_J.

	Js [a] (Av = 15)			Js [a] (Av = 100)			Js [a] (Av = 200)		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
TFIc	16.1	17.2	15.3	2.4	2.6	2.3	1.2	1.3	1.1
TFIIb	19.3	20.5	18.3	2.9	3.1	2.7	1.4	1.5	1.4
BA	5.3	5.7	5.1	0.8	0.9	0.8	0.4	0.4	0.4
S	3.7	3.9	3.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_x [a] Av15	Vges [L]					GrW ... Grenzwert			Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
6.00	1.2	9.7	TF 1C 65	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	4.5	38.1	TF 1C 66	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
29.50	5.6	47.4	TF 1C 68	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
32.25	6.3	53.1	TF 1C 69	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
34.58	6.9	58.0	TF 1C 70	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	11.1	93.8	TF 1C 71	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
58.57	12.7	107.3	TF 1C 74	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
3.00	0.8	7.1	TF IIB 60	0.5	1.4	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
6.00	1.7	14.0	TF IIB 61	0.5	1.3	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	6.5	55.0	TF IIB 62	0.5	1.5	8.9	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.02
29.50	8.1	68.3	TF IIB 64	0.5	1.7	12.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.03
34.58	9.4	79.0	TF IIB 66	0.5	1.0	5.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	13.6	114.9	TF IIB 67	0.5	1.0	13.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.03
58.57	15.2	128.4	TF IIB 70	0.5	1.0	18.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.04
6.00	0.5	4.5	BA 16	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	2.1	17.6	BA 17	0.5	1.0	3.9	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
29.50	2.6	22.1	BA 19	0.5	1.0	3.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
32.25	2.8	23.5	BA 20	0.5	1.3	4.7	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
34.58	2.9	24.6	BA 21	0.5	1.0	5.1	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	3.8	32.5	BA 22	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
58.57	4.2	35.5	BA 25	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
2.50	1.0	8.9	S 60	0.9	1.1	66.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.14
4.83	2.0	17.1	S 61	1.1	3.6	187.0	0.14	0.20	0.50	0.02	0.03	0.39
7.08	2.9	24.5	S 62	1.0	5.0	220.0	0.14	0.20	0.50	0.02	0.04	0.46
			Zulauf 8 (40	63.4	135	482						

Analyse 7

17/04/2013 10.04. - 16.04. **Versuchsfortsetzung VR 5**

Probe	ø	Nummern
TFIc	D3	75,77,78,80,81,83,84,85,87
TFIIb	D3	71,73,74,76,77,79,80,81,82,84
BA	D3	26,28,29,31,32,34,35,36,37,39
S	D3	63,64,65,66,68
Zulauf		

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_x = V_{ges}/Q_i$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichn	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
32.5	400/100/50	TF 1C 75	0.5	1	3	17.00	75.57	33.15	140.46	16.6	2.5	1.2
32.5	400/100/50	TF 1C 77	0.5	1	3	7.00	82.57	13.65	154.11	18.2	2.7	1.4
32	400/100/50	TF 1C 78	0.5	1	3	17.00	99.57	33.15	187.26	22.2	3.3	1.7
32	400/100/50	TF 1C 80	0.5	1	3	7.00	99.57	13.44	208.31	24.7	3.7	1.9
33	400/100/50	TF 1C 81	0.5	1	3	17.00	123.57	32.64	233.34	27.6	4.1	2.1
28	400/100/50	TF 1C 83	0.5	1	3	9.08	132.66	16.16	250.01	29.6	4.4	2.2
28	400/100/50	TF 1C 84	0.5	1	3	3.00	135.66	5.04	255.05	30.2	4.5	2.3
24	400/100/50	TF 1C 85	1	1	4.1	16.00	151.66	26.88	281.93	33.4	5.0	2.5
24	400/100/50	TF 1C 87	2.8	5.1	92.4	7.00	158.66	10.08	292.01	34.6	5.2	2.6
32.5	400/100/50	TF 2B 71	0.5	1.9	40.5	17.00	75.57	33.15	161.51	19.1	2.9	1.4
32.5	400/100/50	TF 2B 73	0.5	2.6	53.4	7.00	82.57	13.65	175.16	20.7	3.1	1.6
32	400/100/50	TF 2B 74	0.5	1.5	29.2	17.00	99.57	33.15	208.31	24.7	3.7	1.9
32	400/100/50	TF 2B 76	0.5	1.7	31.4	7.00	106.57	13.44	221.75	26.3	3.9	2.0
28.5	400/100/50	TF 2B 77	3.5	10.5	61.6	17.00	123.57	32.64	254.39	30.1	4.5	2.3
33	400/100/50	TF 2B 79	2	5.2	42.7	6.00	129.57	11.88	266.27	31.5	4.7	2.4
25	400/100/50	TF 2B 80	0.5	1.1	16.6	3.08	132.66	4.63	271.22	32.1	4.8	2.4
25	400/100/50	TF 2B 81	0.5	1.3	19.4	3.00	135.66	4.50	275.72	32.7	4.9	2.4
19	400/100/50	TF 2B 82	1.6	4.8	156	16.00	151.66	24.00	299.72	35.5	5.3	2.7
19	400/100/50	TF 2B 84	1.2	16.3	409	7.00	158.66	7.98	307.70	36.4	5.5	2.7

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges}... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_x... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_i ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_A [a] Av15	Vges [L]		GrW ... Grenzwert						Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
6.00	1.2	9.7	TF 1C 65	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	4.5	38.1	TF 1C 66	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
29.50	5.6	47.4	TF 1C 68	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
32.25	6.3	53.1	TF 1C 69	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
34.58	6.9	58.0	TF 1C 70	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	11.1	93.8	TF 1C 71	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
58.57	12.7	107.3	TF 1C 74	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
3.00	0.8	7.1	TF IIB 60	0.5	1.4	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
6.00	1.7	14.0	TF IIB 61	0.5	1.3	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	6.5	55.0	TF IIB 62	0.5	1.5	8.9	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.02
29.50	8.1	68.3	TF IIB 64	0.5	1.7	12.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.03
34.58	9.4	79.0	TF IIB 66	0.5	1.0	5.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	13.6	114.9	TF IIB 67	0.5	1.0	13.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.03
58.57	15.2	128.4	TF IIB 70	0.5	1.0	18.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.04
6.00	0.5	4.5	BA 16	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
23.50	2.1	17.6	BA 17	0.5	1.0	3.9	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
29.50	2.6	22.1	BA 19	0.5	1.0	3.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
32.25	2.8	23.5	BA 20	0.5	1.3	4.7	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
34.58	2.9	24.6	BA 21	0.5	1.0	5.1	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
51.66	3.8	32.5	BA 22	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
58.57	4.2	35.5	BA 25	0.5	1.0	3.0	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
2.50	1.0	8.9	S 60	0.9	1.1	66.2	0.14	0.20	0.50	0.01	0.01	0.14
4.83	2.0	17.1	S 61	1.1	3.6	187.0	0.14	0.20	0.50	0.02	0.03	0.39
7.08	2.9	24.5	S 62	1.0	5.0	220.0	0.14	0.20	0.50	0.02	0.04	0.46
			Zulauf 8 (40	63.4	135	482						

Analyse 7

17/04/2013 10.04. - 16.04. **Versuchsfortsetzung VR 5**

Probe	#	Nummern
TFIc	D3	75,77,78,80,81,83,84,85,87
TFIIb	D3	71,73,74,76,77,79,80,81,82,84
BA	D3	26,28,29,31,32,34,35,36,37,39
S	D3	63,64,65,66,68
Zulauf		

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_A = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichnu	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_A [a] Av15	J_A [a] Av100	J_A [a] Av200
32.5	400/100/50	TF 1C 75	*0.5*	1	*3*	17.00	75.57	33.15	140.46	16.6	2.5	1.2
32.5	400/100/50	TF 1C 77	0.5	1	*3*	7.00	82.57	13.65	154.11	18.2	2.7	1.4
32	400/100/50	TF 1C 78	*0.5*	1	*3*	17.00	99.57	33.15	187.26	22.2	3.3	1.7
32	400/100/50	TF 1C 80	*0.5*	1	*3*	7.00	99.57	13.44	208.31	24.7	3.7	1.9
33	400/100/50	TF 1C 81	*0.5*	1	*3*	17.00	123.57	32.64	233.34	27.6	4.1	2.1
28	400/100/50	TF 1C 83	*0.5*	1	*3*	9.08	132.66	16.16	250.01	29.6	4.4	2.2
28	400/100/50	TF 1C 84	*0.5*	1	*3*	3.00	135.66	5.04	255.05	30.2	4.5	2.3
24	400/100/50	TF 1C 85	1	1	4.1	16.00	151.66	26.88	281.93	33.4	5.0	2.5
24	400/100/50	TF 1C 87	2.8	5.1	92.4	7.00	158.66	10.08	292.01	34.6	5.2	2.6
32.5	400/100/50	TF 2B 71	*0.5*	1.9	40.5	17.00	75.57	33.15	161.51	19.1	2.9	1.4
32.5	400/100/50	TF 2B 73	*0.5*	2.6	53.4	7.00	82.57	13.65	175.16	20.7	3.1	1.6
32	400/100/50	TF 2B 74	*0.5*	1.5	29.2	17.00	99.57	33.15	208.31	24.7	3.7	1.9
32	400/100/50	TF 2B 76	*0.5*	1.7	31.4	7.00	106.57	13.44	221.75	26.3	3.9	2.0
28.5	400/100/50	TF 2B 77	3.5	10.5	61.6	17.00	123.57	32.64	254.39	30.1	4.5	2.3
33	400/100/50	TF 2B 79	2	5.2	42.7	6.00	129.57	11.88	266.27	31.5	4.7	2.4
25	400/100/50	TF 2B 80	*0.5*	1.1	16.6	3.08	132.66	4.63	271.22	32.1	4.8	2.4
25	400/100/50	TF 2B 81	*0.5*	1.3	19.4	3.00	135.66	4.50	275.72	32.7	4.9	2.4
19	400/100/50	TF 2B 82	1.6	4.8	156	16.00	151.66	24.00	299.72	35.5	5.3	2.7
19	400/100/50	TF 2B 84	1.2	16.3	409	7.00	158.66	7.98	307.70	36.4	5.5	2.7

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_A ... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

7930.2	16474.8	63474.3	4275.5	8828.2	40346.9	2232.6	6770.7	33050.9
9603.8	19930.6	79267.9	1673.6	3455.8	15793.7	1622.2	2913.1	14365.7

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM,Ablauf}$/$C_{SM,Zulauf}$ * 100)

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V			Beladung [µg/g]			Beladung gesamt [µg/g]			Masse [g]	SM-Rückhalt [%]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	TFIc	Pb	Cu	Zn
1926.0	3978.0	18232.5	16.0	33.1	151.7	69.7	147.5	560.5	120.2	*99.1*	*99.2*	*99.5*
798.1	1638.0	7507.5	6.6	13.6	62.5	76.3	161.1	623.0		*99.1*	*99.2*	*99.5*
1926.0	3978.0	18232.5	16.0	33.1	151.7	92.3	194.2	774.6		*99.1*	*99.2*	*99.5*
780.9	1612.8	7392.0	6.5	13.4	61.5	98.8	207.6	836.1		*99.1*	*99.2*	*99.5*
1896.4	3916.8	17952.0	15.8	32.6	149.4	114.6	240.2	985.5		*99.1*	*99.2*	*99.5*
938.9	1939.2	8888.0	7.8	16.1	73.9	122.4	256.3	1059.4		*99.1*	*99.2*	*99.5*
292.8	604.8	2772.0	2.4	5.0	23.1	124.8	261.3	1082.5		*99.1*	*99.2*	*99.5*
1548.3	3225.6	14754.4	12.9	26.8	122.7	137.7	288.2	1205.2		98.3	*99.2*	99.3
562.5	1168.3	4642.8	4.7	9.7	38.6	142.4	297.9	1243.9		95.2	95.8	83.3
1926.0	3948.2	16989.4	13.1	26.9	115.6	68.1	143.7	527.6	TFIIb	*99.1*	98.4	92.7
798.1	1616.2	6819.5	5.4	11.0	46.4	73.4	154.7	574.0	147	*99.1*	97.9	90.3
1926.0	3961.4	17364.0	13.1	26.9	118.1	86.5	181.6	692.1		*99.1*	98.8	94.7
780.9	1603.4	7010.3	5.3	10.9	47.7	91.9	192.5	739.8		*99.1*	98.6	94.3
1798.5	3606.7	16039.3	12.2	24.5	109.1	104.1	217.1	848.9		94.0	91.3	88.9
672.4	1375.7	6062.4	4.6	9.4	41.2	108.7	226.4	890.1		96.6	95.7	92.3
268.7	554.5	2480.9	1.8	3.8	16.9	110.5	230.2	907.0		*99.1*	99.1	97.0
261.5	538.7	2401.2	1.8	3.7	16.3	112.3	233.9	923.3		*99.1*	98.9	96.5
1368.0	2788.8	9528.0	9.3	19.0	64.8	121.6	252.8	988.2		97.3	96.0	71.8
458.1	835.5	1149.1	3.1	5.7	7.8	124.7	258.5	996.0		98.0	86.5	26.0
429.6	887.4	4044.3	1.5	3.0	13.9	8.6	18.3	68.2	BA	*99.1*	*99.2*	98.9
176.9	365.4	1668.1	0.6	1.3	5.7	9.2	19.5	73.9	292	*99.1*	*99.2*	99.1
429.6	887.4	4067.3	1.5	3.0	13.9	10.7	22.6	87.9		*99.1*	*99.2*	*99.5*
170.8	352.8	1617.0	0.6	1.2	5.5	11.3	23.8	93.4		*99.1*	*99.2*	*99.5*
414.8	856.8	3927.0	1.4	2.9	13.4	12.7	26.7	106.9		*99.1*	*99.2*	*99.5*
151.6	313.2	1423.0	0.5	1.1	4.9	13.2	27.8	111.7		*99.1*	99.2	98.6
110.2	227.2	1042.2	0.4	0.8	3.6	13.6	28.6	115.3		*99.1*	99.0	99.4
107.2	221.0	1008.5	0.4	0.8	3.5	14.0	29.3	118.8		*99.1*	99.0	98.8
566.8	1178.8	5206.3	1.9	4.0	17.8	15.9	33.3	136.6		98.3	99.0	95.7
236.0	496.0	1482.6	0.8	1.7	5.1	16.7	35.0	141.7		95.9	97.6	63.8
571.2	1065.2	2484.9	2.3	4.3	10.0	8.5	17.3	42.4	S	98.5	88.9	45.4
809.9	1273.8	1420.1	3.3	5.1	5.7	11.7	22.4	48.2	248.4	98.3	74.9	18.3
785.2	622.4	1340.6	3.2	2.5	5.4	14.9	24.9	53.6		98.0	37.6	17.7
2042.9	2057.5	7296.0	8.2	8.3	29.4	23.1	33.2	82.9		47.8	23.3	18.1
51.4	542.6	1428.0	0.2	2.2	5.7	23.3	35.4	88.7		3.1	15.7	9.0

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges}$ = $SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_J$.

SM-JF = SM-Fracht/SM_J.

SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
20.7	21.9	20.7	4.6	4.7	5.4	3.1	3.3	3.1	0.7	0.7	0.8	1.6	1.6	1.6	0.3	0.4	0.4
22.6	23.9	23.0	1.9	2.0	2.2	3.4	3.6	3.4	0.3	0.3	0.3	1.7	1.8	1.7	0.1	0.1	0.2
27.2	28.6	28.4	4.6	4.7	5.4	4.1	4.3	4.3	0.7	0.7	0.8	2.0	2.1	2.1	0.3	0.4	0.4
30.1	31.6	31.8	1.9	1.9	2.2	4.5	4.7	4.8	0.3	0.3	0.3	2.3	2.4	2.4	0.1	0.1	0.2
33.6	35.2	35.9	4.5	4.7	5.3	5.0	5.3	5.4	0.7	0.7	0.8	2.5	2.6	2.7	0.3	0.4	0.4
35.9	37.6	38.7	2.2	2.3	2.6	5.4	5.6	5.8	0.3	0.3	0.4	2.7	2.8	2.9	0.2	0.2	0.2
36.6	38.3	39.5	0.7	0.7	0.8	5.5	5.7	5.9	0.1	0.1	0.1	2.7	2.9	3.0	0.1	0.1	0.1
40.3	42.2	43.9	3.7	3.9	4.4	6.1	6.3	6.6	0.6	0.6	0.7	3.0	3.2	3.3	0.3	0.3	0.3
41.7	43.6	45.6	1.4	1.4	1.7	6.3	6.5	6.8	0.2	0.2	0.2	3.1	3.3	3.4	0.1	0.1	0.1
23.9	25.3	23.7	4.6	4.7	5.4	3.6	3.8	3.6	0.7	0.7	0.8	1.8	1.9	1.8	0.3	0.4	0.4
25.8	27.2	26.0	1.9	2.0	2.2	3.9	4.1	3.9	0.3	0.3	0.3	1.9	2.0	1.9	0.1	0.1	0.2
30.4	32.0	31.4	4.6	4.7	5.4	4.6	4.8	4.7	0.7	0.7	0.8	2.3	2.4	2.4	0.3	0.4	0.4
32.2	33.9	33.6	1.9	1.9	2.2	4.8	5.1	5.0	0.3	0.3	0.3	2.4	2.5	2.5	0.1	0.1	0.2
36.8	38.6	38.9	4.5	4.7	5.3	5.5	5.8	5.8	0.7	0.7	0.8	2.8	2.9	2.9	0.3	0.4	0.4
38.4	40.3	40.9	1.6	1.7	1.9	5.8	6.0	6.1	0.2	0.3	0.3	2.9	3.0	3.1	0.1	0.1	0.1
39.1	41.0	41.7	0.6	0.7	0.8	5.9	6.1	6.3	0.1	0.1	0.1	2.9	3.1	3.1	0.0	0.0	0.1
39.7	41.6	42.4	0.6	0.6	0.7	6.0	6.2	6.4	0.1	0.1	0.1	3.0	3.1	3.2	0.0	0.0	0.1

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

6.4	6.7	6.3	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	0.9	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1
6.8	7.2	6.8	0.4	0.4	0.5	1.0	1.1	1.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
7.8	8.2	8.0	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1
8.2	8.7	8.5	0.4	0.4	0.5	1.2	1.3	1.3	0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0
9.2	9.7	9.6	1.0	1.0	1.2	1.4	1.5	1.4	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0.1
9.6	10.1	10.1	0.4	0.4	0.4	1.4	1.5	1.5	0.1	0.1	0.1	0.7	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0
9.8	10.3	10.3	0.3	0.3	0.3	1.5	1.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0
10.1	10.6	10.7	0.3	0.3	0.3	1.5	1.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0
11.4	12.0	12.3	1.4	1.4	1.6	1.7	1.8	1.8	0.2	0.2	0.2	0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1
12.0	12.6	12.9	0.6	0.6	0.7	1.8	1.9	1.9	0.1	0.1	0.1	0.9	0.9	1.0	0.0	0.0	0.1
5.1	5.3	2.6	1.4	1.4	1.6	0.8	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
6.8	7.1	4.6	2.0	2.0	2.3	1.0	1.1	0.7	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.2
8.7	9.1	6.8	1.9	2.0	2.2	1.3	1.4	1.0	0.3	0.3	0.3	0.6	0.7	0.5	0.1	0.1	0.2
18.8	19.5	18.8	10.1	10.5	11.9	2.8	2.9	2.8	1.5	1.6	1.8	1.4	1.5	1.4	0.8	0.8	0.9
22.7	23.6	23.5	4.0	4.1	4.7	3.4	3.5	3.5	0.6	0.6	0.7	1.7	1.8	1.8	0.3	0.3	0.4
Av = 15			**Av = 15**			**Av = 100**			**Av = 100**			**Av = 200**			**Av = 200**		

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_s$.

	Js [a] (Av = 15)			**Js [a] (Av = 100)**			**Js [a] (Av = 200)**		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
TFIc	41.7	43.6	45.6	6.3	6.5	6.8	3.1	3.3	3.4
TFIIb	44.2	46.2	47.7	6.6	6.9	7.2	3.3	3.5	3.6
BA	12.0	12.6	12.9	1.8	1.9	1.9	0.9	0.9	1.0
S	22.7	23.6	23.5	3.4	3.5	3.5	1.7	1.8	1.8

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert							Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
75.57	16.6	140.5	TF 1C 75	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
82.57	18.2	154.1	TF 1C 77	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
99.57	22.2	187.3	TF 1C 78	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
99.57	24.7	208.3	TF 1C 80	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
123.57	27.6	233.3	TF 1C 81	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
132.66	29.6	250.0	TF 1C 83	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
135.66	30.2	255.1	TF 1C 84	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
151.66	33.4	281.9	TF 1C 85	1	1	4.1	0.15	0.20	0.50	0.02	0.01	0.01
158.66	34.6	292.0	TF 1C 87	2.8	5.1	92.4	0.15	0.20	0.50	0.05	0.04	0.17
75.57	19.1	161.5	TF 2B 71	0.5	1.9	40.5	0.15	0.20	0.50	0.01	0.02	0.07
82.57	20.7	175.2	TF 2B 73	0.5	2.6	53.4	0.15	0.20	0.50	0.01	0.02	0.10
99.57	24.7	208.3	TF 2B 74	0.5	1.5	29.2	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.05
106.57	26.3	221.7	TF 2B 76	0.5	1.7	31.4	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.06
123.57	30.1	254.4	TF 2B 77	3.5	10.5	61.6	0.15	0.20	0.50	0.06	0.09	0.11
129.57	31.5	266.3	TF 2B 79	2	5.2	42.7	0.15	0.20	0.50	0.03	0.04	0.08
132.66	32.1	271.2	TF 2B 80	0.5	1.1	16.6	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.03
135.66	32.7	275.7	TF 2B 81	0.5	1.3	19.4	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.04
151.66	35.5	299.7	TF 2B 82	1.6	4.8	156	0.15	0.20	0.50	0.03	0.04	0.28
158.66	36.4	307.7	TF 2B 84	1.2	16.3	409	0.15	0.20	0.50	0.02	0.13	0.74
75.57	5.1	42.9	BA 26	0.5	1	6.1	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01

82.57	5.4	45.9	BA 28	0.5	1	5.2	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
99.57	6.3	53.3	BA 29	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
106.57	6.7	56.3	BA 31	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
123.57	7.5	63.4	BA 32	0.5	1	3	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
129.57	7.8	66.0	BA 34	0.5	1	7.8	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
132.66	8.0	67.8	BA 35	0.5	1.2	3.4	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
135.66	8.2	69.6	BA 36	0.5	1.2	6.4	0.15	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
151.66	9.4	79.5	BA 37	1	1.2	23.9	0.15	0.20	0.50	0.02	0.01	0.04
158.66	9.9	83.7	BA 39	2.4	2.9	200	0.15	0.20	0.50	0.04	0.02	0.36
10.08	4.1	34.4	S 63	0.9	13.4	302	0.15	0.20	0.50	0.02	0.11	0.55
13.16	5.5	46.7	S 64	1	30.4	452	0.15	0.20	0.50	0.02	0.25	0.82
16.16	7.1	60.4	S 65	1.2	75.5	455	0.15	0.20	0.50	0.02	0.62	0.82
32.16	15.8	133.3	S 66	30.6	92.8	453	0.15	0.20	0.50	0.52	0.77	0.82
39.16	19.2	161.9	S 68	56.8	102	503	0.15	0.20	0.50	0.97	0.84	0.91
			Zulauf (400	58.6	121	553						

Analyse 8

23/04/2013 17.04. - 23.04. **Versuchsfortsetzung VR 5**

Probe	#	Nummern
TFIc	D3	88,90,91,93,94,96,97,98,100
TFIIb	D3	85,87,88,90,91,93,94,95,97
BA	D3	40,42,43,45,46,48,49,50,52
Zulauf 14		

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_X = V_{ges}/Q_i$

Q [ml/min]	Konzentration	benbezeichnu	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
24	400/100/50	TF 1C 88	1.7	3.4	81.2	17.00	175.66	24.48	316.49	37.5	5.6	2.8
24	400/100/50	TF 1C 90	3.1	11.8	268	7.00	182.66	10.08	326.57	38.7	5.8	2.9
27	400/100/50	TF 1C 91	0.5	1	6.7	17.00	199.66	27.54	351.05	41.6	6.2	3.1
27	400/100/50	TF 1C 93	0.5	1.7	7.9	6.00	205.66	9.72	360.77	42.7	6.4	3.2
24.75	400/100/50	TF 1C 94	0.5	2.2	4.1	18.00	223.66	29.16	389.93	46.2	6.9	3.5
26.5	400/100/50	TF 1C 96	4.9	3.2	35.5	8.00	231.66	12.20	402.13	47.6	7.1	3.6
26.5	400/100/50	TF 1C 97	5.2	3.7	50.1	3.00	234.66	4.77	406.90	48.2	7.2	3.6
25	400/100/50	TF 1C 98	6.4	5.5	101	17.00	251.66	25.50	432.40	51.2	7.7	3.8
25	400/100/50	TF 1C 100	6.5	6.3	107	6.00	257.66	9.00	441.40	52.3	7.8	3.9
19	400/100/50	TF 2B 85	2.8	10.6	274	17.00	175.66	19.38	327.08	38.7	5.8	2.9
24	400/100/50	TF 2B 87	1.9	4.8	104	7.00	182.66	9.18	335.36	39.7	6.0	3.0
20.5	400/100/50	TF 2B 88	0.5	3.5	81.5	17.00	199.66	20.91	359.84	42.6	6.4	3.2
20.5	400/100/50	TF 2B 90	0.5	3.9	70.8	6.00	205.66	7.38	367.22	43.5	6.5	3.3
19.5	400/100/50	TF 2B 91	0.6	4.3	59.1	18.00	223.66	22.14	389.36	46.1	6.9	3.5
21.5	400/100/50	TF 2B 93	6	10	228	8.00	231.66	9.72	399.08	47.3	7.1	3.5
21.5	400/100/50	TF 2B 94	6.1	10.5	261	3.00	234.66	3.87	402.95	47.7	7.2	3.6
8	400/100/50	TF 2B 95	6.4	8.6	192	17.00	251.66	8.16	411.11	48.7	7.3	3.7
18	400/100/50	TF 2B 97	7.9	13.9	380	6.00	257.66	7.34	418.45	49.6	7.4	3.7
10	400/100/50	BA 40	1.2	1.7	101	17.00	175.66	10.20	93.85	11.1	1.7	0.8
11	400/100/50	BA 42	3	6.5	169	7.00	182.66	4.44	98.11	11.6	1.7	0.9
10	400/100/50	BA 43	1.4	4.7	40.4	17.00	199.66	10.20	109.33	12.9	1.9	1.0
10	400/100/50	BA 45	0.6	2.8	30	6.00	205.66	3.60	112.93	13.4	2.0	1.0
9.25	400/100/50	BA 46	1.4	5.1	30.5	18.00	223.66	10.80	123.73	14.7	2.2	1.1
9.25	400/100/50	BA 48	6.4	6.5	180	8.00	231.66	4.44	128.17	15.2	2.3	1.1
9.25	400/100/50	BA 49	12.7	15	263	3.00	234.66	1.67	129.84	15.4	2.3	1.2
8.25	400/100/50	BA 50	7.5	9.1	238	17.00	251.66	8.42	138.25	16.4	2.5	1.2
7.75	400/100/50	BA 52	7.4	10.6	138	6.00	257.66	2.97	141.22	16.7	2.5	1.3
		Zulauf (400 p	55.8	114	520							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges}... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_x... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_i ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{Sm.zulauf} * V_{ges}$ | $SM\text{-}Fracht = C_{Sm.zulauf} * V$ | nur bei Ce > Bestimmungsgrenze: $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]			SM-Fracht [µg]			SM-Frachtablauf [µg]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
18993.0	39626.5	166593.0	1366.0	2790.7	12729.6	41.6	83.2	1987.8
19555.4	40775.6	171834.6	562.5	1149.1	5241.6	31.2	118.9	2701.4
20921.4	43566.4	184564.2	1536.7	3139.6	14320.8	*13.8*	*27.5*	184.5
21463.8	44674.4	189618.6	542.4	1108.1	5054.4	*4.9*	16.5	76.8
23090.9	47998.7	204781.8	1627.1	3324.2	15163.2	*14.6*	64.2	119.6
23771.4	49388.9	211123.2	680.5	1390.2	6341.4	59.8	39.0	432.9
24037.6	49932.7	213603.6	266.2	543.8	2480.4	24.8	17.6	239.0
25460.5	52839.7	226863.6	1422.9	2907.0	13260.0	163.2	140.3	2575.5
25962.7	53865.7	231543.6	502.2	1026.0	4680.0	58.5	56.7	963.0
19728.8	41238.2	171123.4	1081.4	2209.3	10077.6	54.3	205.4	5310.1
20190.9	42182.2	175429.0	512.2	1046.5	4773.6	17.4	44.1	954.7
21556.9	44972.9	188158.6	1166.8	2383.7	10873.2	*10.5*	73.2	1704.2
21968.7	45814.2	191996.2	411.8	841.3	3837.6	3.7	28.8	522.5
23204.1	48338.2	203509.0	1235.4	2524.0	11512.8	13.3	95.2	1308.5
23746.4	49446.2	208563.4	542.4	1108.1	5054.4	58.3	97.2	2216.2
23962.4	49887.4	210575.8	215.9	441.2	2012.4	23.6	40.6	1010.1
24417.7	50817.7	214819.0	455.3	930.2	4243.2	52.2	70.2	1566.7
24827.0	51653.8	218633.2	409.3	836.2	3814.2	57.9	102.0	2787.3
5641.6	11781.8	49042.3	569.2	1162.8	5304.0	12.2	17.3	1030.2
5879.3	12267.4	51257.5	247.8	506.2	2308.8	13.3	28.9	750.4
6505.4	13546.5	57091.9	569.2	1162.8	5304.0	14.3	47.9	412.1
6706.2	13956.9	58963.9	200.9	410.4	1872.0	2.2	10.1	108.0
7308.9	15188.1	64579.9	602.6	1231.2	5616.0	15.1	55.1	329.4
7556.6	15694.2	66888.7	247.8	506.2	2308.8	28.4	28.9	799.2
7649.5	15884.0	67754.5	92.9	189.8	865.8	21.1	25.0	437.9
8119.1	16843.4	72130.3	469.6	959.3	4375.8	63.1	76.6	2002.8
8284.8	17181.9	73674.7	165.7	338.6	1544.4	22.0	31.5	409.9

$C_{Sm.zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{Sm.ablauf}/C_{Sm.zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V			Beladung [µg/g]			Beladung gesamt [µg/g]			Masse [g]	SM-Rückhalt [%]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn		Pb	Cu	Zn
1324.4	2707.5	10741.8	11.0	22.5	89.4	153.4	320.4	1333.2	120.2	97.0	97.0	84.4
531.2	1030.2	2540.2	4.4	8.6	21.1	157.8	329.0	1354.4		94.4	89.6	48.5
1523.0	3112.0	14136.3	12.7	25.9	117.6	170.5	354.9	1472.0		*99.1*	*99.1*	98.7
537.5	1091.6	4977.6	4.5	9.1	41.4	175.0	364.0	1513.4		*99.1*	98.5	98.5
1612.5	3260.1	15043.6	13.4	27.1	125.2	188.4	391.1	1638.5		*99.1*	98.1	99.2
620.7	1351.2	5908.5	5.2	11.2	49.2	193.6	402.3	1687.7		91.2	97.2	93.2
241.4	526.1	2241.4	2.0	4.4	18.6	195.6	406.7	1706.3		90.7	96.8	90.4
1259.7	2766.8	10684.5	10.5	23.0	88.9	206.1	429.7	1795.2		88.5	95.2	80.6
443.7	969.3	3717.0	3.7	8.1	30.9	209.7	437.8	1826.2		88.4	94.5	79.4
1027.1	2003.9	4767.5	7.0	13.6	32.4	131.7	272.2	1028.4	TFIIb	95.0	90.7	47.3
494.8	1002.5	3818.9	3.4	6.8	26.0	135.1	279.0	1054.4	147	96.6	95.8	80.0
1156.3	2310.6	9169.0	7.9	15.7	62.4	142.9	294.7	1116.8		*99.1*	96.9	84.3
408.1	812.5	3315.1	2.8	5.5	22.6	145.7	300.2	1139.3		99.1	96.6	86.4
1222.1	2428.8	10204.3	8.3	16.5	69.4	154.0	316.7	1208.7		98.9	96.2	88.6
484.1	1010.9	2838.2	3.3	6.9	19.3	157.3	323.6	1228.0		89.2	91.2	56.2
192.3	400.5	1002.3	1.3	2.7	6.8	158.6	326.3	1234.9		89.1	90.8	49.8
403.1	860.1	2676.5	2.7	5.9	18.2	161.4	332.2	1253.1		88.5	92.5	63.1
351.3	734.2	1026.9	2.4	5.0	7.0	163.7	337.2	1260.1		85.8	87.8	26.9
556.9	1145.5	4273.8	1.9	3.9	14.6	18.6	39.0	156.3	BA	97.8	98.5	80.6
234.4	477.3	1558.4	0.8	1.6	5.3	19.4	40.6	161.6	292	94.6	94.3	67.5
554.9	1114.9	4891.9	1.9	3.8	16.8	21.3	44.4	178.4		97.5	95.9	92.2

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

198.7	400.3	1764.0	0.7	1.4	6.0	22.0	45.8	184.4	98.9	97.5	94.2
587.5	1176.1	5286.6	2.0	4.0	18.1	24.0	49.8	202.5	97.5	95.5	94.1
219.3	477.3	1509.6	0.8	1.6	5.2	24.8	51.5	207.7	88.5	94.3	65.4
71.8	164.8	427.9	0.2	0.6	1.5	25.0	52.0	209.2	77.2	86.8	49.4
406.4	882.7	2373.0	1.4	3.0	8.1	26.4	55.0	217.3	86.6	92.0	54.2
143.7	307.1	1134.5	0.5	1.1	3.9	26.9	56.1	221.2	86.7	90.7	73.5

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{Av}$ = SM-Fracht$_{Av}$/SM_J. SM-JF = SM-Fracht/SM_J.

SM-Jahresfrachten$_{Av15}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{Av100}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{Av200}$			SM-Jahresfrachten		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
45.0	46.9	49.3	3.2	3.3	3.8	6.7	7.0	7.4	0.5	0.5	0.6	3.4	3.5	3.7	0.2	0.2	0.3
46.3	48.3	50.9	1.3	1.4	1.6	6.9	7.2	7.6	0.2	0.2	0.2	3.5	3.6	3.8	0.1	0.1	0.1
49.5	51.6	54.6	3.6	3.7	4.2	7.4	7.7	8.2	0.5	0.6	0.6	3.7	3.9	4.1	0.3	0.3	0.3
50.8	52.9	56.1	1.3	1.3	1.5	7.6	7.9	8.4	0.2	0.2	0.2	3.8	4.0	4.2	0.1	0.1	0.1
54.7	56.8	60.6	3.9	3.9	4.5	8.2	8.5	9.1	0.6	0.6	0.7	4.1	4.3	4.5	0.3	0.3	0.3
56.3	58.5	62.5	1.6	1.6	1.9	8.4	8.8	9.4	0.2	0.2	0.3	4.2	4.4	4.7	0.1	0.1	0.1
56.9	59.1	63.2	0.6	0.6	0.7	8.5	8.9	9.5	0.1	0.1	0.1	4.3	4.4	4.7	0.0	0.0	0.1
60.3	62.6	67.2	3.4	3.4	3.9	9.0	9.4	10.1	0.5	0.5	0.6	4.5	4.7	5.0	0.3	0.3	0.3
61.5	63.8	68.5	1.2	1.2	1.4	9.2	9.6	10.3	0.2	0.2	0.2	4.6	4.8	5.1	0.1	0.1	0.1
46.7	48.8	50.7	2.6	2.6	3.0	7.0	7.3	7.6	0.4	0.4	0.4	3.5	3.7	3.8	0.2	0.2	0.2
47.8	50.0	51.9	1.2	1.2	1.4	7.2	7.5	7.8	0.2	0.2	0.2	3.6	3.7	3.9	0.1	0.1	0.1
51.1	53.3	55.7	2.8	2.8	3.2	7.7	8.0	8.4	0.4	0.4	0.5	3.8	4.0	4.2	0.2	0.2	0.2
52.0	54.3	56.8	1.0	1.0	1.1	7.8	8.1	8.5	0.1	0.1	0.2	3.9	4.1	4.3	0.1	0.1	0.1
55.0	57.2	60.2	2.9	3.0	3.4	8.2	8.6	9.0	0.4	0.4	0.5	4.1	4.3	4.5	0.2	0.2	0.3
56.2	58.6	61.7	1.3	1.3	1.5	8.4	8.8	9.3	0.2	0.2	0.2	4.2	4.4	4.6	0.1	0.1	0.1
56.8	59.1	62.3	0.5	0.5	0.6	8.5	8.9	9.4	0.1	0.1	0.1	4.3	4.4	4.7	0.0	0.0	0.0
57.8	60.2	63.6	1.1	1.1	1.3	8.7	9.0	9.5	0.2	0.2	0.2	4.3	4.5	4.8	0.1	0.1	0.1
58.8	61.2	64.7	1.0	1.0	1.1	8.8	9.2	9.7	0.1	0.1	0.2	4.4	4.6	4.9	0.1	0.1	0.1
13.4	14.0	14.5	1.3	1.4	1.6	2.0	2.1	2.2	0.2	0.2	0.2	1.0	1.0	1.1	0.1	0.1	0.1
13.9	14.5	15.2	0.6	0.6	0.7	2.1	2.2	2.3	0.1	0.1	0.1	1.0	1.1	1.1	0.0	0.0	0.1
15.4	16.0	16.9	1.3	1.4	1.6	2.3	2.4	2.5	0.2	0.2	0.2	1.2	1.2	1.3	0.1	0.1	0.1
15.9	16.5	17.5	0.5	0.5	0.6	2.4	2.5	2.6	0.1	0.1	0.1	1.2	1.2	1.3	0.0	0.0	0.0
17.3	18.0	19.1	1.4	1.5	1.7	2.6	2.7	2.9	0.2	0.2	0.2	1.3	1.3	1.4	0.1	0.1	0.1
17.9	18.6	19.8	0.6	0.6	0.7	2.7	2.8	3.0	0.1	0.1	0.1	1.3	1.4	1.5	0.0	0.0	0.1
18.1	18.8	20.1	0.2	0.2	0.3	2.7	2.8	3.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.4	1.5	0.0	0.0	0.0
19.2	19.9	21.4	1.1	1.1	1.3	2.9	3.0	3.2	0.2	0.2	0.2	1.4	1.5	1.6	0.1	0.1	0.1
19.6	20.3	21.8	0.4	0.4	0.5	2.9	3.1	3.3	0.1	0.1	0.1	1.5	1.5	1.6	0.0	0.0	0.0
Av = 15			**Av = 15**			**Av = 100**			**Av = 100**			**Av = 200**			**Av = 200**		

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{Av}$/SM_J.

	Js [a] (Av = 15)			**Js [a] (Av = 100)**			**Js [a] (Av = 200)**		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
TFIc	61.5	63.8	68.5	9.2	9.6	10.3	4.6	4.8	5.1
TFIIb	58.8	61.2	64.7	8.8	9.2	9.7	4.4	4.6	4.9
BA	19.6	20.3	21.8	2.9	3.1	3.3	1.5	1.5	1.6

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_x [a] Av15	Vges [L]					GrW ... Grenzwert			Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
175.66	37.5	316.5	TF 1C 88	1.7	3.4	81.2	0.16	0.20	0.50	0.03	0.03	0.16
182.66	38.7	326.6	TF 1C 90	3.1	11.8	268	0.16	0.20	0.50	0.06	0.10	0.52
199.66	41.6	351.1	TF 1C 91	0.5	1	6.7	0.16	0.20	0.50	0.01	0.01	0.01
205.66	42.7	360.8	TF 1C 93	0.5	1.7	7.9	0.16	0.20	0.50	0.01	0.01	0.02
223.66	46.2	389.9	TF 1C 94	0.5	2.2	4.1	0.16	0.20	0.50	0.01	0.02	0.01
231.66	47.6	402.1	TF 1C 96	4.9	3.2	35.5	0.16	0.20	0.50	0.09	0.03	0.07
234.66	48.2	406.9	TF 1C 97	5.2	3.7	50.1	0.16	0.20	0.50	0.09	0.03	0.10
251.66	51.2	432.4	TF 1C 98	6.4	5.5	101	0.16	0.20	0.50	0.11	0.05	0.19
257.66	52.3	441.4	TF 1C 100	6.5	6.3	107	0.16	0.20	0.50	0.12	0.06	0.21
175.66	38.7	327.1	TF 2B 85	2.8	10.6	274	0.16	0.20	0.50	0.05	0.09	0.53
182.66	39.7	335.4	TF 2B 87	1.9	4.8	104	0.16	0.20	0.50	0.03	0.04	0.20
199.66	42.6	359.8	TF 2B 88	0.5	3.5	81.5	0.16	0.20	0.50	0.01	0.03	0.16
205.66	43.5	367.2	TF 2B 90	0.5	3.9	70.8	0.16	0.20	0.50	0.01	0.03	0.14
223.66	46.1	389.4	TF 2B 91	0.6	4.3	59.1	0.16	0.20	0.50	0.01	0.04	0.11
231.66	47.3	399.1	TF 2B 93	6	10	228	0.16	0.20	0.50	0.11	0.09	0.44
234.66	47.7	403.0	TF 2B 94	6.1	10.5	261	0.16	0.20	0.50	0.11	0.09	0.50
251.66	48.7	411.1	TF 2B 95	6.4	8.6	192	0.16	0.20	0.50	0.11	0.08	0.37
257.66	49.6	418.4	TF 2B 97	7.9	13.9	380	0.16	0.20	0.50	0.14	0.12	0.73
175.66	11.1	93.9	BA 40	1.2	1.7	101	0.16	0.20	0.50	0.02	0.01	0.19
182.66	11.6	98.1	BA 42	3	6.5	169	0.16	0.20	0.50	0.05	0.06	0.33
199.66	12.9	109.3	BA 43	1.4	4.7	40.4	0.16	0.20	0.50	0.03	0.04	0.08
205.66	13.4	112.9	BA 45	0.6	2.8	30	0.16	0.20	0.50	0.01	0.02	0.06
223.66	14.7	123.7	BA 46	1.4	5.1	30.5	0.16	0.20	0.50	0.03	0.04	0.06
231.66	15.2	128.2	BA 48	6.4	6.5	180	0.16	0.20	0.50	0.11	0.06	0.35
234.66	15.4	129.8	BA 49	12.7	15	263	0.16	0.20	0.50	0.23	0.13	0.51
251.66	16.4	138.3	BA 50	7.5	9.1	238	0.16	0.20	0.50	0.13	0.08	0.46
257.66	16.7	141.2	BA 52	7.4	10.6	138	0.16	0.20	0.50	0.13	0.09	0.27
			Zulauf 400	55.8	114	520						

Analyse 9 und 11 (Wiederholung) **Versuchsfortsetzung VR 6**

07/05/2013		24.04. - 29.04.	bzw. 28.05.13	
Probe	#	Nummern		
TFIc	D3	101,103,104,106,107,109,110,111	102,103,105,106,109	fehlende in Tabelle ergänzt!
TFIIb	D3	98,99b,100,102,103,105,106,107	99,101,102,104,105,108	
BA	D3	53,54,55,56,58,59,60,61,62	54,56,57,58,60	
Zulauf 15				

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_x = V_{ges}/Q_s$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
22.5	400/100/50	TF 1C 101	7.1	6.5	110	18.00	275.66	25.80	467.20	55.3	8.3	4.1
34	400/100/50	TF I C 102	7.3	8.4	163	3.00	278.66	5.54	472.74	56.0	8.4	4.2
36	400/100/50	TF 1C 103	*0.5*	1.3	17.8	6.00	281.66	11.90	479.10	56.7	8.5	4.3
31.5	400/100/50	TF 1C 104	0.7	2.3	12.1	17.25	298.91	35.91	515.01	61.0	9.1	4.6
33	400/100/50	TF I C 105	*0.5*	1	8.4	3.00	301.91	5.90	521.85	61.8	9.3	4.6
33	400/100/50	TF 1C 106	*0.5*	1	7.3	6.00	304.91	11.84	527.79	62.5	9.4	4.7
33	400/100/50	TF 1C 107	*0.5*	1.7	6.1	18.00	322.91	35.64	563.43	66.7	10.0	5.0
31	400/100/50	TF 1C 109	*0.5*	3	6.5	5.67	328.57	10.62	574.05	68.0	10.2	5.1
27	400/100/50	TF 1C 110	14.4	24.1	313	3.00	331.57	4.86	578.91	68.6	10.3	5.1
27	400/100/50	TF 1C 111	16.1	28.2	501	3.00	334.57	4.86	583.77	69.1	10.4	5.2
16.25	400/100/50	TF 2B 98	8.4	14.7	302	18.00	275.66	18.60	437.05	51.8	7.8	3.9
27.5	400/100/50	TF IIb 99	9.7	19.5	354	3.00	278.66	4.39	441.43	52.3	7.8	3.9
33	400/100/50	TF 2B 99b	1.9	9.6	120	6.00	281.66	10.00	447.04	52.9	7.9	4.0
27.5	400/100/50	TF 2B 100	1.4	7.6	110	17.25	298.91	32.51	479.55	56.8	8.5	4.3
34.5	400/100/50	TF IIb 101	0.7	6.4	119	3.00	301.91	6.00	486.37	57.6	8.6	4.3
34.5	400/100/50	TF 2B 102	0.7	6.9	127	6.00	304.91	12.21	492.58	58.3	8.7	4.4
34.5	400/100/50	TF 2B 103	1.1	12.1	185	18.00	322.91	37.26	529.84	62.7	9.4	4.7
27.5	400/100/50	TF IIb 104	1	11.3	171	2.67	325.57	4.68	534.52	63.3	9.5	4.7

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]
t_{ges} ... Zeit seit Start [h]
V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]
V_{ges} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]
J_x ... aufberachte Jahresfrachten [a]
Q_s ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

27.5	400/100/50	TF 28 105	1.1	11	159	5.67	328.57	9.63	539.47	63.9	9.6	4.8
23.5	400/100/50	TF 28 106	23.9	47.2	452	3.00	331.57	4.23	543.70	64.4	9.7	4.8
23.5	400/100/50	TF 28 107	26.5	48.7	479	3.00	334.57	4.23	547.93	64.9	9.7	4.9
6.8	400/100/50	BA 53	10.6	13.4	191	18.00	275.66	7.91	149.14	17.7	2.6	1.3
10.5	400/100/50	BA 54	12.5	19.1	203	3.00	278.66	1.71	150.84	17.9	2.7	1.3
11	400/100/50	BA 55	6	14.8	84	6.00	281.66	3.66	152.79	18.1	2.7	1.4
9	400/100/50	BA 56	4.1	9.8	63.1	17.25	298.91	10.79	163.58	19.4	2.9	1.5
7.75	400/100/50	BA 57	1.4	2.8	29.7	3.00	301.91	1.43	165.28	19.6	2.9	1.5
7.75	400/100/50	BA 58	1.4	2.7	29	6.00	304.91	2.83	166.67	19.7	3.0	1.5
15.5	400/100/50	BA 59	3.4	9.7	62.9	3.00	307.91	2.33	169.00	20.0	3.0	1.5
15.5	400/100/50	BA 60	4.2	12.9	69.7	3.00	310.91	2.79	171.79	20.3	3.1	1.5
12.75	400/100/50	BA 61	19.8	21.6	227	3.00	313.91	2.30	174.08	20.6	3.1	1.5
12.75	400/100/50	BA 62	24.5	33.7	385	3.00	316.91	2.30	176.38	20.9	3.1	1.6
		Zulauf 15 50 l	50.5	111	435							

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ | $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Ablauf} * V$ | nur bei Ce > Bestimmungsgrenze: $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]			$SM\text{-}Fracht$ [µg]			$SM\text{-}Frachtablauf$ [µg]			
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	
27265.6	56729.5	242766.6	1302.9	2863.8	11223.0	183.2	167.7	2838.0	
27545.5	57344.9	245178.2	280.0	615.4	2411.6	40.5	46.6	903.7	
27866.7	58050.8	247944.8	601.2	1321.3	5178.2	*6.0*	15.5	211.9	
29680.2	62036.8	263565.7	1813.5	3986.0	15620.9	25.1	82.6	434.5	
30025.6	62796.1	266541.1	297.7	654.3	2564.3	*2.9*	*5.9*	49.5	
30325.6	63455.4	269125.0	597.7	1313.7	5148.2	*5.9*	*11.8*	86.4	
32125.4	67411.5	284628.4	1799.8	3956.0	15503.4	*17.8*	60.6	217.4	
32661.7	68590.3	289248.1	536.3	1178.8	4619.7	*5.3*	31.9	69.0	
32907.1	69129.7	291362.2	245.4	539.5	2114.1	70.0	117.1	1521.2	
33152.6	69669.2	293476.3	245.4	539.5	2114.1	78.2	137.1	2434.9	
25766.3	53718.4	226724.2	939.3	2064.6	8091.0	156.2	273.4	5617.2	
25987.8	54205.2	228631.7	221.5	486.8	1907.6	42.5	85.5	1552.4	
26271.1	54827.9	231072.1	504.8	1109.5	4347.9	19.0	96.0	1199.4	
27912.6	58436.0	245211.8	1641.5	3608.1	14139.7	45.5	247.0	3575.6	
28257.2	59193.5	248180.6	303.0	666.0	2610.0	4.2	38.4	714.0	
28570.8	59882.9	250882.0	616.6	1355.3	5311.4	8.5	84.2	1550.7	
30452.5	64018.7	267090.1	1881.6	4135.9	16208.1	41.0	450.8	6893.1	
30688.8	64538.2	269125.9	236.3	519.5	2035.8	4.7	52.9	800.3	
30938.8	65087.6	271279.1	486.3	1068.9	4189.1	10.6	105.9	1531.2	
31152.4	65557.2	273119.2	213.6	469.5	1840.1	101.1	199.7	1912.0	
31366.0	66026.7	274959.2	213.6	469.5	1840.1	112.1	206.0	2026.2	
8684.5	18060.4	77117.3	399.7	878.5	3442.6	83.9	106.0	1511.6	
8770.6	18249.7	77859.2	86.1	189.3	741.9	21.3	32.6	346.2	
8869.1	18466.2	78707.4	184.6	405.8	1590.1	21.9	54.1	307.1	
9413.7	19663.3	83398.9	544.6	1197.1	4691.5	44.2	105.7	680.5	
9499.7	19852.3	84139.5	72.3	159.0	623.1	2.0	4.0	42.5	
9570.2	20007.1	84746.3	142.8	313.9	1230.0	4.0	7.6	82.0	
9687.6	20265.2	85757.7	117.4	258.1	1011.4	7.9	22.6	146.2	
9828.5	20574.9	86971.3	140.9	309.7	1213.7	11.7	36.0	194.5	
9944.4	20829.6	87969.7	115.9	254.7	998.3	45.4	49.6	521.0	
10060.3	21084.4	88968.0	115.9	254.7	998.3	56.2	77.3	883.6	

$C_{SM\text{-}Ablauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmunggrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM,Ablauf}$/$C_{SM,Zulauf}$ * 100)

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V			Beladung [µg/g]			Beladung gesamt [µg/g]			Masse [g]	SM-Rückhalt [%]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	TFIc	Pb	Cu	Zn
1119.7	2696.1	8385.0	9.3	22.4	69.8	219.1	460.2	1895.9	120.2	85.9	94.1	74.7
239.5	568.8	1508.0	2.0	4.7	12.5	221.1	465.0	1908.5		85.5	92.4	62.5
595.2	1305.9	4966.3	5.0	10.9	41.3	226.0	475.8	1949.8		*99.0*	98.8	95.9
1788.3	3903.4	15186.3	14.9	32.5	126.3	240.9	508.3	2076.1		98.6	97.9	97.2
294.8	648.5	2514.8	2.5	5.4	20.9	243.3	513.7	2097.0		*99.0*	*99.1*	98.1
591.8	1301.9	5061.8	4.9	10.8	42.1	248.3	524.5	2139.2		*99.0*	*99.1*	98.3
1782.0	3895.5	15286.0	14.8	32.4	127.2	263.1	556.9	2266.3		*99.0*	98.5	98.6
531.0	1147.0	4550.7	4.4	9.5	37.9	267.5	566.5	2304.2		*99.0*	97.3	98.5
175.4	422.3	592.9	1.5	3.5	4.9	269.0	570.0	2309.1		71.5	78.3	28.0
167.2	402.4	-320.8	1.4	3.3	0.0	270.4	573.3	2309.1		68.1	74.6	-15.2
783.1	1791.2	2473.8	5.3	12.2	16.8	169.1	349.4	1276.9	TFIIb	83.4	86.8	30.6
178.9	401.3	355.2	1.2	2.7	2.4	170.3	352.1	1279.3	147	80.8	82.4	18.6
485.8	1013.5	3148.5	3.3	6.9	21.4	173.6	359.0	1300.7		96.2	91.4	72.4
1596.0	3361.0	10564.1	10.9	22.9	71.9	184.4	381.9	1372.6		97.2	93.2	74.7
298.8	627.6	1896.0	2.0	4.3	12.9	186.5	386.1	1385.5		98.6	94.2	72.6
608.1	1271.1	3760.7	4.1	8.6	25.6	190.6	394.8	1411.1		98.6	93.8	70.8
1840.6	3685.0	9315.0	12.5	25.1	63.4	203.1	419.8	1474.4		97.8	89.1	57.5
231.7	466.6	1235.5	1.6	3.2	8.4	204.7	423.0	1482.8		98.0	89.8	60.7
475.7	963.0	2657.9	3.2	6.6	18.1	207.9	429.6	1500.9		97.8	90.1	63.4
112.5	269.9	-71.9	0.8	1.8	0.0	208.7	431.4	1500.9		52.7	57.5	-3.9
101.5	263.5	-186.1	0.7	1.8	0.0	209.4	433.2	1500.9		47.5	56.1	-10.1
315.8	772.4	1931.0	1.1	2.6	6.6	28.0	58.7	227.8	BA	79.0	87.9	56.1
64.8	156.7	395.7	0.2	0.5	1.4	28.2	59.3	229.2	292	75.2	82.8	53.3
162.7	351.7	1283.1	0.6	1.2	4.4	28.8	60.5	233.5		88.1	86.7	80.7
500.4	1091.4	4010.9	1.7	3.7	13.7	30.5	64.2	247.3		91.9	91.2	85.5
70.3	155.0	580.6	0.2	0.5	2.0	30.7	64.7	249.3		97.2	97.5	93.2
138.8	306.2	1148.0	0.5	1.0	3.9	31.2	65.8	253.2		97.2	97.6	93.3
109.5	235.5	865.1	0.4	0.8	3.0	31.6	66.6	256.2		93.3	91.3	85.5
129.2	273.7	1019.2	0.4	0.9	3.5	32.0	67.5	259.7		91.7	88.4	84.0
70.5	205.2	477.4	0.2	0.7	1.6	32.2	68.2	261.3		60.8	80.5	47.8
59.7	177.4	114.8	0.2	0.6	0.4	32.5	68.8	261.7		51.5	69.6	11.5

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges}$ = SM-Fracht$_{ges}$/SM_A

SM-JF = SM-Fracht/SM_A

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
64.6	67.2	71.9	3.1	3.4	3.3	9.7	10.1	10.8	0.5	0.5	0.5	4.8	5.0	5.4	0.2	0.3	0.2
65.2	67.9	72.6	0.7	0.7	0.7	9.8	10.2	10.9	0.1	0.1	0.1	4.9	5.1	5.4	0.0	0.1	0.1
66.0	68.7	73.4	1.4	1.6	1.5	9.9	10.3	11.0	0.2	0.2	0.2	4.9	5.2	5.5	0.1	0.1	0.1
70.3	73.5	78.0	4.3	4.7	4.6	10.5	11.0	11.7	0.6	0.7	0.7	5.3	5.5	5.9	0.3	0.4	0.3
71.1	74.4	78.9	0.7	0.8	0.8	10.7	11.2	11.8	0.1	0.1	0.1	5.3	5.6	5.9	0.1	0.1	0.1
71.8	75.1	79.7	1.4	1.6	1.5	10.8	11.3	12.0	0.2	0.2	0.2	5.4	5.6	6.0	0.1	0.1	0.1
76.1	79.8	84.3	4.3	4.7	4.6	11.4	12.0	12.6	0.6	0.7	0.7	5.7	6.0	6.3	0.3	0.4	0.3
77.4	81.2	85.6	1.3	1.4	1.4	11.6	12.2	12.8	0.2	0.2	0.2	5.8	6.1	6.4	0.1	0.1	0.1
77.9	81.9	86.3	0.6	0.6	0.6	11.7	12.3	12.9	0.1	0.1	0.1	5.8	6.1	6.5	0.0	0.0	0.0
78.5	82.5	86.9	0.6	0.6	0.6	11.8	12.4	13.0	0.1	0.1	0.1	5.9	6.2	6.5	0.0	0.0	0.0
61.0	63.6	67.1	2.2	2.4	2.4	9.2	9.5	10.1	0.3	0.4	0.4	4.6	4.8	5.0	0.2	0.2	0.2
61.5	64.2	67.7	0.5	0.6	0.6	9.2	9.6	10.2	0.1	0.1	0.1	4.6	4.8	5.1	0.0	0.0	0.0
62.2	64.9	68.4	1.2	1.3	1.3	9.3	9.7	10.3	0.2	0.2	0.2	4.7	4.9	5.1	0.1	0.1	0.1
66.1	69.2	72.6	3.9	4.3	4.2	9.9	10.4	10.9	0.6	0.6	0.6	5.0	5.2	5.4	0.3	0.3	0.3
66.9	70.1	73.5	0.7	0.8	0.8	10.0	10.5	11.0	0.1	0.1	0.1	5.0	5.3	5.5	0.1	0.1	0.1
67.7	70.9	74.3	1.5	1.6	1.6	10.1	10.6	11.1	0.2	0.2	0.2	5.1	5.3	5.6	0.1	0.1	0.1
72.1	75.8	79.1	4.5	4.9	4.8	10.8	11.4	11.9	0.7	0.7	0.7	5.4	5.7	5.9	0.3	0.4	0.4
72.7	76.4	79.7	0.6	0.6	0.6	10.9	11.5	12.0	0.1	0.1	0.1	5.5	5.7	6.0	0.0	0.0	0.0
73.3	77.1	80.3	1.2	1.3	1.2	11.0	11.6	12.0	0.2	0.2	0.2	5.5	5.8	6.0	0.1	0.1	0.1
73.8	77.6	80.9	0.5	0.6	0.5	11.1	11.6	12.1	0.1	0.1	0.1	5.5	5.8	6.1	0.0	0.0	0.0
74.3	78.2	81.4	0.5	0.6	0.5	11.1	11.7	12.2	0.1	0.1	0.1	5.6	5.9	6.1	0.0	0.0	0.0
20.6	21.4	22.8	0.9	1.0	1.0	3.1	3.2	3.4	0.1	0.2	0.2	1.5	1.6	1.7	0.1	0.1	0.1
20.8	21.6	23.0	0.2	0.2	0.2	3.1	3.2	3.5	0.0	0.0	0.0	1.6	1.6	1.7	0.0	0.0	0.0
21.0	21.9	23.3	0.4	0.5	0.5	3.2	3.3	3.5	0.1	0.1	0.1	1.6	1.6	1.7	0.0	0.0	0.0

22.3	23.3	24.7	1.3	1.4	1.4	3.3	3.5	3.7	0.2	0.2	0.2	1.7	1.7	1.9	0.1	0.1	0.1
22.5	23.5	24.9	0.2	0.2	0.2	3.4	3.5	3.7	0.0	0.0	0.0	1.7	1.8	1.9	0.0	0.0	0.0
22.7	23.7	25.1	0.3	0.4	0.4	3.4	3.6	3.8	0.1	0.1	0.1	1.7	1.8	1.9	0.0	0.0	0.0
22.9	24.0	25.4	0.3	0.3	0.3	3.4	3.6	3.8	0.0	0.0	0.0	1.7	1.8	1.9	0.0	0.0	0.0
23.3	24.4	25.7	0.3	0.4	0.4	3.5	3.7	3.9	0.1	0.1	0.1	1.7	1.8	1.9	0.0	0.0	0.0
23.6	24.7	26.0	0.3	0.3	0.3	3.5	3.7	3.9	0.0	0.0	0.0	1.8	1.8	2.0	0.0	0.0	0.0
23.8	25.0	26.3	0.3	0.3	0.3	3.6	3.7	4.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.9	2.0	0.0	0.0	0.0
Av = 15			Av = 15			Av = 100			Av = 100			Av = 200			Av = 200		

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{a,s}$/SM$_{J,s}$

	Js [a] (Av = 15)			Js [a] (Av = 100)			Js [a] (Av = 200)		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
TFIc	78.5	82.5	86.9	11.8	12.4	13.0	5.9	6.2	6.5
TFIIb	74.3	78.2	81.4	11.1	11.7	12.2	5.6	5.9	6.1
BA	23.8	25.0	26.3	3.6	3.7	4.0	1.8	1.9	2.0

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges}, [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]					GrW ... Grenzwert			Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
275.66	55.3	467.2	TF 1C 101	7.1	6.5	110	0.18	0.20	0.50	0.14	0.06	0.25
278.66	56.0	472.7	TF I C 102	7.3	8.4	163	0.18	0.20	0.50	0.14	0.08	0.37
281.66	56.7	479.1	TF 1C 103	0.5	1.3	17.8	0.18	0.20	0.50	0.01	0.01	0.04
298.91	61.0	515.0	TF 1C 104	0.7	2.3	12.1	0.18	0.20	0.50	0.01	0.02	0.03
301.91	61.8	521.9	TF I C 105	0.5	1	8.4	0.18	0.20	0.50	0.01	0.01	0.02
304.91	62.5	527.8	TF 1C 106	0.5	1	7.3	0.18	0.20	0.50	0.01	0.01	0.02
322.91	66.7	563.4	TF 1C 107	0.5	1.7	6.1	0.18	0.20	0.50	0.01	0.02	0.01
328.57	68.0	574.1	TF 1C 109	0.5	3	6.5	0.18	0.20	0.50	0.01	0.03	0.01
331.57	68.6	578.9	TF 1C 110	14.4	24.1	313	0.18	0.20	0.50	0.29	0.22	0.72
334.57	69.1	583.8	TF 1C 111	16.1	28.2	501	0.18	0.20	0.50	0.32	0.25	1.15
275.66	51.8	437.0	TF 2B 98	8.4	14.7	302	0.18	0.20	0.50	0.17	0.13	0.69
278.66	52.3	441.4	TF IIb 99	9.7	19.5	354	0.18	0.20	0.50	0.19	0.18	0.81
281.66	52.9	447.0	TF 2B 99b	1.9	9.6	120	0.18	0.20	0.50	0.04	0.09	0.28
298.91	56.8	479.5	TF 2B 100	1.4	7.6	110	0.18	0.20	0.50	0.03	0.07	0.25
301.91	57.6	486.4	TF IIb 101	0.7	6.4	119	0.18	0.20	0.50	0.01	0.06	0.27
304.91	58.3	492.6	TF 2B 102	0.7	6.9	127	0.18	0.20	0.50	0.01	0.06	0.29
322.91	62.7	529.8	TF 2B 103	1.1	12.1	185	0.18	0.20	0.50	0.02	0.11	0.43
325.57	63.3	534.5	TF IIb 104	1	11.3	171	0.18	0.20	0.50	0.02	0.10	0.39
328.57	63.9	539.5	TF 2B 105	1.1	11	159	0.18	0.20	0.50	0.02	0.10	0.37
331.57	64.4	543.7	TF 2B 106	23.9	47.2	452	0.18	0.20	0.50	0.47	0.43	1.04
334.57	64.9	547.9	TF 2B 107	26.5	48.7	479	0.18	0.20	0.50	0.52	0.44	1.10
275.66	17.7	149.1	BA 53	10.6	13.4	191	0.18	0.20	0.50	0.21	0.12	0.44
278.66	17.9	150.8	BA 54	12.5	19.1	203	0.18	0.20	0.50	0.25	0.17	0.47
281.66	18.1	152.8	BA 55	6	14.8	84	0.18	0.20	0.50	0.12	0.13	0.19
298.91	19.4	163.6	BA 56	4.1	9.8	63.1	0.18	0.20	0.50	0.08	0.09	0.15
301.91	19.6	165.3	BA 57	1.4	2.8	29.7	0.18	0.20	0.50	0.03	0.03	0.07
304.91	19.7	166.7	BA 58	1.4	2.7	29	0.18	0.20	0.50	0.03	0.02	0.07
307.91	20.0	169.0	BA 59	3.4	9.7	62.9	0.18	0.20	0.50	0.07	0.09	0.14
310.91	20.3	171.8	BA 60	4.2	12.9	89.7	0.18	0.20	0.50	0.08	0.12	0.16
313.91	20.6	174.1	BA 61	19.8	21.6	227	0.18	0.20	0.50	0.39	0.19	0.52
316.91	20.9	176.4	BA 62	24.5	33.7	385	0.18	0.20	0.50	0.49	0.30	0.89
			Zulauf 15 50	50.5	111	435						

Analyse 10

16/05/2013 30.04. - 03.05. **Versuchsfortsetzung VR 5**

Probe	#	Nummern
TFIc	D3	112,114,115,117,118
TFIIb	D3	108,110,111,113,114
BA	D3	63,65,66,68,69

Zulauf 16

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

Zn/Cu/Pb [µg/l] $J_A = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_A [a] Av15	J_A [a] Av100	J_A [a] Av200
24.75	400/100/50	TF IC 112	16.7	28.6	615	17.50	352.07	28.35	612.12	72.5	10.9	5.4
24.75	400/100/50	TF IC 114	16.6	27.3	544	6.00	358.07	8.91	621.03	73.5	11.0	5.5
23.5	400/100/50	TF IC 115	16.2	26.2	379	3.00	361.07	4.23	625.26	74.0	11.1	5.6
23.5	400/100/50	TF IC 117	16.3	25.9	431	5.50	366.57	7.76	633.02	75.0	11.2	5.6
23	400/100/50	TF IC 118	6.5	12.3	218	16.50	383.07	23.27	656.28	77.7	11.7	5.8
21.50	400/100/50	TF IIb 108	24.8	50.4	473	17.50	352.07	24.68	572.61	67.8	10.2	5.1
21.50	400/100/50	TF IIb 110	25.3	50.1	457	6.00	358.07	7.74	580.35	68.7	10.3	5.2
20.75	400/100/50	TF IIb 111	22.7	40.9	329	3.00	361.07	3.74	584.08	69.2	10.4	5.2
20.75	400/100/50	TF IIb 113	22.5	42.2	350	5.50	366.57	6.85	590.93	70.0	10.5	5.2
20.00	400/100/50	TF IIb 114	10.3	27.4	371	16.50	383.07	20.54	611.47	72.4	10.9	5.4
12.25	400/100/50	BA 63	15.3	24.4	324	17.50	334.41	13.39	189.77	22.5	3.4	1.7
12.25	400/100/50	BA 65	14.3	24.7	319	6.00	340.41	4.41	194.18	23.0	3.4	1.7
12.50	400/100/50	BA 66	14.1	21.7	252	3.00	343.41	2.25	196.43	23.3	3.5	1.7
12.50	400/100/50	BA 68	17.2	33.9	320	5.50	348.91	4.13	200.55	23.7	3.6	1.8
12.00	400/100/50	BA 69	7.2	13.1	153	16.50	365.41	12.38	212.93	25.2	3.8	1.9
		Zulauf 16 50 (	52	112	661							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_A ... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Ablauf} * V$ nur bei Ce > Bestimmungsgrenze $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]			$SM\text{-}Fracht$ [µg]			$SM\text{-}Frachtablauf$ [µg]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
34626.8	72844.4	312215.6	1474.2	3175.2	18739.4	473.4	810.8	17435.3
35090.1	73842.3	318105.1	463.3	997.9	5889.5	147.9	243.2	4847.0
35310.0	74316.1	320901.2	220.0	473.8	2796.0	68.5	110.8	1603.2
35713.3	75184.6	326027.2	403.3	868.6	5126.1	126.4	200.9	3342.4
36923.1	77790.3	341405.4	1209.8	2605.7	15378.2	151.2	286.2	5071.8
32649.1	68790.3	291269.4	1283.1	2763.6	16310.2	611.9	1243.6	11671.3
33051.6	69657.2	296385.6	402.5	866.9	5116.1	195.8	387.8	3537.2
33245.8	70075.5	298854.4	194.2	418.3	2468.8	84.8	152.8	1228.8
33601.9	70842.4	303380.6	356.1	766.9	4526.2	154.1	289.0	2396.6
34670.1	73143.2	316959.2	1068.2	2300.8	13578.6	211.6	562.9	7621.3
10756.4	22583.8	97817.1	696.2	1499.4	8849.1	204.8	326.7	4337.6
10985.7	23077.7	100732.1	229.3	493.9	2915.0	68.1	108.9	1406.8
11102.7	23329.7	102219.4	117.0	252.0	1487.3	31.7	48.8	567.0
11317.2	23791.7	104946.0	214.5	462.0	2726.6	71.0	139.8	1320.0
11960.7	25177.7	113125.9	643.5	1386.0	8179.9	89.1	162.1	1893.4

$C_{SM\text{-}Ablauf}$ ... Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen $SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V			Beladung [µg/g]			Beladung gesamt [µg/g]			Masse [g]	SM-Rückhalt [%]		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	TFIc	Pb	Cu	Zn
1000.8	2364.4	1304.1	8.3	19.7	10.8	278.7	593.0	2320.0	120.2	67.9	74.5	7.0
315.4	754.7	1042.5	2.6	6.3	8.7	281.3	599.3	2328.6		68.1	75.6	17.7

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

151.4	362.9	1192.9	1.3	3.0	9.9	282.6	602.3	2338.6		68.8	76.6	42.7
276.9	667.7	1783.7	2.3	5.6	14.8	284.9	607.9	2353.4		68.7	76.9	34.8
1058.6	2319.5	10306.4	8.8	19.3	85.7	293.7	627.2	2439.1		87.5	89.0	67.0
671.2	1520.0	4638.9	4.6	10.3	31.6	214.0	443.5	1532.5	TFIIb	52.3	55.0	28.4
206.7	479.1	1579.0	1.4	3.3	10.7	215.4	446.8	1543.2	147	51.3	55.3	30.9
109.4	265.6	1240.0	0.7	1.8	8.4	216.1	448.6	1551.7		56.3	63.5	50.2
202.0	478.0	2129.6	1.4	3.3	14.5	217.5	451.9	1566.1		56.7	62.3	47.0
856.6	1737.9	5957.3	5.8	11.8	40.5	223.3	463.7	1606.7		80.2	75.5	43.9
491.3	1172.7	4511.6	1.7	4.0	15.5	34.1	72.9	277.1	BA	70.6	78.2	51.0
166.3	385.0	1508.2	0.6	1.3	5.2	34.7	74.2	282.3	292.0	72.5	77.9	51.7
85.3	203.2	920.3	0.3	0.7	3.2	35.0	74.9	285.4		72.9	80.6	61.9
143.6	322.2	1406.6	0.5	1.1	4.8	35.5	76.0	290.3		66.9	69.7	51.6
554.4	1223.9	6286.5	1.9	4.2	21.5	37.4	80.2	311.8		86.2	88.3	76.9

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges}$ = SM-Fracht$_{ges}$/SM_J. SM-JF = SM-Fracht/SM_J.

SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten			SM-Jahresfrachten$_{ges}$			SM-Jahresfrachten		
Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
82.0	86.3	92.4	3.5	3.8	5.5	12.3	12.9	13.9	0.5	0.6	0.8	6.2	6.5	6.9	0.3	0.3	0.4
83.1	87.4	94.2	1.1	1.2	1.7	12.5	13.1	14.1	0.2	0.2	0.3	6.2	6.6	7.1	0.1	0.1	0.1
83.6	88.0	95.0	0.5	0.6	0.8	12.5	13.2	14.3	0.1	0.1	0.1	6.3	6.6	7.1	0.0	0.0	0.1
84.6	89.0	96.5	1.0	1.0	1.5	12.7	13.4	14.5	0.1	0.2	0.2	6.3	6.7	7.2	0.1	0.1	0.1
87.4	92.1	101.1	2.9	3.1	4.6	13.1	13.8	15.2	0.4	0.5	0.7	6.6	6.9	7.6	0.2	0.2	0.3
77.3	81.5	86.2	3.0	3.3	4.8	11.6	12.2	12.9	0.5	0.5	0.7	5.8	6.1	6.5	0.2	0.2	0.4
78.3	82.5	87.7	1.0	1.0	1.5	11.7	12.4	13.2	0.1	0.2	0.2	5.9	6.2	6.6	0.1	0.1	0.1
78.7	83.0	88.5	0.5	0.5	0.7	11.8	12.4	13.3	0.1	0.1	0.1	5.9	6.2	6.6	0.0	0.0	0.1
79.6	83.9	89.8	0.8	0.9	1.3	11.9	12.6	13.5	0.1	0.1	0.2	6.0	6.3	6.7	0.1	0.1	0.1
82.1	86.6	93.8	2.5	2.7	4.0	12.3	13.0	14.1	0.4	0.4	0.6	6.2	6.5	7.0	0.2	0.2	0.3
25.5	26.7	29.0	1.6	1.8	2.6	3.8	4.0	4.3	0.2	0.3	0.4	1.9	2.0	2.2	0.1	0.1	0.2
26.0	27.3	29.8	0.5	0.6	0.9	3.9	4.1	4.5	0.1	0.1	0.1	2.0	2.0	2.2	0.0	0.0	0.1
26.3	27.6	30.3	0.3	0.3	0.4	3.9	4.1	4.5	0.0	0.0	0.1	2.0	2.1	2.3	0.0	0.0	0.0
26.8	28.2	31.1	0.5	0.5	0.8	4.0	4.2	4.7	0.1	0.1	0.1	2.0	2.1	2.3	0.0	0.0	0.1
28.3	29.8	33.5	1.5	1.6	2.4	4.2	4.5	5.0	0.2	0.2	0.4	2.1	2.2	2.5	0.1	0.1	0.2
Av = 15			Av = 15			Av = 100			Av = 100			Av = 200			Av = 200		

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM_J.

	Js [a] (Av = 15)			Js [a] (Av = 100)			Js [a] (Av = 200)		
	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn
TFIc	87.4	92.1	101.1	13.1	13.8	15.2	6.6	6.9	7.6
TFIIb	82.1	86.6	93.8	12.3	13.0	14.1	6.2	6.5	7.0
BA	28.3	29.8	33.5	4.2	4.5	5.0	2.1	2.2	2.5

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_A [a] Av15	Vges [L]		GrW ... Grenzwert						Ce/Ci		
			Probe	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	Cu [µg/l]	GrW Pb	GrW Cu	GrW Zn	Pb	Cu	Zn
352.07	72.5	612.1	TF IC 112	16.7	28.6	615	0.17	0.20	0.50	0.32	0.26	0.93
358.07	73.5	621.0	TF IC 114	16.6	27.3	544	0.17	0.20	0.50	0.32	0.24	0.82
361.07	74.0	625.3	TF IC 115	16.2	26.2	379	0.17	0.20	0.50	0.31	0.23	0.57
366.57	75.0	633.0	TF IC 117	16.3	25.9	431	0.17	0.20	0.50	0.31	0.23	0.65
383.07	77.7	656.3	TF IC 118	6.5	12.3	218	0.17	0.20	0.50	0.13	0.11	0.33
352.07	67.8	572.6	TF IIb 108	24.8	50.4	473	0.17	0.20	0.50	0.48	0.45	0.72
358.07	68.7	580.3	TF IIb 110	25.3	50.1	457	0.17	0.20	0.50	0.49	0.45	0.69
361.07	69.2	584.1	TF IIb 111	22.7	40.9	329	0.17	0.20	0.50	0.44	0.37	0.50
366.57	70.0	590.9	TF IIb 113	22.5	42.2	350	0.17	0.20	0.50	0.43	0.38	0.53
383.07	72.4	611.5	TF IIb 114	10.3	27.4	371	0.17	0.20	0.50	0.20	0.24	0.56
334.41	22.5	189.8	BA 63	15.3	24.4	324	0.17	0.20	0.50	0.29	0.22	0.49
340.41	23.0	194.2	BA 65	14.3	24.7	319	0.17	0.20	0.50	0.28	0.22	0.48
343.41	23.3	196.4	BA 66	14.1	21.7	252	0.17	0.20	0.50	0.27	0.19	0.38
348.91	23.7	200.6	BA 68	17.2	33.9	320	0.17	0.20	0.50	0.33	0.30	0.48
365.41	25.2	212.9	BA 69	7.2	13.1	153	0.17	0.20	0.50	0.14	0.12	0.23

Analyse 12

Neue Säulen mit d = 32 mm, Versuchsreihe 6, oben nach unten

28/05/2013 14.05. - 21.05.13

Probe	ø	Nummern
TFIb	D3	1,4,5,6,8,9,11
Zulauf 17		

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

PbCrNi/Cu/Zn [µg/l]

$J_x = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
46.50	400/100/50	TF I B 1	*0.5*	3.3	5.5	*0.5*	5.8	3.00	3.00	8.37	8.37	1.0	0.1	0.1
54.00	400/100/50	TF I B 4	0.6	4.5	7.1	*0.5*	11.8	23.17	26.17	61.96	70.33	8.3	1.2	0.6
54.00	400/100/50	TF I B 5	0.8	9.4	16.2	*0.5*	20.2	3.00	29.17	9.72	80.05	9.5	1.4	0.7
50.00	400/100/50	TF I B 6	2.2	9.7	16.7	1.7	24.9	17.33	46.50	54.15	134.20	15.9	2.4	1.2
59.00	400/100/50	TF I B 8	4.7	15.4	30.8	4.6	52.2	6.00	52.50	21.11	155.30	18.4	2.8	1.4
58.00	400/100/50	TF I B 9	5.7	8.7	14.1	8.6	53.4	18.00	70.50	63.12	218.42	25.9	3.9	1.9
59.00	400/100/50	TF I B 11	2.4	10.5	21.1	4.6	39.9	6.00	76.50	21.00	239.42	28.4	4.3	2.1
		Zulauf Cr,Pb,I	64.1	53.2	119	55.6	471							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_x... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$

$SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

$SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
536.5	445.3	996.0	465.4	3942.3	536.5	445.3	996.0	465.4	3942.3	*4.2*	27.6	46.0	*4.2*	48.5
4508.0	3741.4	8369.0	3910.2	33124.4	3971.5	3296.2	7373.0	3444.9	29182.1	37.2	278.8	439.9	*31.0*	731.1
5131.1	4258.5	9525.7	4450.7	37702.5	623.1	517.1	1156.7	540.4	4578.1	7.8	91.4	157.5	*4.9*	196.3
8602.1	7139.3	15969.5	7461.4	63207.2	3471.0	2880.8	6443.9	3010.7	25504.7	119.1	525.3	904.3	92.1	1348.3
9954.9	8262.1	18481.0	8634.8	73147.6	1352.8	1122.8	2511.5	1173.4	9940.5	99.2	325.0	650.0	97.1	1101.7
14000.9	11620.1	25992.3	12144.3	102877.1	4046.0	3358.0	7511.3	3509.5	29729.5	359.8	549.1	890.0	542.8	3370.6
15347.0	12737.3	28491.3	13311.9	112768.1	1346.1	1117.2	2499.0	1167.6	9891.0	50.4	220.5	443.1	96.6	837.9

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
532.3	417.7	950.0	461.2	3893.7	4.0	3.2	7.2	3.5	29.4	4.0	3.2	7.2	3.5	29.4	132.5	99.2	93.8	95.4	99.1	98.8
3934.3	3017.3	6933.1	3413.9	28451.0	29.7	22.8	52.3	25.8	214.7	33.7	25.9	59.5	29.2	244.1		99.1	91.5	94.0	99.1	97.5
615.3	425.7	999.2	535.6	4381.8	4.6	3.2	7.5	4.0	33.1	38.4	29.1	67.0	33.3	277.2		98.8	82.3	86.4	99.1	95.7
3351.9	2355.5	5539.5	2918.7	24156.3	25.3	17.8	41.8	22.0	182.3	63.7	46.9	108.8	55.3	459.5		96.6	81.8	86.0	96.9	94.7
1253.6	797.8	1861.5	1076.4	8838.8	9.5	6.0	14.0	8.1	66.7	73.1	52.9	122.9	63.4	526.2		92.7	71.1	74.1	91.7	88.9
3686.2	2808.8	6621.3	2966.6	26358.9	27.8	21.2	50.0	22.4	198.9	100.9	74.1	172.9	85.8	725.1		91.1	83.6	88.2	84.5	88.7
1295.7	896.7	2055.9	1071.0	9053.1	9.8	6.8	15.5	8.1	68.3	110.7	80.9	188.4	93.9	793.5		96.3	80.3	82.3	91.7	91.5

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{gm,i}$ = SM-Fracht$_{gm,i}$/$SM_{j,i}$. SM-JF = SM-Fracht/$SM_{j,i}$.

SM-Jahresfrachten$_{Av15}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{Av100}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{gm}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
1.3	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.1	1.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
10.7	8.9	9.9	9.3	9.8	9.4	7.8	8.7	8.2	8.6	1.6	1.3	1.5	1.4	1.5	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6
12.2	10.1	11.3	10.5	11.2	1.5	1.2	1.4	1.3	1.4	1.8	1.5	1.7	1.6	1.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
20.4	16.9	18.9	17.7	18.7	8.2	6.8	7.6	7.1	7.6	3.1	2.5	2.8	2.7	2.8	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.5	1.3	1.4	1.3	1.4	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6
23.6	19.6	21.9	20.5	21.7	3.2	2.7	3.0	2.8	2.9	3.5	2.9	3.3	3.1	3.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	1.8	1.5	1.6	1.5	1.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
33.2	27.5	30.8	28.8	30.5	9.6	8.0	8.9	8.3	8.8	5.0	4.1	4.6	4.3	4.6	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	2.5	2.1	2.3	2.2	2.3	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7
36.3	30.2	33.7	31.5	33.4	3.2	2.6	3.0	2.8	2.9	5.5	4.5	5.1	4.7	5.0	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	2.7	2.3	2.5	2.4	2.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{gm,i}$/$SM_{j,i}$.

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb	36.3	30.2	33.7	31.5	33.4	5.5	4.5	5.1	4.7	5.0	2.7	2.3	2.5	2.4	2.5

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wann Ce/Ci größer Granzwert

$t_{gm,i}$ [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]							GrW ... Grenzwert					Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
3.00	1.0	8.4	TFIB 1	0.5	3.3	5.5	0.5	5.8	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.01	0.06	0.05	0.01	0.01
26.17	8.3	70.3	TFIB 4	0.6	4.5	7.1	0.5	11.8	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.01	0.08	0.06	0.01	0.03
29.17	9.5	80.0	TFIB 5	0.8	9.4	16.2	0.5	20.2	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.01	0.18	0.14	0.01	0.04
46.50	15.9	134.2	TFIB 6	2.2	9.7	16.7	1.7	24.9	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.03	0.18	0.14	0.03	0.05
52.50	18.4	155.3	TFIB 8	4.7	15.4	30.8	4.6	52.2	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.07	0.29	0.26	0.08	0.11
70.50	25.9	218.4	TFIB 9	5.7	8.7	14.1	8.6	58.4	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.09	0.16	0.12	0.15	0.11
76.50	28.4	239.4	TFIB 11	2.4	10.5	21.1	4.6	39.9	0.14	0.85	0.20	0.32	0.50	0.04	0.20	0.18	0.08	0.08
			Zulauf Cr,Pb	64.1	53.2	119	55.6	471										

Analyse 13 **Versuchsfortführung VR 6**

14/06/2013 21.05. - 24.05.13

Probe ø Nummern

TFIb D3 12,14,16,17,20,21,23

Zulauf 20

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

PbCrNi/Cu/Zn [µg/l] J_s = V_{gm}/Q_s

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{gm} [h]	V [L]	V_{gm} [L]	J_s [a] Av15	J_s [a] Av100	J_s [a] Av200
53.00	400/100/50	TFIB 12	2.7	7.7	16.2	4.8	29.2	3.00	79.50	10.62	250.04	29.6	4.4	2.2
21.00	400/100/50	TFIB 14	1.7	4	9.6	3.2	19.5	20.00	99.50	30.96	281.00	33.3	5.0	2.5
48.00	400/100/50	TFIB 16	2.3	7.7	16.8	4.3	31.1	6.00	105.50	9.84	290.84	34.4	5.2	2.6
48.00	400/100/50	TFIB 17	1.9	5.2	11.1	3.6	24.1	16.00	121.50	46.08	336.92	39.9	6.0	3.0
48.00	400/100/50	TFIB 20	2.8	10.5	24.1	10.3	83.7	9.00	130.50	25.92	362.84	43.0	6.4	3.2
48.00	400/100/50	TFIB 21	1.8	8.5	18.9	10.4	77.8	15.00	145.50	43.20	406.04	48.1	7.2	3.6
48.00	400/100/50	TFIB 23	1.8	10.7	22.6	9.6	69.9	7.00	152.50	20.16	426.20	50.5	7.6	3.8
		Zulauf Cr,Pb,I	60.6	52.9	123	57.4	450							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{gm} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{gm} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_s ... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_s ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM,Zulauf} * V_{ges}$ — $SM\text{-}Fracht = C_{SM,Zulauf} * V$ — nur bei Ce > Bestimmungsgrenze — $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
15990.6	13299.1	29797.6	14618.2	117547.1	643.6	561.8	1306.3	609.6	4779.0	28.7	81.8	172.0	51.0	310.1
17866.7	14936.9	33605.7	18426.2	131479.1	1876.2	1637.8	3808.1	1777.1	13932.0	52.6	123.8	297.2	99.1	603.7
18463.1	15457.4	34816.0	19636.6	135907.1	596.3	520.5	1210.3	564.8	4428.0	22.6	75.8	165.3	42.3	306.0
21255.5	17895.0	40483.8	25304.4	156643.1	2792.4	2437.6	5667.8	2645.0	20736.0	87.6	239.6	511.5	165.9	1110.5
22826.3	19266.2	43672.0	28492.6	168307.1	1570.8	1371.2	3188.2	1487.8	11664.0	72.6	272.2	624.7	267.0	2369.5
25444.2	21551.5	48985.6	33806.2	187747.1	2617.9	2285.3	5313.6	2479.7	19440.0	77.8	367.2	816.5	449.3	3861.0
26685.9	22618.0	51465.3	36285.8	196819.1	1221.7	1066.5	2479.7	1157.2	9072.0	36.3	215.7	455.6	193.5	1409.2

$C_{SM,Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]
$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]
SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird [µg]
SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist [µg]
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM,ablauf}/C_{SM,Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFlb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
614.9	480.0	1134.2	558.6	4468.9	4.6	3.6	8.6	4.2	33.7	115.4	84.5	196.9	98.1	827.2	132.5	95.5	85.4	86.8	91.6	93.5
1823.5	1513.9	3510.9	1678.0	13328.3	13.8	11.4	26.5	12.7	100.6	129.1	98.0	223.4	110.8	927.8		97.2	92.4	92.2	94.4	95.7
573.7	444.8	1045.0	522.5	4122.0	4.3	3.4	7.9	3.9	31.1	133.4	99.3	231.3	114.7	958.9		96.2	85.4	86.3	92.5	93.1
2704.9	2138.0	5156.4	2479.1	19625.5	20.4	16.6	38.9	18.7	148.1	153.9	115.9	270.2	133.4	1107.0		96.9	90.2	91.0	93.7	94.6
1498.2	1099.0	2563.5	1220.8	9494.5	11.3	8.3	19.3	9.2	71.7	165.2	124.2	289.6	142.7	1178.7		95.4	80.2	80.4	82.1	81.4
2540.2	1918.1	4497.1	2080.4	16079.0	19.2	14.5	33.9	15.3	121.4	184.3	138.7	323.5	158.0	1300.0		97.0	83.9	84.6	81.9	82.7
1185.4	850.8	2024.1	963.6	7662.8	8.9	6.4	15.3	7.3	57.8	193.3	145.1	338.8	165.3	1357.8		97.0	79.8	81.6	83.3	84.5

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)
kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze
SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges} = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_{J.}$ — $SM\text{-}JF = SM\text{-}Fracht/SM_{J.}$

$SM\text{-}Jahresfrachten_{ges}$					SM-Jahresfrachten					$SM\text{-}Jahresfrachten_{ges}$					SM-Jahresfrachten					$SM\text{-}Jahresfrachten_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
37.9	31.5	35.3	34.6	34.8	1.5	1.3	1.5	1.4	1.4	5.7	4.7	5.3	5.2	5.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.8	2.4	2.6	2.6	2.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
42.3	35.4	39.8	43.6	38.9	4.4	3.9	4.5	4.2	4.1	6.3	5.3	6.0	6.5	5.8	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	3.2	2.7	3.0	3.3	2.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
43.7	36.6	41.2	46.5	40.2	1.4	1.2	1.4	1.3	1.3	6.6	5.5	6.2	7.0	6.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	3.3	2.7	3.1	3.5	3.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
50.3	42.4	47.9	59.9	46.4	6.6	5.8	6.7	6.3	6.1	7.6	6.4	7.2	9.0	7.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	3.8	3.2	3.6	4.5	3.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
54.1	45.6	51.7	67.5	49.8	3.7	3.2	3.8	3.5	3.5	8.1	6.8	7.8	10.1	7.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	4.1	3.4	3.9	5.1	3.7	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
60.3	51.0	58.0	80.1	55.6	6.2	5.4	6.3	5.9	5.8	9.0	7.7	8.7	12.0	8.3	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	4.5	3.8	4.4	6.0	4.2	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4
63.2	53.6	60.9	85.9	58.3	2.9	2.5	2.9	2.7	2.7	9.5	8.0	9.1	12.9	8.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	4.7	4.0	4.6	6.4	4.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

$J_x = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_{J.}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFlb	63.2	53.6	60.9	85.9	58.3	9.5	8.0	9.1	12.9	8.7	4.7	4.0	4.6	6.4	4.4

Durchbruchsermittlung

AV15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_x [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert										Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
79.50	29.6	250.0	TFlB 12	2.7	7.7	16.2	4.8	29.2	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.04	0.15	0.13	0.08	0.06
99.50	33.3	281.0	TFlB 14	1.7	4	9.6	3.2	19.5	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.03	0.08	0.08	0.06	0.04
105.50	34.4	290.8	TFlB 16	2.3	7.7	16.8	4.3	31.1	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.04	0.15	0.14	0.07	0.07
121.50	39.9	336.9	TFlB 17	1.9	5.2	11.1	3.6	24.1	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.03	0.10	0.09	0.06	0.05
130.50	43.0	362.8	TFlB 20	2.8	10.5	24.1	10.3	83.7	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.05	0.20	0.20	0.18	0.19
145.50	48.1	406.0	TFlB 21	1.8	8.5	18.9	10.4	77.8	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.03	0.16	0.15	0.18	0.17
152.50	50.5	426.2	TFlB 23	1.8	10.7	22.6	9.6	69.9	0.15	0.85	0.20	0.31	0.50	0.03	0.20	0.18	0.17	0.16

Zulauf Cr,Pb	60.6	52.9	123	57.4	450	

Analyse 14 **Versuchsfortführung VR 6**

im Juli 2013

Probe # Nummern

TFIb D3 24,27,28,32,35,36,38,39,40,41,42,43,46,47,48,49,52,53,56,58,60,61,63,64,66

Zulauf 4,5,7,8,9

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

PbCrNi/Cu/Zn [µg/l]

$J_a = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_a [a] Av15	J_a [a] Av100	J_a [a] Av200
48.00	400/100/50	TFIB 24	0.6	3.1	6.3	2.2	13.7	2.00	154.50	5.76	431.96	51.2	7.7	3.8
48.00	400/100/50	TFIB 27	3.8	3.3	7.3	3.2	19.6	6.00	160.50	17.28	449.24	53.2	8.0	4.0
48.00	400/100/50	TFIB 28	1.1	4.5	10	4.6	27.5	16.00	176.50	46.08	495.32	58.7	8.8	4.4
48.00	400/100/50	TFIB 32	0.8	10.6	22.9	7.4	57.3	8.00	184.50	23.04	518.36	61.4	9.2	4.6
48.00	400/100/50	TFIB 35	0.8	9	19.4	8.2	65	24.00	208.50	69.12	587.48	69.6	10.4	5.2
48.00	400/100/50	TFIB 36	0.8	10.5	22.4	8.5	65.3	16.00	224.50	46.08	633.56	75.0	11.3	5.6
50.00	400/100/50	TFIB 38	0.9	12.7	26.8	8.7	70.3	4.00	228.50	11.76	645.32	76.4	11.5	5.7
50.00	400/100/50	TFIB 39	1.3	11.2	19.8	3.4	29.1	4.00	232.50	12.00	657.32	77.8	11.7	5.8
50.00	400/100/50	TFIB 40	1	7.9	17.7	7.4	62.6	3.00	235.50	9.00	666.32	78.9	11.8	5.9
50.00	400/100/50	TFIB 41	1.2	7.7	19.8	10.6	111	2.00	237.50	6.00	672.32	79.6	11.9	6.0
50.00	400/100/50	TFIB 42	0.9	5.2	16.4	15.9	136	16.30	253.80	48.90	721.22	85.4	12.8	6.4
50.00	400/100/50	TFIB 43	0.9	5.3	15.9	15.7	131	2.00	255.80	6.00	727.22	86.1	12.9	6.5
50.00	400/100/50	TFIB 46	1	5.7	14.9	15.5	123	6.00	261.80	18.00	745.22	88.2	13.2	6.6
50.00	400/100/50	TFIB 47	1	6.5	15.8	13.4	179	15.30	277.10	45.90	791.12	93.7	14.1	7.0
50.00	400/100/50	TFIB 48	0.9	7.3	16.7	13.4	104	2.00	279.10	6.00	797.12	94.4	14.2	7.1
50.00	400/100/50	TFIB 49	0.8	7.6	17.4	12.9	91.8	20.00	299.10	60.00	857.12	101.5	15.2	7.6
50.00	400/100/50	TFIB 52	0.7	8.4	18.7	15.1	108	6.00	305.10	18.00	875.12	103.6	15.5	7.8
44.00	400/100/50	TFIB 53	0.6	3.2	12.6	18.8	137	18.00	323.10	47.52	922.64	109.3	16.4	8.2
44.00	400/100/50	TFIB 56	0.6	5.2	16.5	18.9	135	6.00	329.10	15.84	938.48	111.1	16.7	8.3
47.00	400/100/50	TFIB 58	0.5	4.5	16.6	17.9	131	20.00	349.10	56.40	994.88	117.8	17.7	8.8
47.00	400/100/50	TFIB 60	0.5	1.4	10.4	19.5	146	4.00	353.10	11.28	1006.16	119.1	17.9	8.9
54.00	400/100/50	TFIB 61	0.9	2.8	16.9	24.7	197	14.00	367.10	39.48	1045.64	123.8	18.6	9.3
54.00	400/100/50	TFIB 63	2.3	4.9	34.7	49.7	435	6.00	373.10	19.44	1065.08	126.1	18.9	9.5
50.00	400/100/50	TFIB 64	1.2	2	14.5	20.7	162	1.75	374.85	5.25	1070.33	126.7	19.0	9.5
50.00	400/100/50	TFIB 66	1.5	2.2	18.7	26	201	21.00	395.85	63.00	1133.33	134.2	20.1	10.1
		Zulauf gemitt	55.8	50.2	113.7	55.0	448.3							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} .. Volumen, dass seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_a... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = c_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$

$SM\text{-}Fracht = c_{SM\text{-}Zulauf} * V$

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

SM-Frachtablauf = Ce*V

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
26987.4	22907.3	52120.4	36602.5	199401.5	321.5	289.3	655.1	316.6	2582.4	3.5	17.9	36.3	12.7	78.9
27951.9	23775.3	54085.7	37552.3	207148.7	964.5	868.0	1965.3	949.8	7747.2	65.7	57.0	126.1	55.3	338.7
30523.9	26090.1	59326.5	40085.1	227807.9	2572.0	2314.8	5240.8	2532.9	20659.2	50.7	207.4	460.8	212.0	1267.2
31809.9	27247.5	61946.9	41351.6	238137.5	1286.0	1157.4	2620.4	1266.4	10329.6	18.4	244.2	527.6	170.5	1320.2
35668.0	30719.6	69808.2	45150.9	269126.3	3858.0	3472.1	7861.2	3799.3	30988.8	55.3	622.1	1340.9	566.8	4492.8
38240.0	33034.3	75049.0	47683.7	289785.5	2572.0	2314.8	5240.8	2532.9	20659.2	36.9	483.8	1032.2	391.7	3009.0
38896.4	33625.1	76386.5	48330.1	295057.9	656.4	590.7	1337.5	646.4	5272.4	10.6	149.4	315.2	102.3	826.7
39566.2	34227.9	77751.3	48989.7	300437.9	669.8	602.8	1364.8	659.6	5380.0	15.6	134.4	237.6	40.8	349.2
40068.6	34680.0	78774.9	49484.4	304472.9	502.4	452.1	1023.6	494.7	4035.0	9.0	71.1	159.3	66.6	563.4
40403.5	34981.4	79457.3	49814.2	307162.9	334.9	301.4	682.4	329.8	2690.0	7.2	46.2	118.8	63.6	666.0
43132.9	37437.8	85018.9	52502.1	329086.4	2729.4	2456.4	5561.6	2687.9	21923.5	44.0	254.3	802.0	777.5	6650.4
43467.8	37739.2	85701.3	52831.9	331776.4	334.9	301.4	682.4	329.8	2690.0	5.4	31.8	95.4	94.2	786.0
44472.5	38643.4	87748.5	53821.3	339846.4	1004.7	904.2	2047.2	989.4	8070.0	18.0	102.6	268.2	279.0	2214.0
47034.5	40949.1	92968.8	56344.3	360424.9	2562.0	2305.7	5220.4	2523.0	20578.5	45.9	298.4	725.2	615.1	8216.1
47369.4	41250.5	93651.2	56674.1	363114.9	334.9	301.4	682.4	329.8	2690.0	5.4	43.8	100.2	80.4	624.0
50718.4	44264.5	100475.2	59972.1	390014.9	3349.0	3014.0	6824.0	3298.0	26900.0	48.0	456.0	1044.0	774.0	5508.0
51723.1	45168.7	102522.4	60961.5	398084.9	1004.7	904.2	2047.2	989.4	8070.0	12.6	151.2	336.6	271.8	1944.0
54375.5	47555.8	107927.0	63573.5	419389.7	2652.4	2387.1	5404.6	2612.0	21304.8	28.5	152.1	598.8	893.4	6510.2
55259.6	48351.5	109728.6	64444.2	426491.3	884.1	795.7	1801.5	870.7	7101.6	9.5	82.4	261.4	299.4	2138.4
58407.7	51184.6	116143.1	67544.3	451777.3	3148.1	2833.2	6414.6	3100.1	25286.0	28.2	253.8	936.2	1009.6	7388.4
59037.3	51751.3	117426.0	68164.3	456834.5	629.6	566.6	1282.9	620.0	5057.2	5.6	15.8	117.3	220.0	1646.9
61240.9	53734.5	121916.2	70334.4	474534.7	2203.6	1983.2	4490.2	2170.1	17700.2	35.5	110.5	667.2	975.2	7777.6
62326.0	54711.0	124127.2	71403.0	483250.3	1085.1	976.5	2211.0	1068.6	8715.6	44.7	95.3	674.6	966.2	8456.4
62619.1	54974.8	124724.3	71691.5	485604.1	293.0	263.7	597.1	288.6	2353.8	6.3	10.5	76.1	108.7	850.5
66135.5	58139.5	131889.5	75154.4	513849.1	3516.5	3164.7	7165.2	3462.9	28245.0	94.5	138.6	1178.1	1638.0	12663.0

$c_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf ..Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM,Ablauf}/C_{SM,Zulauf}$ * 100)

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Rückgehaltene Schwermetallfracht CF*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFIb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
318.0	271.5	618.8	308.9	2503.5	2.4	2.0	4.7	2.3	18.9	195.7	147.1	343.5	167.6	1376.7	132.5	98.9	93.8	94.5	96.0	96.9
898.8	811.0	1839.2	894.5	7408.5	6.8	6.1	13.9	6.8	55.9	202.5	153.3	357.4	174.3	1432.7		93.2	93.4	93.6	94.2	95.6
2521.3	2107.4	4780.0	2320.9	19392.0	19.0	15.9	36.1	17.5	146.4	221.5	169.2	393.4	191.8	1579.0		98.0	91.0	91.2	91.6	93.9
1267.6	913.2	2092.8	1095.9	9009.4	9.6	6.9	15.8	8.3	68.0	231.1	176.1	409.2	200.1	1647.0		98.6	78.9	79.9	86.5	87.2
3802.8	2850.0	6520.3	3232.5	26496.0	28.7	21.5	49.2	24.4	200.0	259.8	197.6	458.4	224.5	1847.0		98.6	82.1	82.9	85.1	85.5
2535.2	1830.9	4208.6	2141.2	17650.2	19.1	13.8	31.8	16.2	133.2	278.9	211.4	490.2	240.6	1980.2		98.6	79.1	80.3	84.5	85.4
645.8	441.4	1022.3	544.1	4445.7	4.9	3.3	7.7	4.1	33.6	283.8	214.7	497.9	244.8	2013.7		98.4	74.7	76.4	84.2	84.3
654.2	468.4	1127.2	618.8	5030.8	4.9	3.5	8.5	4.7	38.0	288.7	218.2	506.4	249.4	2051.7		97.7	77.7	82.6	93.8	93.5
498.4	381.0	864.3	428.1	3471.6	3.7	2.9	6.5	3.2	26.2	292.4	221.1	512.9	252.7	2077.9		98.2	84.3	84.4	86.5	86.0
327.7	255.2	563.6	266.2	2024.0	2.5	1.9	4.3	2.0	15.3	294.9	223.1	517.2	254.7	2093.2		97.9	84.7	82.6	80.7	75.2
2685.4	2202.1	4759.6	1910.4	15273.1	20.3	16.6	35.9	14.4	115.3	315.2	239.7	553.1	269.1	2208.4		98.4	89.6	85.6	71.1	69.7
329.5	269.6	587.0	235.6	1904.0	2.5	2.0	4.4	1.8	14.4	317.7	241.7	557.6	270.9	2222.8		98.4	89.4	86.0	71.4	70.8
986.7	801.6	1779.0	710.4	5856.0	7.4	6.0	13.4	5.4	44.2	325.1	247.8	571.0	276.2	2267.0		98.2	88.7	86.9	71.8	72.6
2516.1	2007.4	4495.1	1907.9	12362.4	19.0	15.1	33.9	14.4	93.3	344.1	262.9	604.9	290.6	2360.3		98.2	87.1	86.1	75.6	60.1
329.5	257.6	582.2	249.4	2066.0	2.5	1.9	4.4	1.9	15.6	346.6	264.8	609.3	292.5	2375.9		98.4	85.5	85.3	75.6	76.8
3301.0	2558.0	5780.0	2524.0	21392.0	24.9	19.3	43.6	19.0	161.4	371.5	284.2	652.9	311.5	2537.4		98.6	84.9	84.7	76.5	79.5
992.1	753.0	1710.6	717.6	6126.0	7.5	5.7	12.9	5.4	46.2	379.0	289.8	665.8	317.0	2583.6		98.7	83.3	83.6	72.5	75.9
2623.9	2235.0	4805.9	1718.6	14794.6	19.8	16.9	36.3	13.0	111.7	398.8	306.7	702.1	329.9	2695.2		98.9	93.6	88.9	65.8	69.4
874.6	713.3	1540.2	571.3	4963.2	6.6	5.4	11.6	4.3	37.5	405.4	312.1	713.7	334.2	2732.7		98.9	89.6	85.5	65.6	69.9
3119.9	2579.4	5478.3	2090.6	17897.6	23.5	19.5	41.3	15.8	135.1	428.9	331.6	755.1	350.0	2867.8		99.1	91.0	85.4	67.4	70.8
624.0	550.8	1165.6	400.1	3410.3	4.7	4.2	8.8	3.0	25.7	433.6	335.7	763.9	353.0	2893.5		99.1	97.2	90.9	64.5	67.4
2168.1	1872.7	3823.0	1194.9	9922.6	16.4	14.1	28.9	9.0	74.9	450.0	349.8	792.7	362.1	2968.4		98.4	94.4	85.1	55.1	56.1
1040.4	881.3	1536.4	102.4	259.2	7.9	6.7	11.6	0.8	2.0	457.9	356.5	804.3	362.8	2970.4		95.9	90.2	69.5	9.6	3.0
286.7	253.2	521.0	179.9	1503.3	2.2	1.9	3.9	1.4	11.3	460.0	358.4	808.2	364.2	2981.7		97.9	96.0	87.3	62.3	63.9
3422.0	3026.1	5987.1	1824.9	15582.0	25.8	22.8	45.2	13.8	117.6	485.8	381.2	853.4	378.0	3099.3		97.3	95.6	83.6	52.7	55.2

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{gr.}$ = SM-Fracht$_{gr.}$/SM_{o}.

SM-JF = SM-Fracht/SM_{o}.

SM-Jahresfrachten$_{kr.}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{kr.}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{gr.}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
63.9	54.3	61.7	86.7	59.0	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	9.6	8.1	9.3	13.0	8.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	4.8	4.1	4.6	6.5	4.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
66.2	56.3	64.0	88.9	61.3	2.3	2.1	2.3	2.2	2.3	9.9	8.4	9.6	13.3	9.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	5.0	4.2	4.8	6.7	4.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
72.3	61.8	70.3	94.9	67.4	6.1	5.5	6.2	6.0	6.1	10.8	9.3	10.5	14.2	10.1	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	5.4	4.6	5.3	7.1	5.1	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
75.3	64.5	73.4	97.9	70.5	3.0	2.7	3.1	3.0	3.1	11.3	9.7	11.0	14.7	10.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	5.7	4.8	5.5	7.3	5.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
84.5	72.8	82.7	106.9	79.7	9.1	8.2	9.3	9.0	9.2	12.7	10.9	12.4	16.0	12.0	1.4	1.2	1.4	1.3	1.4	6.3	5.5	6.2	8.0	6.0	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7
90.6	78.2	88.9	112.9	85.8	6.1	5.5	6.2	6.0	6.1	13.6	11.7	13.3	16.9	12.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	6.8	5.9	6.7	8.5	6.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
92.1	79.6	90.5	114.5	87.4	1.6	1.4	1.6	1.5	1.6	13.8	11.9	13.6	17.2	13.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	6.9	6.0	6.8	8.6	6.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
93.7	81.1	92.1	116.0	88.9	1.6	1.4	1.6	1.6	1.6	14.1	12.2	13.8	17.4	13.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	7.0	6.1	6.9	8.7	6.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
94.9	82.1	93.3	117.2	90.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	14.2	12.3	14.0	17.6	13.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	7.1	6.2	7.0	8.8	6.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
95.7	82.8	94.1	118.0	90.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	14.4	12.4	14.1	17.7	13.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	7.2	6.2	7.1	8.8	6.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
102.2	88.7	100.7	124.3	97.4	6.5	5.8	6.6	6.4	6.5	15.3	13.3	15.1	18.7	14.6	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	7.7	6.7	7.6	9.3	7.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

102.9	89.4	101.5	125.1	98.2	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	15.4	13.4	15.2	18.8	14.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	7.7	6.7	7.6	9.4	7.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
105.3	91.5	103.9	127.5	100.6	2.4	2.1	2.4	2.3	2.4	15.8	13.7	15.6	19.1	15.1	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	7.9	6.9	7.8	9.6	7.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
111.4	97.0	110.1	133.4	106.7	6.1	5.5	6.2	6.0	6.1	16.7	14.5	16.5	20.0	16.0	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	8.4	7.3	8.3	10.0	8.0	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
112.2	97.7	110.9	134.2	107.5	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	16.8	14.7	16.6	20.1	16.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	8.4	7.3	8.3	10.1	8.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
120.1	104.8	119.0	142.0	115.5	7.9	7.1	8.1	7.8	8.0	18.0	15.7	17.8	21.3	17.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	9.0	7.9	8.9	10.7	8.7	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
122.5	107.0	121.4	144.4	117.9	2.4	2.1	2.4	2.3	2.4	18.4	16.0	18.2	21.7	17.7	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	9.2	8.0	9.1	10.8	8.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
128.8	112.6	127.8	150.6	124.2	6.3	5.7	6.4	6.2	6.3	19.3	16.9	19.2	22.6	18.6	0.9	0.8	1.0	0.9	0.9	9.7	8.4	9.6	11.3	9.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
130.9	114.5	129.9	152.6	126.3	2.1	1.9	2.1	2.1	2.1	19.6	17.2	19.5	22.9	18.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	9.8	8.6	9.7	11.4	9.5	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
138.3	121.2	137.5	160.0	133.7	7.5	6.7	7.6	7.3	7.5	20.7	18.2	20.6	24.0	20.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	10.4	9.1	10.3	12.0	10.0	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
139.8	122.6	139.1	161.4	135.2	1.5	1.3	1.5	1.5	1.5	21.0	18.4	20.9	24.2	20.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	10.5	9.2	10.4	12.1	10.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
145.0	127.3	144.4	166.6	140.5	5.2	4.7	5.3	5.1	5.2	21.8	19.1	21.7	25.0	21.1	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	10.9	9.5	10.8	12.5	10.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
147.6	129.6	147.0	169.1	143.1	2.6	2.3	2.6	2.5	2.6	22.1	19.4	22.0	25.4	21.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	11.1	9.7	11.0	12.7	10.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
148.3	130.2	147.7	169.8	143.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	22.2	19.5	22.2	25.5	21.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	11.1	9.8	11.1	12.7	10.8	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
156.6	137.7	156.2	178.0	152.1	8.3	7.5	8.5	8.2	8.4	23.5	20.7	23.4	26.7	22.8	1.2	1.1	1.3	1.2	1.3	11.7	10.3	11.7	13.3	11.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_s$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb	156.6	137.7	156.2	178.0	152.1	23.5	20.7	23.4	26.7	22.8	11.7	10.3	11.7	13.3	11.4

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]							GrW ... Grenzwert					Ce/Ci					
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
154.50	51.2	432.0	TFIB 24	0.6	3.1	6.3	2.2	13.7	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.06	0.06	0.04	0.03
160.50	53.2	449.2	TFIB 27	3.8	3.3	7.3	3.2	19.6	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.07	0.07	0.06	0.06	0.04
176.50	58.7	495.3	TFIB 28	1.1	4.5	10	4.6	27.5	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.09	0.09	0.08	0.06
184.50	61.4	518.4	TFIB 32	0.8	10.6	22.9	7.4	57.3	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.21	0.20	0.13	0.13
208.50	69.6	587.5	TFIB 35	0.8	9	19.4	8.2	65	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.18	0.17	0.15	0.14
224.50	75.0	633.6	TFIB 36	0.8	10.5	22.4	8.5	65.3	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.21	0.20	0.15	0.15
228.50	76.4	645.3	TFIB 38	0.9	12.7	26.8	8.7	70.3	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.25	0.24	0.16	0.16
232.50	77.8	657.3	TFIB 39	1.3	11.2	19.8	3.4	29.1	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.22	0.17	0.06	0.06
235.50	78.9	666.3	TFIB 40	1	7.9	17.7	7.4	62.6	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.16	0.16	0.13	0.14
237.50	79.6	672.3	TFIB 41	1.2	7.7	19.8	10.6	111	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.15	0.17	0.19	0.25
253.80	85.4	721.2	TFIB 42	0.9	5.2	16.4	15.9	136	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.10	0.14	0.29	0.30
255.80	86.1	727.2	TFIB 43	0.9	5.3	15.9	15.7	131	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.11	0.14	0.29	0.29
261.80	88.2	745.2	TFIB 46	1	5.7	14.9	15.5	123	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.11	0.13	0.28	0.27
277.10	93.7	791.1	TFIB 47	1	6.5	15.8	13.4	179	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.13	0.14	0.24	0.40
279.10	94.4	797.1	TFIB 48	0.9	7.3	16.7	13.4	104	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.15	0.15	0.24	0.23
299.10	101.5	857.1	TFIB 49	0.8	7.6	17.4	12.9	91.8	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.15	0.15	0.23	0.20
305.10	103.6	875.1	TFIB 52	0.7	8.4	18.7	15.1	108	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.17	0.16	0.27	0.24
323.10	109.3	922.6	TFIB 53	0.6	3.2	12.6	18.8	137	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.06	0.11	0.34	0.31
329.10	111.1	938.5	TFIB 56	0.6	5.2	16.5	18.9	135	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.10	0.15	0.34	0.30
349.10	117.8	994.9	TFIB 58	0.5	4.5	16.6	17.9	131	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.09	0.15	0.33	0.29
353.10	119.1	1006.2	TFIB 60	0.5	1.4	10.4	19.5	146	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.01	0.03	0.09	0.35	0.33
367.10	123.8	1045.6	TFIB 61	0.9	2.8	16.9	24.7	197	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.06	0.15	0.45	0.44
373.10	126.1	1065.1	TFIB 63	2.3	4.9	34.7	49.7	435	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.04	0.10	0.31	0.90	0.97
374.85	126.7	1070.3	TFIB 64	1.2	2	14.5	20.7	162	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.02	0.04	0.13	0.38	0.36
395.85	134.2	1133.3	TFIB 66	1.5	2.2	18.7	26	201	0.16	0.90	0.20	0.33	0.50	0.03	0.04	0.16	0.47	0.45

Analyse 16 **Versuchsfortführung VR 6**

im Aug 2013

Probe # Nummern

TFlb D3 69,70,72,73,75,77,78,80,83,85,87

Zulauf 10,14

Konzentration, Volumen, Jahre [V]

PbCrNi/Cu/Zn [µg/l] $J_A = V_{ges}/Q_A$

Q_A [ml/min]	Konzentration	Probenbezeich	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_A [a] Av15	J_A [a] Av100	J_A [a] Av200
50.00	400/100/50	TFlb 69	1.4	3.1	23.8	27.3	201	6.00	401.85	18.00	1156.97	137.0	20.6	10.3
50.00	400/100/50	TFlb 70	1.6	4.8	23.2	22.2	152	19.00	420.85	57.00	1213.97	143.8	21.6	10.8
50.00	400/100/50	TFlb 72	5	6.3	30.2	20.9	167	4.00	424.85	12.00	1225.97	145.2	21.8	10.9
50.00	400/100/50	TFlb 73	2.9	5.8	29.7	26.7	197	20.00	444.85	60.00	1285.97	152.3	22.8	11.4
50.00	400/100/50	TFlb 75	1.8	3.1	25.9	29.9	212	4.00	448.85	12.00	1297.97	153.7	23.1	11.5
47.00	400/100/50	TFlb 77	3.4	37.8	75.2	25.6	184	18.50	467.35	55.50	1353.47	160.3	24.0	12.0
47.00	400/100/50	TFlb 79	1.9	4	21.1	21.7	166	4.50	471.85	12.69	1366.16	161.8	24.3	12.1
47.00	400/100/50	TFlb 80	1.4	5.1	24.7	22.7	162	18.50	490.35	52.17	1418.33	168.0	25.2	12.6
47.00	400/100/50	TFlb 83	2	2.9	26.6	34.8	250	6.50	496.85	18.33	1436.66	170.1	25.5	12.8
47.00	400/100/50	TFlb 85	1.2	9.9	33.6	26.2	173	22.00	518.85	62.04	1498.70	177.5	26.6	13.3
47.00	400/100/50	TFlb 87	5	67.6	135	35.3	306	19.00	537.85	53.58	1552.28	183.8	27.6	13.8
		Zulauf gemitt	53.2	48.6	109.5	60.3	432.5							

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} ... Volumen, dass seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_A ... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_A ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ nur bei Ce > Bestimmungsgrenze $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
67392.0	59288.4	134478.1	76578.7	524073.4	956.7	956.7	1971.0	1084.5	7785.0	25.2	55.8	428.4	491.4	3618.0
70421.5	62058.6	140719.6	80013.0	548725.9	3029.6	3029.6	6241.5	3434.3	24652.5	91.2	273.6	1322.4	1265.4	8664.0
71059.3	62641.8	142033.6	80736.0	553915.9	637.8	637.8	1314.0	723.0	5190.0	60.0	75.6	362.4	250.8	2004.0
74248.3	65557.8	148603.6	84351.0	579865.9	3189.0	3189.0	6570.0	3615.0	25950.0	174.0	348.0	1782.0	1602.0	11820.0
74886.1	66141.0	149917.6	85074.0	585055.9	637.8	637.8	1314.0	723.0	5190.0	21.6	37.2	310.8	358.8	2544.0
77835.9	68838.3	155994.8	88417.9	609059.6	2949.8	2949.8	6077.3	3343.9	24003.8	188.7	2097.9	4173.6	1420.8	10212.0
78510.4	69455.0	157384.4	89182.4	614548.1	674.5	674.5	1389.6	764.6	5488.4	24.1	50.8	267.8	275.4	2106.5
81283.3	73990.5	163097.0	92325.7	637111.6	2772.8	2772.8	5712.6	3143.2	22563.5	73.0	266.1	1288.6	1184.3	8451.5
82257.5	72881.3	165104.1	93430.1	645089.3	974.2	974.2	2007.1	1104.4	7927.7	36.7	53.2	487.6	637.9	4582.5
85554.9	75896.4	171897.5	97168.0	671871.6	3297.4	3297.4	6793.4	3737.9	26832.3	74.4	614.2	2084.5	1625.4	10732.9
88402.7	78500.4	177764.5	100396.2	695045.0	2847.8	2847.8	5867.0	3228.2	23173.4	267.9	3622.0	7233.3	1891.4	16395.5

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ ... Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht C*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFlb	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
931.5	900.9	1542.6	593.1	4167.0	7.0	6.8	11.6	4.5	31.4	492.9	388.0	865.1	382.4	3130.8	132.5	97.4	93.6	78.3	54.7	53.5
2938.4	2756.0	4919.1	2168.9	15988.5	22.2	20.8	37.1	16.4	120.7	515.1	408.8	902.2	398.8	3251.4		97.0	90.1	78.8	63.2	64.9
577.8	562.2	951.6	472.2	3186.0	4.4	4.2	7.2	3.6	24.0	519.4	413.1	909.4	402.4	3275.5		90.6	87.0	72.4	65.3	61.4
3015.0	2841.0	4788.0	2013.0	14130.0	22.8	21.4	36.1	15.2	106.6	542.2	434.5	945.5	417.6	3382.1		94.5	88.1	72.9	55.7	54.5
616.2	600.6	1003.2	364.2	2646.0	4.7	4.5	7.6	2.7	20.0	546.8	439.1	953.1	420.3	3402.1		96.6	93.6	76.3	50.4	51.0
2761.1	851.9	1903.7	1923.1	13791.8	20.8	6.4	14.4	14.5	104.1	567.7	445.5	967.5	434.8	3506.2		93.6	22.2	31.3	57.5	57.5
650.4	623.7	1121.8	489.2	3381.9	4.9	4.7	8.5	3.7	25.5	572.6	450.2	975.9	438.5	3531.7		96.4	91.8	80.7	64.0	61.6
2899.8	2506.8	4424.0	1959.0	14112.0	20.4	18.9	33.4	14.8	106.5	592.9	469.1	1009.3	453.3	3638.2		97.4	89.5	77.4	62.3	62.5
937.6	921.1	1519.6	466.5	3345.2	7.1	7.0	11.5	3.5	25.2	600.0	476.1	1020.8	456.8	3663.4		96.2	94.0	75.7	42.2	42.2
3223.0	2683.2	4708.8	2112.5	16099.4	24.3	20.3	35.5	15.9	121.5	624.3	496.3	1056.3	472.8	3785.0		97.7	79.6	69.3	56.5	60.0
2579.9	0.0	0.0	1336.8	6777.9	19.5	0.0	0.0	10.1	51.2	643.8	496.3	1056.3	482.9	3836.1		90.6	-39.1	-29.3	41.4	29.2

Rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges} = SM\text{-}Fracht_{ges}/SM_J$. $SM\text{-}JF = SM\text{-}Fracht/SM_J$.

SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{ges}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
159.6	140.4	159.2	181.4	155.2	2.3	2.3	2.3	2.6	2.3	23.9	21.1	23.9	27.2	23.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	12.0	10.5	11.9	13.6	11.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

166.8	147.0	166.6	189.5	162.4	7.2	7.2	7.4	8.1	7.3	25.0	22.0	25.0	28.4	24.4	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	12.5	11.0	12.5	14.2	12.2	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5
168.3	148.4	168.2	191.2	164.0	1.5	1.5	1.6	1.7	1.5	25.2	22.3	25.2	28.7	24.6	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	12.6	11.1	12.6	14.3	12.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
175.8	155.3	176.0	199.8	171.7	7.6	7.6	7.8	8.6	7.7	26.4	23.3	26.4	30.0	25.8	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	13.2	11.6	13.2	15.0	12.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
177.4	156.6	177.5	201.5	173.2	1.5	1.5	1.6	1.7	1.5	26.6	23.5	26.6	30.2	26.0	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	13.3	11.7	13.3	15.1	13.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
184.3	163.0	184.7	209.4	180.3	7.0	7.0	7.2	7.9	7.1	27.7	24.5	27.7	31.4	27.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	13.8	12.2	13.9	15.7	13.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
185.9	164.5	186.4	211.2	181.9	1.6	1.6	1.6	1.8	1.6	27.9	24.7	28.0	31.7	27.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	13.9	12.3	14.0	15.8	13.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
192.5	170.5	193.1	218.7	188.6	6.6	6.6	6.8	7.4	6.7	28.9	25.6	29.0	32.8	28.3	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	14.4	12.8	14.5	16.4	14.1	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
194.8	172.6	195.5	221.3	191.0	2.3	2.3	2.4	2.6	2.3	29.2	25.9	29.3	33.2	28.6	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	14.6	12.9	14.7	16.6	14.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
202.6	179.8	203.6	230.1	198.9	7.8	7.8	8.0	8.9	7.9	30.4	27.0	30.5	34.5	29.8	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	15.2	13.5	15.3	17.3	14.9	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6
209.4	185.9	210.5	237.8	205.8	6.7	6.7	6.9	7.6	6.9	31.4	27.9	31.6	35.7	30.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	15.7	13.9	15.8	17.8	15.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges}$/SM$_{J_s}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFlb	209.4	185.9	210.5	237.8	205.8	31.4	27.9	31.6	35.7	30.9	15.7	13.9	15.8	17.8	15.4

Durchbruchsermittlung Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

t_{ges} [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]							GrW ... Grenzwert					Ce/Ci				
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
401.85	137.0	1157.0	TFlb 69	1.4	3.1	23.8	27.3	201	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.03	0.06	0.22	0.45	0.46
420.85	143.8	1214.0	TFlb 70	1.6	4.8	23.2	22.2	152	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.03	0.10	0.21	0.37	0.35
424.85	145.2	1226.0	TFlb 72	5	6.3	30.2	20.9	167	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.09	0.13	0.28	0.35	0.39
444.85	152.3	1286.0	TFlb 73	2.9	5.8	29.7	26.7	197	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.05	0.12	0.27	0.44	0.46
448.85	153.7	1298.0	TFlb 75	1.8	3.1	25.9	29.9	212	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.03	0.06	0.24	0.50	0.49
467.35	160.3	1353.5	TFlb 77	3.4	37.8	75.2	25.6	184	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.06	0.78	0.69	0.42	0.43
471.85	161.8	1366.2	TFlb 79	1.9	4	21.1	21.7	166	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.04	0.08	0.19	0.36	0.38
490.35	168.0	1418.3	TFlb 80	1.4	5.1	24.7	22.7	162	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.03	0.10	0.23	0.38	0.37
496.85	170.1	1436.7	TFlb 83	2	2.9	26.6	34.8	250	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.04	0.06	0.24	0.58	0.58
518.85	177.5	1498.7	TFlb 85	1.2	9.9	33.6	26.2	173	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.02	0.20	0.31	0.43	0.40
537.85	183.8	1552.3	TFlb 87	5	67.6	135	35.3	306	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.09	1.39	1.23	0.59	0.71

Analyse 15

Neue Säule mit d = 32, unten nach oben, Versuchsreihe 7

im Juli 2013

Probe	ø	Nummern
TFlb U	D3	1,3,7,8,11,12,15,16,19,20,22,23,26,27,30,31,34,35,37,38,40

Zulauf 4,5,7,8,9

Analyse 15 **Neue Säule mit d = 32, unten nach oben, Versuchsreihe 7**

im Juli 2013

Probe ø Nummern

TFlb U D3 1,3,7,8,11,12,15,16,19,20,22,23,26,27,30,31,34,35,37,38,40

Zulauf 4,5,7,8,9

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

PbCrNi/ Cu/Zn [µg/l]

$J_a = V_{ges}/Q_J$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_a [a] Av15	J_a [a] Av100	J_a [a] Av200
50.00	400/100/50	TFlB u 1	*0.5*	0.6	1	*0.5*	*3*	3.00	3.00	9.00	9.00	1.1	0.2	0.1
50.00	400/100/50	TFlB u 3	*0.5*	0.8	1	*0.5*	*3*	18.30	21.30	54.90	63.90	7.6	1.1	0.6
50.00	400/100/50	TFlB u 7	*0.5*	1.1	1	*0.5*	*3*	8.00	29.30	24.00	87.90	10.4	1.6	0.8
50.00	400/100/50	TFlB u 8	*0.5*	0.9	1	*0.5*	*3*	15.30	44.60	45.90	133.80	15.8	2.4	1.2
50.00	400/100/50	TFlB u 11	*0.5*	1.5	1	*0.5*	*3*	6.00	50.60	18.00	151.80	18.0	2.7	1.3
50.00	400/100/50	TFlB u 12	*0.5*	1.1	1	*0.5*	*3*	17.50	68.10	52.50	204.30	24.2	3.6	1.8
50.00	400/100/50	TFlB u 15	*0.5*	1.2	1	*0.5*	*3*	6.00	74.10	18.00	222.30	26.3	3.9	2.0
50.00	400/100/50	TFlB u 16	*0.5*	1	1	0.5	*3*	17.00	91.10	51.00	273.30	32.4	4.9	2.4
50.00	400/100/50	TFlB u 19	*0.5*	0.5	1	0.5	*3*	6.00	97.10	18.00	291.30	34.5	5.2	2.6
50.00	400/100/50	TFlB u 20	*0.5*	*0.5*	1	*0.5*	*3*	31.30	128.40	93.90	385.20	45.6	6.8	3.4
50.00	400/100/50	TFlB u 22	*0.5*	*0.5*	1	*0.5*	*3*	4.00	132.40	12.00	397.20	47.0	7.1	3.5
50.00	400/100/50	TFlB u 23	*0.5*	*0.5*	1.5	*0.5*	*3*	18.00	150.40	54.00	451.20	53.4	8.0	4.0
50.00	400/100/50	TFlB u 26	*0.5*	*0.5*	1	0.5	*3*	6.00	156.40	18.00	469.20	55.6	8.3	4.2
47.00	400/100/50	TFlB u 27	*0.5*	*0.5*	1	0.7	*3*	18.00	174.40	50.76	519.96	61.6	9.2	4.6
47.00	400/100/50	TFlB u 30	*0.5*	*0.5*	1	0.6	*3*	6.00	180.40	16.92	536.88	63.6	9.5	4.8
49.00	400/100/50	TFlB u 31	*0.5*	*0.5*	1	0.8	*3*	18.00	198.40	52.92	589.80	69.8	10.5	5.2
49.00	400/100/50	TFlB u 34	*0.5*	0.7	1	1	*3*	6.00	204.40	17.64	607.44	71.9	10.8	5.4
54.00	400/100/50	TFlB u 35	*0.5*	*0.5*	1.1	1	3.6	14.00	218.40	41.16	648.60	76.8	11.5	5.8
54.00	400/100/50	TFlB u 37	*0.5*	0.6	2.9	2.6	7.8	6.00	224.40	19.44	668.04	79.1	11.9	5.9
54.00	400/100/50	TFlB u 38	*0.5*	*0.5*	1	2.8	12.8	1.75	226.15	5.25	673.29	79.7	12.0	6.0
50.00	400/100/50	TFlB u 40	*0.5*	*0.5*	1	3.7	17.9	21.00	247.15	63.00	736.29	87.2	13.1	6.5
		Zulauf Mittel	61.14	52.22	113.64	54.64	472.6							

Werte modifiziert

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} ... Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_a... aufberachte Jahresfrachten [a]

Q_J ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$ $SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$ nur bei Ce > Bestimmungsgrenze $SM\text{-}Frachtablauf = Ce * V$

SM-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
550.3	470.0	1022.8	491.8	4253.4	550.3	470.0	1022.8	491.8	4253.4	*4.5*	5.4	*9.0*	*4.5*	*27*
3906.8	3336.9	7261.6	3491.5	30199.1	3356.6	2866.9	6238.8	2999.7	25945.7	*27.5*	43.9	*54.9*	*27.45*	*164.7*
5374.2	4590.1	9989.0	4802.9	41541.5	1467.4	1253.3	2727.4	1311.4	11342.4	*12.0*	26.4	*24.0*	*12*	*72*
8180.5	6987.0	15205.0	7310.8	63233.9	2806.3	2396.9	5216.1	2508.0	21692.3	*23.0*	41.3	45.9	*22.95*	*137.7*
9281.1	7927.0	17250.6	8294.4	71740.7	1100.5	940.0	2045.5	983.5	8506.8	*9.0*	27.0	*18.0*	*9*	*54*
12490.9	10668.5	23216.7	11163.0	96552.2	3209.9	2741.6	5966.1	2868.6	24811.5	*26.3*	57.8	*52.5*	*26.25*	*157.5*
13591.4	11608.5	25262.2	12146.5	105059.0	1100.5	940.0	2045.5	983.5	8506.8	*9.0*	21.6	*18.0*	*9*	*54*
16709.6	14271.7	31057.8	14933.1	129161.6	3118.1	2663.2	5795.6	2786.6	24102.6	*25.5*	51.0	51.0	25.5	*153*
17810.1	15211.7	33103.3	15916.6	137668.4	1100.5	940.0	2045.5	983.5	8506.8	*9.0*	9.0	*18.0*	9	*54*
23551.1	20115.1	43774.1	21047.3	182045.5	5741.0	4903.5	10670.8	5130.7	44377.1	*47.0*	*47.0*	*93.9*	*46.95*	*281.7*
24284.8	20741.8	45137.8	21703.0	187716.7	733.7	626.6	1363.7	655.7	5671.2	*6.0*	*6.0*	*12.0*	*6*	*36*
27586.4	23561.7	51274.4	24653.6	213237.1	3301.6	2819.9	6136.6	2950.6	25520.4	*27.0*	*27.0*	81.0	*27*	*162*
28686.9	24501.6	53319.9	25637.1	221743.9	1100.5	940.0	2045.5	983.5	8506.8	*9.0*	*9.0*	*18.0*	9	*54*
31790.4	27152.3	59088.3	28410.6	245733.1	3103.5	2650.7	5768.4	2773.5	23989.2	*25.4*	*25.4*	*50.8*	35.532	*152.28*
32824.8	28035.9	61011.0	29335.1	253729.5	1034.5	883.6	1922.8	924.5	7996.4	*8.5*	*8.5*	*16.9*	10.152	*50.76*
36060.4	30799.4	67024.9	32226.7	278739.5	3235.5	2763.5	6013.8	2891.5	25010.0	*26.5*	*26.5*	52.9	42.336	*158.76*
37138.9	31720.5	69029.5	33190.5	287076.1	1078.5	921.2	2004.6	963.8	8336.7	*8.8*	12.3	*17.6*	*17.64*	*52.92*
39655.4	33889.3	73706.9	35439.5	306528.4	2516.5	2149.4	4677.4	2249.0	19452.2	*20.6*	*20.6*	45.3	41.16	148.176
40844.0	34885.0	75916.1	36501.7	315715.7	1188.6	1015.2	2209.2	1062.2	9187.3	*9.7*	11.7	56.4	50.544	151.632
41165.0	35159.2	76512.7	36788.6	318196.9	321.0	274.2	596.6	286.9	2481.2	*2.6*	*2.6*	*5.3*	14.7	67.2
45016.8	38449.1	83672.0	40230.9	347970.7	3851.8	3289.9	7159.3	3442.3	29773.8	*31.5*	*31.5*	*63.0*	233.1	1127.7

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ ... Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

$SM\text{-}Rückhalt = 100 - (C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf} * 100)$

Rückgehaltene Schwermetallfracht: Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SM-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFlb U	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
545.8	464.6	1013.8	487.3	4226.4	3.8	3.2	7.0	3.4	29.1	3.8	3.2	7.0	3.4	29.1	145	*99.2*	98.9	*99.1*	*99.1*	*99.4*
3329.1	2823.0	6183.9	2972.3	25781.0	23.0	19.5	42.6	20.5	177.8	26.7	22.7	49.6	23.9	206.9		*99.2*	98.5	*99.1*	*99.1*	*99.4*
1455.4	1226.9	2703.4	1299.4	11270.4	10.0	8.5	18.6	9.0	77.7	36.8	31.1	68.3	32.8	284.7		*99.2*	97.9	*99.1*	*99.1*	*99.4*
2783.4	2355.6	5170.2	2485.0	21554.6	19.2	16.2	35.7	17.1	148.7	56.0	47.4	103.9	50.0	433.3		*99.2*	98.3	*99.1*	*99.1*	*99.4*
1091.5	913.0	2027.5	974.5	8452.8	7.5	6.3	14.0	6.7	58.3	63.5	53.7	117.9	56.7	491.6		*99.2*	97.1	*99.1*	*99.1*	*99.4*
3183.6	2688.8	5913.6	2842.4	24654.0	22.0	18.5	40.8	19.6	170.0	85.4	72.2	158.7	76.3	661.7		*99.2*	97.9	*99.1*	*99.1*	*99.4*
1091.5	918.4	2027.5	974.5	8452.8	7.5	6.3	14.0	6.7	58.3	93.0	78.5	172.7	83.0	719.9		*99.2*	97.7	*99.1*	*99.1*	*99.4*
3092.6	2612.2	5744.6	2761.1	23949.6	21.3	18.0	39.6	19.0	165.2	114.3	96.5	212.3	102.0	885.1		*99.2*	98.1	*99.1*	*99.1*	*99.4*
1091.5	931.0	2027.5	974.5	8452.8	7.5	6.4	14.0	6.7	58.3	121.8	103.0	226.3	108.8	943.4		*99.2*	99.0	*99.1*	*99.1*	*99.4*
5694.1	4856.5	10576.9	5083.7	44095.4	39.3	33.5	72.9	35.1	304.1	161.1	136.4	299.2	143.8	1247.5		*99.2*	*99.0*	*99.1*	*99.1*	*99.4*
727.7	620.6	1351.7	649.7	5635.2	5.0	4.3	9.3	4.5	38.9	166.1	140.7	308.6	148.3	1286.4		*99.2*	*99.0*	*99.1*	*99.1*	*99.4*
3274.6	2792.9	6055.6	2903.6	25358.4	22.6	19.3	41.8	20.2	174.9	188.7	160.0	350.3	168.5	1461.3		*99.2*	*99.0*	98.7	*99.1*	*99.4*
1091.5	931.0	2027.5	974.5	8452.8	7.5	6.4	14.0	6.7	58.3	196.2	166.4	364.3	175.2	1519.6		*99.2*	*99.0*	*99.1*	99.1	*99.4*
3078.1	2625.3	5717.6	2738.0	23836.9	21.2	18.1	39.4	18.9	164.4	217.5	184.5	403.7	194.1	1684.0		*99.2*	*99.0*	*99.1*	98.7	*99.4*

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

1026.0	875.1	1905.9	914.4	7945.6	7.1	6.0	13.1	6.3	54.8	224.5	190.5	416.9	200.4	1738.8
3209.1	2737.0	5960.9	2849.2	24851.2	22.1	18.9	41.1	19.6	171.4	246.7	209.4	458.0	220.0	1910.1
1069.7	908.8	1987.0	946.2	8283.7	7.4	6.3	13.7	6.5	57.1	254.0	215.7	471.7	226.6	1967.3
2495.9	2128.8	4632.1	2207.8	19304.0	17.2	14.7	31.9	15.2	133.1	271.2	230.4	503.6	241.8	2100.4
1178.8	1003.5	2152.8	1011.7	9035.7	8.1	6.9	14.8	7.0	62.3	279.4	237.3	518.5	248.8	2162.7
318.4	271.5	591.4	272.2	2414.0	2.2	1.9	4.1	1.9	16.6	281.6	239.2	522.6	250.6	2179.4
3820.3	3258.4	7096.3	3209.2	28646.1	26.3	22.5	48.9	22.1	197.6	307.9	261.6	571.5	272.8	2376.9

99.2	*99.0*	*99.1*	98.9	*98.4*
99.2	*99.0*	99.1	98.5	*98.4*
99.2	98.7	*99.1*	*98.2*	*98.4*
99.2	*99.0*	99.0	98.2	99.2
99.2	98.9	97.4	95.2	98.3
99.2	*99.0*	*99.1*	94.9	97.3
99.2	*99.0*	*99.1*	93.2	96.2

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{gl.}$ = SM-Fracht$_{gl.}$/$SM_{j.}$ SM-JF = SM-Fracht/$SM_{j.}$

SM-Jahresfrachten$_{gl.}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{gl.}$					SM-Jahresfrachten					SM-Jahresfrachten$_{gl.}$					SM-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
1.3	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.2	1.2	1.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
9.3	7.9	8.6	8.3	8.9	7.9	6.8	7.4	7.1	7.7	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.0	1.1	1.1	1.2	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6
12.7	10.9	11.8	11.4	12.3	3.5	3.0	3.2	3.1	3.4	1.9	1.6	1.8	1.7	1.8	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	1.0	0.8	0.9	0.9	0.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
19.4	16.5	18.0	17.3	18.7	6.6	5.7	6.2	5.9	6.4	2.9	2.5	2.7	2.6	2.8	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.5	1.2	1.4	1.3	1.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
22.0	18.8	20.4	19.6	21.2	2.6	2.2	2.4	2.3	2.5	3.3	2.8	3.1	2.9	3.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	1.6	1.4	1.5	1.5	1.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
29.6	25.3	27.5	26.4	28.6	7.6	6.5	7.1	6.8	7.3	4.4	3.8	4.1	4.0	4.3	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	2.2	1.9	2.1	2.0	2.1	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6
32.2	27.5	29.9	28.8	31.1	2.6	2.2	2.4	2.3	2.5	4.8	4.1	4.5	4.3	4.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	2.4	2.1	2.2	2.2	2.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
39.6	33.8	36.8	35.4	38.2	7.4	6.3	6.9	6.6	7.1	5.9	5.1	5.5	5.3	5.7	1.1	0.9	1.0	1.0	1.1	3.0	2.5	2.8	2.7	2.9	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
42.2	36.0	39.2	37.7	40.8	2.6	2.2	2.4	2.3	2.5	6.3	5.4	5.9	5.7	6.1	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	3.2	2.7	2.9	2.8	3.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
55.8	47.6	51.8	49.8	53.9	13.6	11.6	12.6	12.2	13.1	8.4	7.1	7.8	7.5	8.1	2.0	1.7	1.9	1.8	2.0	4.2	3.6	3.9	3.7	4.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
57.5	49.1	53.5	51.4	55.6	1.7	1.5	1.6	1.6	1.7	8.6	7.4	8.0	7.7	8.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	4.3	3.7	4.0	3.9	4.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
65.3	55.8	60.7	58.4	63.1	7.8	6.7	7.3	7.0	7.6	9.8	8.4	9.1	8.8	9.5	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1	4.9	4.2	4.6	4.4	4.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6
67.9	58.0	63.1	60.7	65.6	2.6	2.2	2.4	2.3	2.5	10.2	8.7	9.5	9.1	9.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	5.1	4.4	4.7	4.6	4.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
75.3	64.3	70.0	67.3	72.7	7.4	6.3	6.8	6.6	7.1	11.3	9.6	10.5	10.1	10.9	1.1	0.9	1.0	1.0	1.1	5.6	4.8	5.2	5.0	5.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
77.7	66.4	72.2	69.5	75.1	2.5	2.1	2.3	2.2	2.4	11.7	10.0	10.8	10.4	11.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	5.8	5.0	5.4	5.2	5.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
85.4	72.9	79.4	76.3	82.5	7.7	6.5	7.1	6.8	7.4	12.8	10.9	11.9	11.4	12.4	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	6.4	5.5	6.0	5.7	6.2	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6
88.0	75.1	81.7	78.6	85.0	2.6	2.2	2.4	2.3	2.5	13.2	11.3	12.3	11.8	12.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	6.6	5.6	6.1	5.9	6.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
93.9	80.2	87.3	83.9	90.7	6.0	5.1	5.5	5.3	5.8	14.1	12.0	13.1	12.6	13.6	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	7.0	6.0	6.5	6.3	6.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
96.7	82.6	89.9	86.4	93.5	2.8	2.4	2.6	2.5	2.7	14.5	12.4	13.5	13.0	14.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	7.3	6.2	6.7	6.5	7.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
97.5	83.3	90.6	87.1	94.2	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	14.6	12.5	13.6	13.1	14.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	7.3	6.2	6.8	6.5	7.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
106.6	91.1	99.1	95.3	103.0	9.1	7.8	8.5	8.2	8.8	16.0	13.7	14.9	14.3	15.5	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	8.0	6.8	7.4	7.1	7.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

$J_{s.}$ = SM-Fracht$_{gl.}$/$SM_{j.}$

	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFlb	106.6	91.1	99.1	95.3	103.0	16.0	13.7	14.9	14.3	15.5	8.0	6.8	7.4	7.1	7.7

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

$t_{gl.}$ [h]	$J_{s.}$ [a] Av15	Vges [L]	GrW ... Grenzwert											Ce/Ci					
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
3.00	1.1	9.0	TFlb u 1	0.5	0.6	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
21.30	7.6	63.9	TFlb u 3	0.5	0.8	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
29.30	10.4	87.9	TFlb u 7	0.5	1.1	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
44.60	15.8	133.8	TFlb u 8	0.5	0.9	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
50.60	18.0	151.8	TFlb u 11	0.5	1.5	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01
68.10	24.2	204.3	TFlb u 12	0.5	1.1	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
74.10	26.3	222.3	TFlb u 15	0.5	1.2	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
91.10	32.4	273.3	TFlb u 16	0.5	1	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
97.10	34.5	291.3	TFlb u 19	0.5	0.5	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
128.40	45.6	385.2	TFlb u 20	0.5	0.5	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
132.40	47.0	397.2	TFlb u 22	0.5	0.5	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
150.40	53.4	451.2	TFlb u 23	0.5	0.5	1.5	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
156.40	55.6	469.2	TFlb u 26	0.5	0.5	1	0.5	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
174.40	61.6	520.0	TFlb u 27	0.5	0.5	1	0.7	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
180.40	63.6	536.9	TFlb u 30	0.5	0.5	1	0.6	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
198.40	69.8	589.8	TFlb u 31	0.5	0.5	1	0.8	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
204.40	71.9	607.4	TFlb u 34	0.5	0.7	1	1	3	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
218.40	76.8	648.6	TFlb u 35	0.5	0.5	1.1	1	3.6	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
224.40	79.1	668.0	TFlb u 37	0.5	0.6	2.9	2.6	7.8	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.03	0.05	0.02
226.15	79.7	673.3	TFlb u 38	0.5	0.5	1	2.8	12.8	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03
247.15	87.2	736.3	TFlb u 40	0.5	0.5	1	3.7	17.9	0.15	0.86	0.20	0.33	0.50	0.01	0.01	0.01	0.07	0.04
			Zulauf Mitte	61.14	52.22	113.64	54.64	472.6										

Analyse 17 **Fortführung VR 7**

im Aug 2013

Probe	ø	Nummern
TFlb U	D3	43,44,46,47,49,51,53,59,61
Zulauf 10,14		

Konzentration, Volumen, Jahre (V)

PbCrNi/Cu/Zn [µg/l]

$J_x = V_{ges}/O_j$

Q [ml/min]	Konzentration	Probenbezeic	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	t [h]	t_{ges} [h]	V [L]	V_{ges} [L]	J_x [a] Av15	J_x [a] Av100	J_x [a] Av200
50.00	400/100/50	TFlB u 43	*0.5*	*0.5*	1.3	3.6	18.2	6.00	253.15	18.00	758.49	89.8	13.5	6.7
50.00	400/100/50	TFlB u 44	*0.5*	*0.5*	1.2	2.3	13.6	19.00	272.15	57.00	815.49	96.6	14.5	7.2
50.00	400/100/50	TFlB u 46	1.5	*0.5*	1.3	5	19.1	4.00	276.15	12.00	827.49	98.0	14.7	7.3
50.00	400/100/50	TFlB u 47	*0.5*	*0.5*	2.2	3.7	20.7	20.00	296.15	60.00	887.49	105.1	15.8	7.9
50.00	400/100/50	TFlB u 49	*0.5*	*0.5*	1.6	3.9	19.5	4.00	300.15	12.00	899.49	106.5	16.0	8.0
50.00	400/100/50	TFlB u 51	*0.5*	*0.5*	1.7	2.8	17.5	18.50	318.65	55.50	954.99	113.1	17.0	8.5
45.00	400/100/50	TFlB u 53	*0.5*	*0.5*	1.2	1.5	10.4	4.50	323.15	12.15	967.14	114.5	17.2	8.6
45.00	400/100/50	TFlB u 59	*0.5*	*0.5*	1.8	2.6	16.4	47.00	370.15	126.90	1094.04	129.6	19.4	9.7
45.00	400/100/50	TFlB u 61	*0.5*	0.6	3.7	5.1	28.2	19.00	389.15	51.30	1145.34	135.6	20.3	10.2
		Zulauf gemitt	53.15	48.6	109.5	60.25	432.5							

Werte modifiziert

t ... Zeit, seit letzter Probe oder Start [h]

t_{ges} ... Zeit seit Start [h]

V ... Volumen, dass seit der letzten Probe oder seit Start durchgeflossen ist [L]

V_{ges} .. Volumen, das seit Start gesamt durchgeflossen ist [L]

J_x... aufberachte Jahresfrachten [a]

O_j ... Abflussmenge pro Säule und Jahr [L]

Schwermetall-Frachten

$SM\text{-}Fracht_{ges} = C_{SM\text{-}Zulauf} * V_{ges}$

$SM\text{-}Fracht = C_{SM\text{-}Zulauf} * V$

nur bei Ce > Bestimmungsgrenze

SM-Frachtablauf = Ce*V

SMl-Fracht$_{ges}$ [µg]					SM-Fracht [µg]					SM-Frachtablauf [µg]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
46196.7	39528.0	86102.9	41568.4	357572.2	956.7	874.8	1971.0	1084.5	7785.0	*9.0*	*379.2*	116.8	48.5	122.6
49226.3	42298.2	92344.4	45002.7	382224.7	3029.6	2770.2	6241.5	3434.3	24652.5	*28.5*	*407.7*	115.9	33.3	98.5
49864.1	42881.4	93658.4	45725.7	387414.7	637.8	583.2	1314.0	723.0	5190.0	18.0	*413.7*	127.4	73.5	140.4
53053.1	45797.4	100228.4	49340.7	413364.7	3189.0	2916.0	6570.0	3615.0	25950.0	*30.0*	*443.7*	231.2	58.3	163.2
53690.9	46380.6	101542.4	50063.7	418554.7	637.8	583.2	1314.0	723.0	5190.0	*6.0*	*449.7*	170.4	62.3	155.8
56640.7	49077.9	107619.6	53407.6	442558.4	2949.8	2697.3	6077.3	3343.9	24003.8	*27.8*	*477.5*	192.3	47.5	148.4
57286.4	49668.4	108950.1	54139.6	447813.3	645.8	590.5	1330.4	732.0	5254.9	*6.1*	*483.6*	137.4	25.8	89.3
64031.2	55835.7	122845.6	61785.3	502697.5	6744.7	6167.3	13895.6	7645.7	54884.3	*63.5*	*547.0*	233.2	50.5	159.4
66757.8	58328.9	128463.0	64876.1	524884.8	2726.6	2493.2	5617.4	3090.8	22187.3	*25.7*	687.2	501.8	103.8	286.9

$C_{SM\text{-}Zulauf}$ .. Schwermetallkonzentration, die im Zulauf gemessen wurde [µg/l]

$SM\text{-}Fracht_{ges}$ ... Schwermetallfracht, die bereits durchgeflossen ist [µg]

SM-Frachtablauf .. Schwermetallfracht, die abläuft und nicht im Filter zurückgehalten wird µg]

SM-Fracht ... Schwermetallfracht, die seit der letzten Probe oder Start durchgeflossen ist µg]

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

Rückhalt und Beladung

wenn Ce < Bestimmungsgrenze wurde GrenzCe genommen

SM-Rückhalt = 100 - ($C_{SM\text{-}Ablauf}/C_{SM\text{-}Zulauf}$ * 100)

Rückgehaltene Schwermetallfracht Ci*V-Ce*V [µg]					Beladung [µg/g]					Beladung gesamt [µg/g]					Masse [g]	SMl-Rückhalt [%]				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	TFlb U	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
947.7	495.6	1854.2	1036.0	7662.4	6.5	3.4	12.8	7.1	52.8	314.5	265.1	584.3	279.9	2429.8	145	*99.1*	*99.0*	98.8	94.0	95.8
3001.1	2362.5	6125.6	3400.9	24554.0	20.7	16.3	42.2	23.5	169.3	335.2	281.3	626.5	303.4	2599.1		*99.1*	*99.0*	98.9	96.2	96.9
619.8	169.5	1186.6	649.5	5049.6	4.3	1.2	8.2	4.5	34.8	339.4	282.5	634.7	307.8	2633.9		97.2	*99.0*	98.8	91.7	95.6
3159.0	2472.3	6338.8	3556.7	25786.8	21.8	17.1	43.7	24.5	177.8	361.2	299.6	678.4	332.4	2811.8		*99.1*	*99.0*	98.0	93.9	95.2

rot = Konzentration im Ablauf (Ci) größer als im Zulauf (C0)

kursiv = Wert unter Bestimmungsgrenze

SM-Rückhalt ... Schwermetallrückhalt im Bezug auf die Konzentration im Zulauf [%]

631.8	133.5	1143.6	660.7	5034.2	4.4	0.9	7.9	4.6	34.7	365.6	300.5	686.3	336.9	2846.5
2922.1	2239.8	5885.0	3296.4	23855.3	20.2	15.3	40.6	22.7	164.5	385.7	315.8	726.9	359.7	3011.0
639.7	106.9	1193.0	706.3	5165.5	4.4	0.7	8.2	4.9	35.6	390.1	316.5	735.1	364.5	3046.6
6681.3	5620.3	13662.4	7595.2	54724.9	46.1	38.8	94.2	52.4	377.4	436.2	355.3	829.4	416.9	3424.0
2700.9	1806.0	5115.5	2987.1	21900.4	18.6	12.5	35.3	20.6	151.0	454.8	367.8	864.6	437.5	3575.1

98.1	*99.0*	98.5	93.5	95.5
98.1	*99.0*	98.4	95.4	96.0
98.1	*99.0*	98.9	97.5	97.6
98.1	*99.0*	98.4	95.7	96.2
98.1	98.8	96.6	91.5	93.5

Schwermetall-Jahresfrachten

$SM\text{-}JF_{ges.}$ = SM-Fracht$_{ges.}$/$SM_{ges.}$ SM-JF = SM-Fracht/$SM_{ges.}$

SMI-Jahresfrachten$_{ges.}$					SMI-Jahresfrachten					SMI-Jahresfrachten$_{ges.}$					SMI-Jahresfrachten					SMI-Jahresfrachten$_{ges.}$					SMI-Jahresfrachten				
Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
109.4	93.6	102.0	98.4	105.9	2.3	2.1	2.3	2.6	2.3	16.4	14.0	15.3	14.8	15.9	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	8.2	7.0	7.6	7.4	7.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
116.6	100.2	109.4	106.6	113.2	7.2	6.6	7.4	8.1	7.3	17.5	15.0	16.4	16.0	17.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.1	8.7	7.5	8.2	8.0	8.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5
118.1	101.6	110.9	108.3	114.7	1.5	1.4	1.6	1.7	1.5	17.7	15.2	16.6	16.2	17.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	8.9	7.6	8.3	8.1	8.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
125.6	108.5	118.7	116.9	122.4	7.6	6.9	7.8	8.6	7.7	18.8	16.3	17.8	17.5	18.4	1.1	1.0	1.2	1.3	1.2	9.4	8.1	8.9	8.8	9.2	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
127.2	109.8	120.2	118.6	123.9	1.5	1.4	1.6	1.7	1.5	19.1	16.5	18.0	17.8	18.6	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	9.5	8.2	9.0	8.9	9.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
134.1	116.2	127.4	126.5	131.0	7.0	6.4	7.2	7.9	7.1	20.1	17.4	19.1	19.0	19.7	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	10.1	8.7	9.6	9.5	9.8	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
135.7	117.6	129.0	128.2	132.6	1.5	1.4	1.6	1.7	1.6	20.4	17.6	19.4	19.2	19.9	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	10.2	8.8	9.7	9.6	9.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
151.6	132.2	145.5	146.3	148.8	16.0	14.6	16.5	18.1	16.2	22.7	19.8	21.8	21.9	22.3	2.4	2.2	2.5	2.7	2.4	11.4	9.9	10.9	11.0	11.2	1.2	1.1	1.2	1.4	1.2
158.1	138.1	152.1	153.7	155.4	6.5	5.9	6.7	7.3	6.6	23.7	20.7	22.8	23.0	23.3	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	11.9	10.4	11.4	11.5	11.7	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
Av = 15					Av = 15					Av = 100					Av = 100					Av = 200					Av = 200				

SM-Jahresfrachten ... Aufgebrachte Schwermetallfrachten in Jahren

Simulierte Betriebsjahre

J_s = SM-Fracht$_{ges.}$/$SM_{J.}$

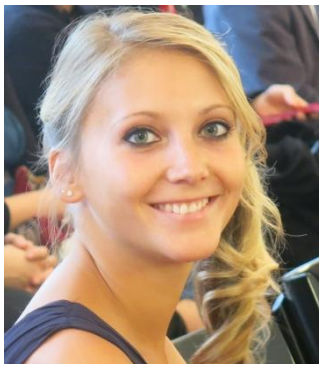
	Js [a] (Av = 15)					Js [a] (Av = 100)					Js [a] (Av = 200)				
	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
TFIb	158.1	138.1	152.1	153.7	155.4	23.7	20.7	22.8	23.0	23.3	11.9	10.4	11.4	11.5	11.7

Durchbruchsermittlung

Av15 Durchbruch, wenn Ce/Ci größer Grenzwert

$t_{ges.}$ [h]	J_s [a] Av15	Vges [L]							GrW ... Grenzwert					Ce/Ci					
			Probe	Pb [µg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Ni [µg/l]	Zn [µg/l]	GrW Pb	GrW Cr	GrW Cu	GrW Ni	GrW Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
253.15	89.8	758.5	TFIB u 43	0.5	0.5	1.3	3.6	18.2	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.01	0.06	0.04
272.15	96.6	815.5	TFIB u 44	0.5	0.5	1.2	2.3	13.6	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03
276.15	98.0	827.5	TFIB u 46	1.5	0.5	1.3	5	19.1	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.03	0.01	0.01	0.08	0.04
296.15	105.1	887.5	TFIB u 47	0.5	0.5	2.2	3.7	20.7	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.02	0.06	0.05
300.15	106.5	899.5	TFIB u 49	0.5	0.5	1.6	3.9	19.5	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.01	0.06	0.05
318.65	113.1	955.0	TFIB u 51	0.5	0.5	1.7	2.8	17.5	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.02	0.05	0.04
323.15	114.5	967.1	TFIB u 53	0.5	0.5	1.2	1.5	10.4	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
370.15	129.6	1094.0	TFIB u 59	0.5	0.5	1.8	2.6	16.4	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04
389.15	135.6	1145.3	TFIB u 61	0.5	0.6	3.7	5.1	28.2	0.17	0.93	0.20	0.30	0.50	0.01	0.01	0.03	0.08	0.07

Lebenslauf



Name:	Sonja Magnet	
Geboren:	20. August 1990 in Linz	
Anschrift:	Wattgasse 67/29+30, 1170 Wien s.magnet@gmx.at	
Schulbildung:	4 Klassen Volksschule Leonding - Doppl 8 Klassen Bundesrealgymnasium Ramsauerstraße, Linz Matura am 17. Juni 2008	
Fremdsprachen:	Englisch Spanisch	
Hobbys:	Reisen, Snowboarden, Turnen, Surfen	
Studium:	ab Oktober 2008 Universität für Bodenkultur Bachelorstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft Abschluss Bachelorstudium am 13.02.2012 Masterstudium Kulturtechnik und Wasserwirtschaft	
Bisherige Dienstverhältnisse:	07.09. – 02.10.2009 und 06.09. – 03.10.2010	Land Oberösterreich / Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft
	01.08. – 31.08.2012	Stadt Wien / MA 22 – Abteilung für Umweltschutz
Sonstiges:	Führerschein B seit 2007	

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Weiters versichere ich, dass ich diese Masterarbeit weder im Inland noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 26.01.2014, *Sonja Magnet,*