

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Veranlassung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Geologie, Böden und Hydrogeologie.....</b>	<b>4</b>
2.1  Übersichtsbetrachtung des Landes Nordrhein-Westfalen.....	4
2.1.1  Regionalgeologische Situation.....	4
2.1.2  Bodenregionen.....	6
2.1.3  Hydrogeologische Situation.....	6
2.1.3.1  Grundwasserlandschaften - Gebiete unterschiedlicher Grundwasserergiebigkeit.....	6
2.1.3.2  Grundwasserregionen - Einzugsgebiete der Oberflächengewässer..	8
2.2  Detailbetrachtung des Untersuchungsgebietes Mönchengladbach / Viersen in der Niederrheinischen Bucht.....	9
2.2.1  Einordnung des Untersuchungsgebietes in den regionalgeologischen Kontext.....	9
2.2.1.1  Entwicklungsgeschichte der Niederrheinischen Bucht.....	9
2.2.1.2  Strukturelle Gliederung der Venloer Scholle.....	12
2.2.2  Geologische Schichtenfolge.....	12
2.2.3  Hydrogeologische Verhältnisse.....	16
2.2.3.1  Grundwasserstockwerksbau.....	16
2.2.3.2  Hydraulische Eigenschaften und Wasserförderung.....	17
2.2.3.3  Grundwasserfließrichtungen.....	18
<b>3. Einflussfaktoren auf die Grundwasserbeschaffenheit unter dem Aspekt der   Schwermetallmobilität.....</b>	<b>19</b>
3.1  Schwermetallzufuhr.....	20
3.1.1  Atmosphärischer Eintrag.....	20
3.1.1.1  Trockene Deposition.....	20
3.1.1.2  Nasse Deposition.....	21
3.1.2  Eintrag durch landwirtschaftliche Aktivität.....	22
3.2  Adsorption der Schwermetalle.....	24
3.2.1  Sorptionsmechanismen.....	24
3.2.1.1  Spezifische Adsorption.....	25
3.2.1.2  Kationenaustausch.....	27
3.2.2  Sorbenten.....	29
3.2.3  Selektivität der Sorbenten für Schwermetalle.....	30
3.3  Komplexbildung der Schwermetalle.....	31

3.4	Mikrobiell katalysierte Redoxreaktionen.....	32
3.4.1	Allgemeine Zusammenhänge.....	32
3.4.2	Beispiele typischer Redoxreaktionen in Grundwasserleitern unter besonderer Berücksichtigung von Pyritoxidationsprozessen.....	37
3.4.3	Isotopengeochemische Belege für Pyritoxidationsprozesse.....	38
3.5	Fällung und Lösung der Schwermetalle.....	40
<b>4.</b>	<b>Erhebung und Auswertung hydrochemischer Daten für das Land Nordrhein-Westfalen mit Relevanz für die Mobilisation von Schwermetallen.....</b>	<b>41</b>
4.1	Datengrundlage.....	41
4.1.1	Grundwasser-Überwachungsprogramm des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen.....	41
4.1.2	Erweiterung des Datenbestandes.....	42
4.2	Datenhaltung und Methodik der Datenauswertung.....	42
4.2.1	Datenverwaltung.....	42
4.2.2	Statistische Methoden.....	43
<b>5.</b>	<b>Untersuchungsmethodik tiefer Grundwasserleiter.....</b>	<b>46</b>
5.1	Probengewinnung.....	46
5.1.1	Bohrbetrieb und Sedimentprobenahme.....	46
5.1.2	Errichtung der Multilevel-Messstellen und Grundwasserprobenahme.....	47
5.2	Wasseranalytik.....	49
5.3	Sedimentanalytik.....	50
5.3.1	Schwermetalle.....	50
5.3.1.1	Zielstellung und Anforderungen an die Untersuchungsmethodik.....	50
5.3.1.2	Literaturübersicht und Methodenkritik sequentieller Extraktionsverfahren zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen.....	52
5.3.1.3	Durchführung der sequentiellen Extraktionsuntersuchungen in Säulen.....	57
5.3.1.4	Gesamtgehaltsbestimmungen.....	61
5.3.2	Schwefel.....	61
5.3.3	Kohlenstoff.....	62
5.4	Isotopenuntersuchungen fester und im Grundwasser gelöster Schwefelverbindungen.....	62
<b>6.</b>	<b>Auftreten von Schwermetallen im Grundwasser Nordrhein-Westfalens - Bestandsaufnahme und Erfassung regionaltypischer Zusammenhänge.....</b>	<b>63</b>
6.1	Arsen (Halbmetall).....	63

6.1.1	Auftreten und Hintergrundkonzentrationen.....	63
6.1.2	Detailbetrachtung ausgewählter Gebiete.....	63
6.2	Kobalt.....	65
6.3	Kupfer.....	66
6.3.1	Auftreten und Hintergrundkonzentrationen.....	66
6.3.2	Detailbetrachtung ausgewählter Gebiete.....	67
6.4	Nickel.....	69
6.4.1	Auftreten und Hintergrundkonzentrationen.....	69
6.4.2	Detailbetrachtung ausgewählter Gebiete.....	69
6.5	Zink.....	74
6.5.1	Auftreten und Hintergrundkonzentrationen.....	74
6.5.2	Detailbetrachtung ausgewählter Gebiete.....	75
6.6	Sonstige Schwermetalle (Blei, Cadmium, Chrom, Quecksilber).....	79
<b>7.</b>	<b>Identifikation von Schwermetallmobilisationsprozessen im Grundwasser des Raumes Mönchengladbach / Viersen durch hydrochemische Indikatoren.....</b>	<b>80</b>
7.1	Untersuchungsstandort Wasserwerk Mönchengladbach-Rasseln.....	80
7.1.1	Gesamtmineralisation in den verschiedenen Grundwasserstockwerken.....	80
7.1.2	Identifikation der Schwermetallmobilisationsprozesse.....	84
7.1.2.1	Oberflächennahes Grundwasser.....	84
7.1.2.2	Tieferes Grundwasser.....	86
7.1.2.3	Zeitliche Entwicklung hydrochemischer Parameter im Rohwasser eines Förderbrunnens des Wasserwerkes Mönchengladbach-Rasseln.....	94
7.2	Untersuchungsstandort Wassergewinnungsanlage Viersen-Amern.....	95
7.2.1	Gesamtmineralisation in den verschiedenen Grundwasserstockwerken.....	97
7.2.2	Identifikation der Schwermetallmobilisationsprozesse.....	99
7.2.2.1	Oberflächennahes Grundwasser.....	99
7.2.2.2	Tieferes Grundwasser.....	100
7.2.2.3	Zeitliche Entwicklung hydrochemischer Parameter im Rohwasser des Förderbrunnens der Wassergewinnungsanlage Viersen-Amern.....	106
<b>8.</b>	<b>Geochemische Parameter der Sedimente und Schwermetallbindungsformen in tieferen Aquiferen des Raumes Mönchengladbach / Viersen.....</b>	<b>107</b>
8.1	Pyrit- und Gesamt-Schwefelgehalte der Sedimente.....	107
8.2	Organische und anorganische Kohlenstoffgehalte der Sedimente.....	109
8.3	Schwermetallgehalte der Sedimente.....	111

8.4	Schwermetallbindungsformen in den Sedimenten.....	112
8.4.1	Begründung der Probenauswahl.....	113
8.4.2	Methodik der Auswertung.....	114
8.4.3	Nachweis anaerober Verhältnisse während der Versuchsdurchführung.....	116
8.4.4	Bilanzierung der in den untersuchten Fraktionen gebundenen Schwermetalle, der Alkali- und Erdalkalimetalle sowie des Schwefels.....	117
8.4.4.1	Standort Mönchengladbach-Rasseln.....	118
8.4.4.2	Standort Viersen-Amern.....	125
8.4.5	Anteil der Schwermetalle am Kationenbelag und den fraktionierenden Mineralphasen.....	132
8.4.5.1	Kationenaustauschkapazität und Anteil der Schwermetalle am Kationenbelag.....	133
8.4.5.2	Gehalt und Zusammensetzung der Karbonatminerale.....	135
8.4.5.3	Gehalt und Zusammensetzung der hydroxidischen Mineralphasen.....	137
8.4.5.4	Gehalt und Zusammensetzung der Sulfidminerale.....	139
<b>9.</b>	<b>Hydrogeochemische Modellierung zur Quantifizierung der Schwermetallmobilisationsprozesse im tieferen Grundwasser des Raumes Mönchengladbach / Viersen.....</b>	<b>142</b>
9.1	Standort Mönchengladbach-Rasseln.....	143
9.2	Standort Viersen-Amern.....	151
<b>10.</b>	<b>Prognose der Schwermetallkonzentrationsentwicklung und Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Standorte.....</b>	<b>155</b>
10.1	Prognose der Schwermetallkonzentrationsentwicklung im tieferen Grundwasser des Raumes Mönchengladbach / Viersen.....	155
10.1.1	Beurteilung der gegenwärtigen hydrochemischen Situation.....	155
10.1.2	Mobilisationsszenarien.....	157
10.2	Verallgemeinerung und Übertragbarkeit der Aussagen auf andere Standorte.....	159
<b>11.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>162</b>
11.1	Auftreten von Schwermetallen im Grundwasser Nordrhein-Westfalens.....	162
11.2	Schwermetallmobilisationsprozesse in tieferen Aquiferen der Niederrheinischen Bucht.....	164
<b>12.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>168</b>