

Quell- und Grundwasserqualität in Deutschland

Interdisziplinäres Projekt

Im Studiengang

Umweltmanagement und Stadtplanung in Ballungsräumen

am Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

der Hochschule RheinMain

eingereicht von:

Justus Sergej

Matrikelnummer: 176548

Referenten:

Prof. Dr. Heinz Eckhardt

Dipl.-Ing. P. Guckelsberger

Schumannstraße 51 d

63069 Offenbach am Main

Tel.: 069-710459311

E-Mail: bauing.justus@gmail.com

15.08.2014

**Interdisziplinäres Projekt (34190) im Studiengang UMSB
für Herrn Sergej Justus**

Quell- und Grundwasserqualität in Deutschland

Veranlassung und Zielsetzung

In Deutschland und anderen Regionen der Welt ist seit vielen Jahren eine Abnahme des pH-Wertes im Quell- und Grundwasser sowie in den Oberläufen der damit gespeisten Bäche zu verzeichnen.

Im Rahmen dieses Projektes sollen die globalen Ursachen und Folgeerscheinungen der Versauerung aquatischer Lebensräume (z.B. Ozeanversauerung) aufgezeigt werden. Schwerpunktmäßig soll sich die Projektarbeit aber mit der Versauerung von Quellen, Bächen, Grundwasser und deren Korrelation mit dem Umland, in Deutschland, beschäftigen.

In der Grundwasserverordnung werden Regelungen zu Maßnahmen eingeführt, die den Eintrag von Schadstoffen in das Grundwasser verhindern und begrenzen, um einer Verschlechterung des Grundwassers zu verhindern. Im Zuge dieser Projektarbeit sollen jene gesetzlichen Regelungen herausgestellt werden, die sich auf jene Grundwasserbelastungen beziehen, welche direkt oder indirekt über den pH-Wert beeinflusst werden.

Mögliche Schadstoffquellen und -pfade für die vorgenannten Bereiche (Quelle, Bach, Grundwasser) sind aufzuzeigen. Im Weiteren ist der aktuelle Wissensstand über die Umweltauswirkungen der festzustellenden pH-Wertabnahme darzustellen. Darüber hinaus ist der Frage nach zu gehen, ob neben den wissenschaftlich abgesicherten Folgen, evtl. weitere Umwelteinflüsse auf Flora, Fauna, Mensch von der zunehmenden pH-Wertabnahme in Quell- und Grundwässern, ausgehen. Die Entwicklung des pH-Trends ist abzuschätzen. Aktuell angewandte, prinzipiell mögliche (Kostenintensive?) und ggf. noch in der Erprobung befindliche Gegenmaßnahmen sind zu beschreiben und sollen in eine allgemeine Empfehlung für die Verwendung von Quell-, Grund- und Oberflächenwasser mit niedrigem pH-Wert, münden.

Es ist festzustellen ob die pH-Wertabsenkung in Deutschland regional schwankt und welche Gründe hierfür wahrscheinlich ausschlaggebend sind.

Exemplarisch sollen die pH-Wertverhältnisse des Quell- und Grundwassers für ein vom Bearbeiter ausgewähltes Areal im Ruhrgebiet und für ein festgelegtes ländliches Areal im Westerwald (Koordinaten/Plan s.u.) praktisch und/oder theoretisch untersucht werden. Die festgestellten oder recherchierten pH-Werte sind im Hinblick auf ihre Umweltwirkung zu bewerten.

Mögliche Verunreinigungsquellen die nicht im Zusammenhang mit dem pH-Wert stehen, sind für das im Westerwaldareal vorkommende Grund- und Quellwasser zu erkunden und zu beschreiben. Die praktische Untersuchung schließt dabei eine Begehung der Region, sowie eine Probenahme von Quell-, Oberflächenwasser und ggf. Bodensubstrat aus dem Beobachtungsareal im Westerwald ein.

Neben der rein sensorischen Begutachtung sollen ein bis zwei Stichproben mit den im Labor für Siedlungswasserwirtschaft der Hochschule RheinMain möglichen, physikalisch-chemischen Analysemethoden untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind statistisch zu erfassen, auszuwerten, graphisch aufzubereiten und auf Basis von zu recherchierenden Vergleichsdaten (gesetzliche Grenzwerte, Untersuchungen aus äquivalenten Regionen, Literaturangaben etc.) in geeigneter Form zu Beurteilen.

Die Beurteilung der untersuchten Wässer soll abschließend in einer Empfehlung münden, die ein mögliches Verwendungsspektrum (Bewässerungszwecke in der Nahrungsmittelproduktion, Tiertränkung, Trinkwasser für menschlichen Gebrauch...) aufzeigt.

Bearbeitungspunkte

- Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in wässrigen Medien
- Gesetzliche Regelungen in Deutschland & ggf. auch EU
- Recherchieren aktueller Quellen (Buchliteratur, Zeitschriften, Internet, Filmdokumentationen) und auflisten dieser Quellen nach selbst gewählten Kriterien: z.B. Aktualität (Datum), Themenbezug (stark/weniger stark); Art der Quelle (Web, Buch, Zeitschrift, Interview). Diese Quellen-Liste ist rd. 1 Woche nach Projektstart dem Betreuer zum ersten Projektgespräch vorzulegen.

- Wenn nicht bereits unter einem der o.a. Bearbeitungspunkte geschehen, sind anschließend, 1-3 Praxisprojekte aus dem Projektbereich vorzustellen:
 - Monitoringprojekte sind dabei auf Grund der hohen Datenbasis vorzuziehen
 - Aktuelle Anfragen/Interviews mit Betroffenen/Bürgern, mit Umweltverbänden und Fachleuten aus Ministerien und der Wissenschaft, können diesen Bearbeitungspunkt Aufwerten. Ein hilfreiches Instrument für diesen Bearbeitungspunkt ist das frühzeitige erstellen und verteilen eines Online-Fragebogens, der nach rd. 60 bis 70% der Bearbeitungszeit ausgewertet werden sollte. Später eingehende Antwort-Bögen können erfahrungsgemäß nicht mehr sinnvoll in die Abgabeverision der Projektarbeit einfließen.
- Eigene Ideen für weitere Bearbeitungspunkte !!?? Eigene Konzepte Visionen.
- Ausblick und ggf. Anregung für Fortsetzungsarbeit

Präsentation und Abgabe des Projektes:

1 x digital als Worddatei (nicht PDF !)

1 x Papierdruck

1 x DIN-A2 bis A1-Plakat zur Präsentation wesentlicher Ergebnisse, Aussagen, Bilder.

1 x digital PowerPoint-Präsentation (wesentliche Ergebnisse und Meilensteine der Arbeit!)

Prof. Dr. Heinz Eckhardt

Hochschule RheinMain Wiesbaden

Dipl.-Ing. P. Guckelsberger

Hochschule RheinMain Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1. Einleitung	10
1.1. Zielsetzung.....	11
1.2. Aufbau der Arbeit	11
2. Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen.....	13
2.1. Korrelation mit dem Umland.....	13
2.1.1. Schadstoffquellen, Schadstoffpfade und relevante Einflussfaktoren	14
2.1.2. Versauerungsprozesse	22
2.2. pH-Wertabnahme und deren Umweltauswirkungen.....	36
2.2.1. Umwelteinflüsse auf Flora und Fauna.....	36
2.2.2. Umweltauswirkungen auf Menschen	39
3. Aktuelle Regelungen und Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung	40
3.1. Gesetzliche Regelungen in Deutschland und EU	40
3.2. Aktuelle Gegenmaßnahmen.....	46
4. Gewässerqualität in Deutschland	48
4.1. Aktuelle Grundwasserqualität in Deutschland.....	48
4.1.1. Vorgehensweise zur Abschätzung der Grundwasserqualität und –versauerung	49
4.1.2. Ergebnisdarstellung der Eigenuntersuchung zum Grundwasser	59
4.1.3. Bewertung der Ergebnisse	65
4.2. Aktuelle Quellwasserqualität in Deutschland.....	68
4.2.1. Vorgehensweise zur Abschätzung der Quellwasserqualität und –versauerung.....	68
4.2.2. Ergebnisdarstellung der Quellwasserqualität und –versauerung	68
4.2.3. Bewertung der Ergebnisse.....	70
4.3. Trend zur Gewässerversauerung.....	71
4.3.1. Untersuchung der pH-Wertschwankung in Deutschland	73
4.3.2. Befragung von Fachleuten und Umweltverbänden	73
4.3.3. Zukünftige Entwicklung des pH-Wertes	74

5. Untersuchungen zur Quell- und Grundwasserversauerung im Westerwald und Ruhrgebiet..	78
5.1. Duisburg, Hamm und Kreis Recklinghausen als Untersuchungsareale im Ruhrgebiet...	78
5.1.1. Physisch-geografischer Überblick.....	79
5.1.2. Geologischer Überblick.....	80
5.1.3. Hydrogeologie und Wasserhaushalt	81
5.1.4. Ergebnisdarstellung der Grundwasserqualität und –versauerung.....	83
5.1.5. Bewertung der Ergebnisse.....	85
5.2 Mengerskirchen als Untersuchungsgebiet im Westerwald	86
5.2.1. Physisch-geografischer Überblick.....	87
5.2.2. Geologischer Überblick.....	89
5.2.3. Hydrogeologie und Wasserhaushalt	89
5.2.4. Probenahme von Niederschlag und Quellwasser	89
5.2.5. Ergebnisdarstellung der Quell- und Grundwasserqualität.....	90
5.2.6. Bewertung der Ergebnisse.....	90
5.2.7. Empfehlungen zum Verwendungsspektrum.....	91
6. Schlussbetrachtung.....	92
6.1. Fazit	92
6.2. Empfehlung für Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung	93
6.3. Ausblick.....	94
Glossar	96
Anhang.....	100
Literaturverzeichnis	100
Internetquellen und elektronische Dokumente	102
Eidesstattliche Erklärung	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der monatlichen Niederschläge (links) mit gemessenen Depositionen für Sulfat.....	15
Abbildung 2:	Absorption und Desorption von Sulfat beim Fall von Tropfen .unterschiedlicher Größe durch eine gaußförmige Konzentrationswolke, T=15 °C, Tropfenradius in mm angegeben.....	16
Abbildung 3:	Tropfenspektrum für Verschiedene Niederschlagsintensitäten nach Marshall und Palmer und Verteilungsfunktion des Regentropfendurchmessers [in mm] für den Auftreffprozess	17
Abbildung 4:	Relevante Einflussfaktoren auf pH-Wert	21
Abbildung 5:	pH-Skala und die Konzentrationen an Oxonium- und Hydroxidionen	22
Abbildung 6:	pH-Skala mit ausgewählten flüssigen Medium, Zuordnung nach pH-Wert.....	23
Abbildung 7:	Schematischer jahreszeitlicher Temperaturgang des Grundwassers,	24
Abbildung 8:	Anomalie von Wasser, pT-Phasendiagramm	25
Abbildung 9:	Der pK_w -Wert des Wassers als Funktion der Temperatur	26
Abbildung 10:	Konzentration von geladenen Aluminium-Spezies in Abhängigkeit vom pH-Wert.....	31
Abbildung 11:	Zusammenfassung zu Säure-Pufferbereichen	33
Abbildung 12:	Anteil der mobilen Fraktion am Gesamtschwermetallgehalt im Boden vor Auswaschung (Angaben in Prozent)	33
Abbildung 13:	Korrelation pH-Wert – Aluminium (am Beispiel Fichtelgebirge)	34
Abbildung 14:	pH-Abhängigkeit des Gleichgewichts Ammonium – Ammoniak.....	34
Abbildung 15:	pH-abhängige Löslichkeit von Aluminium- und Eisenhydroxiden.....	35
Abbildung 16:	Korrelation pH-Wert – Sulfat (am Beispiel Fichtelgebirge)	35
Abbildung 17:	pH-Werte für ausgewählte Ökosysteme und Pflanzen	36
Abbildung 18:	Verfügbarkeit der Nährstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert	37
Abbildung 19:	Wachstumsverlauf einer Pflanze in Abhängigkeit von dem Schadstoff	37
Abbildung 20:	Hydrogeologische Großräume.....	50
Abbildung 21:	Darstellung der Hintergrundwerte, WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“ .	51
Abbildung 22:	Darstellung von hydrogeochemischen Einheiten im WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“	51
Abbildung 23:	Darstellung der Datenabfrage im WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“ ...	52
Abbildung 24:	Tabelle für die Datenerfassung.....	52

Abbildung 25: Funktionsansichtsfenster vom Interpolationstool (rot: Ausgleichsfunktion, violett: Interpolationsfunktion, grün: Interpolationswert, $R^2 =$ Bestimmtheitsmaß),.....	58
Abbildung 26: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (pH-Wert-Betrachtung)	59
Abbildung 27: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Jacks).....	60
Abbildung 28: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Hendriksen)	60
Abbildung 29: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Schoen).....	61
Abbildung 30: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Aluminium.....	61
Abbildung 31: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Eisen	62
Abbildung 32: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Mangan	62
Abbildung 33: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Ammonium.....	63
Abbildung 34: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Nickel.....	63
Abbildung 35: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Zink.....	64
Abbildung 36: Zeitliche Änderung des pH-Wertes und der Sulfat-Konzentration	66
Abbildung 37: Alkalinität und pH-Wert von Quellwässern der Untersuchungsgebiete.....	69
Abbildung 38: Entwicklung der Schwefeldioxid-Emission in Deutschland (in Mio. t).....	71
Abbildung 39: Entwicklung der Stickstoffemissionen in Deutschland in Gg N pro Jahr	72
Abbildung 40: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen in Deutschland nach Emittentengruppen...	72
Abbildung 41: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen einzelner Länder	74
Abbildung 42: Basenvorräte und wichtige Kennwerte der Tiefenprofittypen 1 bis 5.....	76
Abbildung 43: Gegenüberdarstellung von Bodenversauerung und Grundwasserversauerung .	77
Abbildung 44: Ausschnitt aus dem Fachinformationssystem „Gefährdungspotenziale des Untergrundes in Nordrhein-Westfalen“	78
Abbildung 45: Lage der Untersuchungsflächen im Ruhrgebiet	79
Abbildung 46: Mengerskirchen – Untersuchungsgebiet und Untersuchungsstelle	87
Abbildung 47: Mengerskirchen – Nähere Umgebung der Untersuchungsstelle. Oben rechts – Quellwasserfassung und Quellwasseraustritt, oben links – Quellwasserfassung für die Nutzung mit Hilfe des Schlauchs, Mitte – Draufsicht (Wald und landwirtschaftliche Nutzung), unten links – verdichteter und bindiger Boden (wasserstauend), unten rechts: Pferdestahl	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Festgelegte Grenzwerte für die Beurteilung des chem: Grundwasserzustands.....	53
Tabelle 2:	Übersicht von Minimal- und Maximalwerten für ausgewählte Untersuchungsparameter (Deutschland).....	64
Tabelle 3:	Einstufung des Grundwasserzustands hinsichtlich der Versauerung durch selbstdefiniertes Bewertungssystem	67
Tabelle 4:	pH-Werte der untersuchten Regionen	70
Tabelle 5:	Daten zur Messstellenauswertung in Duisburg	83
Tabelle 6:	Daten zur Messstellenauswertung im Kreis Recklinghausen	84
Tabelle 7:	Daten zur Messstellenauswertung in Hamm	85
Tabelle 8:	Ergebnisdarstellung der Untersuchung am 17.06.2014 in Mengerskirchen	90

1. Einleitung

Eine der Hauptthemen, die das Interesse der Öffentlichkeit in den 80er Jahren geprägt hat, war die Entwicklung des Waldsterbens. Dem Waldsterben wurde keine große Relevanz gegeben. In den 90er Jahren kam es dann zur starken Versauerung von Böden und Gewässer. Viele Regionen mit unbelasteter Natur wurden zum Schwerpunkt des Gefährdungspotentials¹.

Aus dem Vergleich der Waldschäden aus den 80er und 90er Jahren wurde festgestellt, dass der Waldschaden zum heutigen Zeitpunkt auf dem gleichem Niveau geblieben ist (Referenzjahr 2013)². Unter den aufgeführten Schadstoffquellen ist an erster Stelle die Umweltverschmutzung durch sauren Regen zu finden³. Die Schäden werden dabei direkt und indirekt über den Boden und Gewässer zugefügt.

Neben der Bodenversauerung spielt die Versauerung von oberirdischen und unterirdischen Gewässer eine wichtige Rolle. Sinkt der pH-Wert in einem Gewässer, wird es sauer und beeinflusst dadurch abhängige Ökosysteme⁴. Das Sinken des pH-Werts hat mit sich noch weitere Folgen wie z.B. Schadstofffreisetzung (im Boden und in der Trinkwasserleitung) und teures Trinkwasseraufbereitung⁵.

Die daraus resultierenden Umstände können für die Umwelt und Menschen gravierende Folgen haben. Aus diesen Gründen wurde zum Schutz der Gewässer eine breite Reihe an Richtlinien, Gesetzen und Verordnungen veranlasst die sich mittelbar und unmittelbar mit der Thematik beschäftigen.

Aktuelle Recherchen haben gezeigt, dass es aktuell keine Arbeiten zum Thema Versauerung gibt, welche das bundesweite Ausmaß aufzeigen. Da noch keine Forschungsarbeiten zum aktuellen Stand der Versauerung zur Verfügung stehen, soll diese Arbeit durch theoretische und praktische Untersuchungen die Situation bundesweit, regional und lokal darstellen. Neben der Versauerung spielt außerdem noch die chemische Qualität des Quell- und Grundwassers in dieser Arbeit eine wichtige Rolle.

¹ Vgl. Hessische Landesamt für Umwelt, Leitz S. (1994): Die Versauerung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme in Hessen – Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen, Heft 169, S. 1

² Vgl. Stiftung Unternehmen Wald (o.J.): Waldzustandsbericht 2013, www.wald.de, (29.07.2014 – Dokument 135 der CD)

³ Vgl. Schutzgemeinschaft Deutscher Wald (o.J.): Waldschäden durch Luftverunreinigungen, www.sdw.de, (29.07.2014 – Dokument 122 der CD)

⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (August 2008): Grundwasser in Deutschland, S.17-23, www.umweltbundesamt.de, (29.07.2014 – Dokument 011 der CD)

⁵ Vgl. Neosmart Consulting AG (Mai 2014): Trinkwasser, www.zentrum-der-gesundheit.de, (29.07.2014 – Dokument 100 der CD)

1.1. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, den aktuellen Stand zur Quell- und Grundwasserqualität hinsichtlich der Versauerung für Deutschland, einem Areal im Ruhrgebiet und einem Gebiet im Westerwald aufzuzeigen. Die Aktualität der Ergebnisse soll durch die theoretischen und praktischen Eigenuntersuchungen, sowie einen Vergleich mit den öffentlichen Publikationen gewährleistet werden.

Im Weiteren sollen die Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen näher erläutert werden. Die Schadstoffquellen und relevante Einflussfaktoren sollen ermittelt und die Versauerungsprozesse herausgearbeitet werden. Die pH-Wertabnahme und die damit verbundenen Umweltauswirkungen auf Flora, Fauna und die menschliche Gesundheit werden ebenfalls betrachtet und interpretiert. Außerdem sollen aktuelle Regelungen auf der EU und Bundesebene, sowie mögliche Gegenmaßnahmen zur Quell- und Grundwasserversauerung ausgearbeitet werden.

Ziel ist es am Ende der Arbeit Vorschläge zu Gegenmaßnahmen unter Berücksichtigung der weiteren Entwicklung von Quell- und Grundwasserversauerung zu erarbeiten und Ausblick zu geben.

1.2. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs Hauptkapiteln gegliedert. Das **erste Kapitel** gibt einen Überblick über die Thematik und begründet die Entstehung der vorliegenden Arbeit.

Im **zweiten Kapitel** werden die theoretischen Grundlagen zur Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen behandelt. Zunächst wird auf die Korrelation von pH-Wert mit dem Umland eingegangen. Dabei werden die maßgebenden Schadstoffquellen, Schadstoffpfade und Einflussfaktoren aufgezeigt. Folgend werden die Versauerungsprozesse in einzelnen Pfaden beschrieben.

Im zweiten Teil des Kapitels werden die Umweltauswirkungen in Bezug auf den abnehmenden pH-Wert näher erläutert. Dabei wird auf die Umwelteinflüsse auf Flora, Fauna und menschliche Gesundheit eingegangen. Die Informationenbeschaffung erfolgte aus der Literatur und Veröffentlichungen verschiedenen Fachbehörden, Umweltverbänden und Fachleuten.

Aufgrund der großen Informationsmenge mussten am Ende mancher Kapitel eigenständig erstellte Tabellen zugefügt werden. Diese sollen dem Leser einen besseren Überblick gewährleisten.

Im **dritten Kapitel** werden die aktuelle Regelungen und Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung erarbeitet. Dabei werden die gesetzlichen Regelungen auf der Ebene der EU und Deutschland behandelt. Abschließend werden die Gegenmaßnahmen dargestellt. Um diesen Punkt zu bearbeiten, mussten gesetzliche Grundlagen aus verschiedenen Fachdisziplinen wie z.B. Abfall, Luftimmissionen, Wasser, Landwirtschaft etc. analysiert werden.

Im **vierten Kapitel** wird die aktuelle Quell- und Grundwasserqualität dargestellt. Abschließend wird die Einschätzung zum Trend der Gewässerversauerung gegeben. Bei der Erforschung der aktuellen Grundwasserqualität musste eine große Datenmenge aus einer GIS-gestützter Fachinformationssystem in die selbsterstellten Tabellen übernommen werden. Die Daten wurden aufbereitet, analysiert und grafisch dargestellt. Insgesamt werden 11 Untersuchungsparameter betrachtet. Für die Interpolation von erfassten Daten wurde ein Tool mit Hilfe von Excel programmiert. Da es nur Ansätze zur Bewertung des Versauerungszustandes gibt, wurde ein eigenes Bewertungsverfahren unter Berücksichtigung von weiteren Untersuchungsparametern entwickelt. Die Anwendung fand bei der Bewertung der Ergebnisse statt.

Zweiter Schwerpunkt des vierten Kapitels sind die Untersuchungen zur Quellwasserqualität in Deutschland. Die Untersuchungen erfolgen durch einen Vergleich der Monitoringprogramme in Deutschland. Abschließend wird in diesem Kapitel die Einschätzung zum Trend der Gewässerversauerung gegeben. Die Abschätzung erfolgt durch einen Vergleich der Literatur, Aussagen von Fachleuten (Daten stammen aus einer selbstdurchgeführter Umfrage) und Eigenrecherchen zum Verlauf der Schadstoffen.

Im **fünften Kapitel** werden die Untersuchungen zur Versauerung auf regionaler und lokaler Ebene dargestellt. Dabei wird die Versauerung und Grundwasserqualität in zwei kreisfreien Städten und einem Kreis anhand der zur Verfügung stehenden Daten aus dem Fachinformationssystem bewertet. Im Westerwald wird eine Quelle an ihrem Ursprung durch Probenahmen vor Ort (Quellwasser und Niederschlag) untersucht. Die Bewertung erfolgt unter der Berücksichtigung von nahumliegenden Grundwassermessstellen und die aus den Karten erarbeiteten Daten zur Geologie.

Im **sechsten Kapitel** wird ein Fazit gezogen. Außerdem werden hier Empfehlungen für Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung und ein Ausblick gegeben.

Zusätzlich zur Arbeit wird relevantes Informationsmaterial bereitgestellt. Dazu gehören eine **Powerpoint-Präsentation** und ein **DIN A1 Plakat**.

2. Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen

In diesem Kapitel werden Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen, sowie daraus resultierenden Auswirkungen auf Flora, Fauna und menschliche Gesundheit näher untersucht. Die Schadstoffe und deren Verursacher werden ermittelt und die Versauerungsprozesse mit dazu gehörigen Wechselwirkungen aufgezeigt.

2.1. Korrelation mit dem Umland

Der pH-Wert in Medien wie z.B. Boden und Wasser ist das Ergebnis komplexer Vorgänge. Der pH-Wert ist eine wichtige Messgröße, da viele Prozesse wie z.B. Stoffwechselreaktionen bei Mikroorganismen und Vegetation, Nährstoffkreisläufe und Bindung, sowie Freisetzung von Metallionen und Kohlenstoff vom pH-Wert abhängig sind⁶.

Für das ökologische Gleichgewicht im natürlichen Lebensraum Wasser ist der pH-Wert eine wichtige Voraussetzung und somit ein entscheidender abiotischer Umweltfaktor für Lebewesen. Das Existieren vieler Lebewesen und Mikroorganismen hängt von dem pH-Wert des jeweiligen Mediums ab. Je nach pH-Wert werden bestimmte Mikroorganismen in Böden und im Wasser tätig. Diese führen zu chemischen und biochemischen Umwandlungsprozessen, welche nur bei bestimmtem Milieu stattfinden können und tragen somit z.B. zur Bodenfruchtbarkeit bei⁷. Eine Milieustörung im Grundwasser führt dazu, dass die Leistungsfähigkeit der Organismen und die Selbstreinigungskraft des Grundwassers abnehmen. Das wirkt sich unmittelbar auf die Qualität des Grundwassers und somit auf alle auf Grund- und Quellwasserangewiesenen Ökosysteme aus⁸.

Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. schätzt ca. 2000 vorkommende Mikroorganismen-Arten in den europäischen Grundwässern. Darunter fallen Schnecken, Milben, Würmer, Wirbeltiere, Krebse und viele andere. Dabei handelt es sich im Grundwasser um besondere Lebensräume, die nach der Vernichtung z.B. durch extreme pH-Wertänderung nicht wiederherstellbar sind⁹.

⁶ Vgl. Umweltbundesamt: pH-Wert, www.umweltprobenbank.de, (09.05.2014 – Dokument 141 der CD)

⁷ Vgl. Der Niedersächsische Bildungsserver (o.J.): Zur Bedeutung des pH-Wertes, www.nibis.ni.schule.de, (09.05.2014 – Dokument 036 der CD)

⁸ Vgl. Bundesministerium für Umwelt (August 2008), Naturschutz und Reaktorsicherheit: Grundwasser in Deutschland, S.20, www.umweltbundesamt.de, (09.05.2014 – Dokument 011 der CD)

⁹ Vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (o.J.): Grundwasser – Guter Zustand bis 2015!, S. 6, www.bund.net, (09.05.2014 – Dokument 016 der CD)

2.1.1. Schadstoffquellen, Schadstoffpfade und relevante Einflussfaktoren

Die Versauerung von Quell- und Grundwässern ist im Wesentlichen auf saure Niederschläge zurückzuführen¹⁰. Ursachen für dieses Phänomen sind anthropogen und natürlich verursachte Emissionen von säurebildenden Schadstoffen^{11,12}. Das Auswaschen und Ausregnen von Schadstoffen durch Regentropfen, Hagel, Graupen oder Schneeflocken wird als nasse Deposition bezeichnet. Neben der nassen Deposition sind an den Reinigungsprozessen der Atmosphäre die trockene und okkulte Deposition beteiligt¹³. Die nasse und trockene Deposition haben dabei den höchsten Reinigungsanteil an dem Gesamtprozess. Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der nassen Deposition 50 Prozent und trockener Deposition 40-50 Prozent beträgt. Die okkulte Deposition spielt angesichts dieser Darstellung eine untergeordnete Rolle¹⁴.

Um die Komplexität der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schadstoffpfaden, Deposition und Emission aufzuzeigen, werden diese im Folgenden näher erläutert. Im Kapitel „Versauerungsprozesse“ werden in Bezug auf Kapitel „Schadstoffquellen, Schadstoffpfade und relevante Einflussfaktoren“ die Umwandlungsprozesse in drei Hauptschadstoffpfaden (Wasser, Boden, Luft) umfassend beschrieben. Abschließend werden die Informationen und Erkenntnisse aus beiden Kapiteln grafisch dargestellt.

Nasse, okkulte und trockene Deposition – Schadstoffpfad Luft

Die Auswirkungen der sauren Niederschläge werden durch Klimafaktoren wie z.B. Temperatur, Niederschlagsmenge, Niederschlagshäufigkeit und Niederschlagsintensität beeinflusst¹⁵.

Aus dem Bericht des Umweltbundesamtes (Wien) „Kartierung der nassen Deposition in Österreich“ wird durch die Betrachtung von jährlichen Niederschlagsmengen und Depositionswerten ein direkter Zusammenhang ersichtlich. Es wurde festgestellt, dass je höher die Niederschlagsmenge ist, desto höher ist die nasse Deposition für bestimmte Schadstoffe wie z.B. Sulfat¹⁶. Eine weitere Bestätigung liefert die folgende Abbildung.

¹⁰ Vgl. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (2001): Gewässerversauerung, www.spektrum.de, (11.05.2014 – Dokument 124 der CD)

¹¹ Vgl. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (o.J.): Informationen zur Gewässerversauerung in Hessen, www.hlug.de, (11.05.2014 – Dokument 070 der CD)

¹² Vgl. Keitz S. (1994): Die Versauerung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme in Hessen – Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen (Schriftreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt)

¹³ Vgl. Führer E., Nopp U. (2001): Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden, S. 205-206

¹⁴ Vgl. Möller D. (2003): Luft - Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht, S. 562

¹⁵ Vgl. Umweltbundesamt GmbH (2004): Qualität & Quantität von Grundwasser in Europa, S. 18, www.umweltbundesamt.at, (09.05.2014 – Dokument 145 der CD)

¹⁶ Vgl. Umweltbundesamt GmbH (o.J.): Kartierung der nassen Deposition in Österreich, S. 17-20, www.umweltbundesamt.at, (11.05.2014 – Dokument 144 der CD)

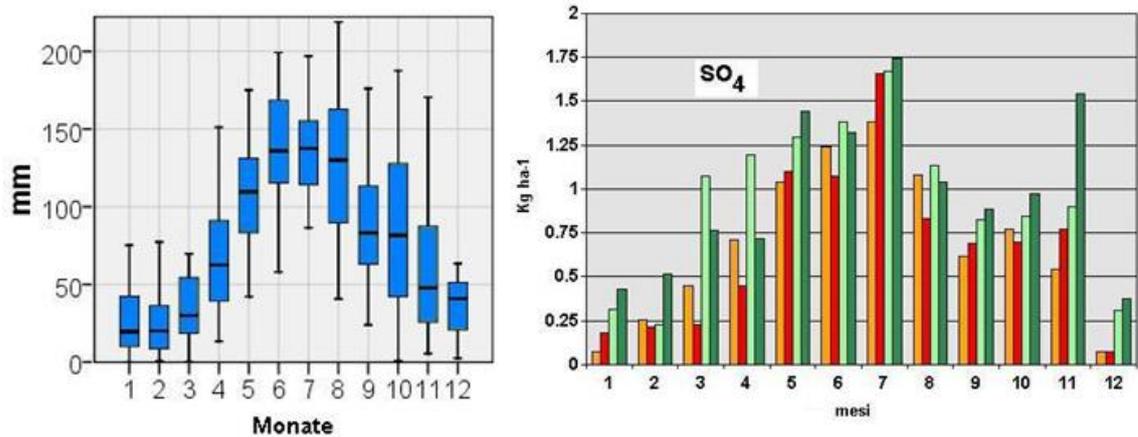


Abbildung 1: Vergleich der monatlichen Niederschläge (links) mit gemessenen Depositionen für Sulfat (rechts)

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Autonome Provinz Bozen – Südtirol, Abteilung Landesagentur für Umwelt (o.J.), www.provinz.bz.it, (11.05.2014 – Dokument 003 der CD)

Damit ist ein erster Beleg dafür gegeben, dass die Schadstoffbelastung von Ober- und Unterirdischen Gewässer mit dem Grad der Luftverschmutzung korreliert.

Ein weiterer wichtiger Hinweis hinsichtlich der Niederschlagsmenge, welcher aus der Arbeit des Umweltbundesamtes (Wien) hervorgeht, ist die Geländehöhe. Anhand eines Diagramms konnte festgestellt werden, dass die Niederschlagsmenge mit steigender Geländehöhe zunimmt¹⁷.

Eine zunehmende Geländeerhöhe wirkt sich zusätzlich zur Niederschlagsmenge auch auf die Schadstoffkonzentrationen in Regentropfen aus. So konnten erhöhte Konzentrationen an Sulfat-, Nitrat- und Ammonium-Ionen festgestellt werden. Die Schadstoffkonzentration bezieht sich zunächst auf die Wolken. Durch den seeder-feeder-effekt können die aufgleitenden Wolken im Vergleich zu einem gewöhnlichen Regen in niedrigen Höhen eine bis zu 8-Fache Schadstoffkonzentration aufweisen. Das ist der Grund, warum in höher gelegenen Regionen die Schadstoffkonzentration in Niederschlägen oft höher ausfällt^{18,19}.

Die Auswaschung der Schadstoffe durch Regen wird neben der Geländehöhe und Niederschlagsmenge begleitend durch die Niederschlagsintensität und Temperatur beeinflusst.

¹⁷ Vgl. Umweltbundesamt GmbH (Januar 1998): Kartierung der nassen Deposition in Österreich, S. 17-20, www.umweltbundesamt.at, (11.05.2014 – Dokument 144 der CD)

¹⁸ Vgl. Fournier R., Weston K.J., Dore A.J., Sutton M.A. (2005): Modelling the wet deposition of reduced nitrogen over the British Isles using a Lagrangian multi-layer atmospheric transport model, S. 710, (12.05.2014 – Dokument 059 der CD, englisch (USA))

¹⁹ Vgl. Möller D. (2003): Luft – Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht, S. 406

Die Reinigungskraft wird dabei durch viele Faktoren wie z.B. Regentropfchendurchmesser, Luftschichtdicke, Homogenität der Schicht, Lösungsgrad von Schadstoffen und deren Konzentration, Partialdruck, Temperatur, Konzentrationen an Oxidanten und viele weitere beeinflusst²⁰.

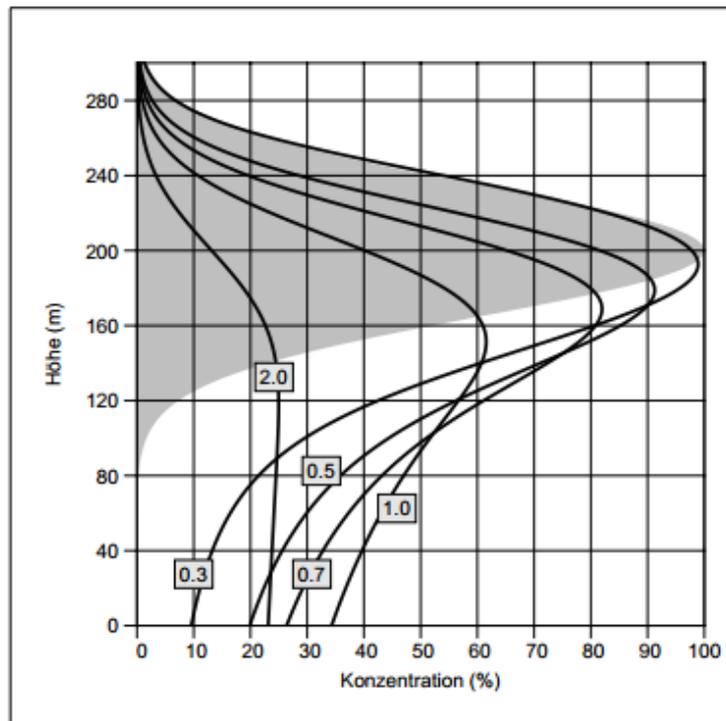


Abbildung 2: Absorption und Desorption von Sulfat beim Fall von Tropfen unterschiedlicher Größe durch eine gaußförmige Konzentrationswolke, $T=15\text{ °C}$, Tropfenradius in mm angegeben

Quelle: Janicke U., Janicke L. (2008): Auswaschen von SO_2 , NO_x und Staub durch Regen: Modellparameter für Ausbreitungsmodelle nach VDI 3945 Blatt 3, S. 5-11, (13.05.2014 – Dokument 077 der CD)

Abbildung 2 macht deutlich, dass die Regentropfen mit kleinerem Durchmesser mehr Sulfat aus der Luft aufnehmen können. Nach dem die Schadstoffwolke verlassen wird, geben diese einen großen Anteil wieder ab. Bei Tropfen mit größerem Durchmesser ist die Aufnahme und Abgabe viel geringer. Daraus folgt, dass der Schadstoffgehalt in den Tröpfchen und somit des Niederschlags stark von der Lage der Schadstoffwolke und deren Höhe abhängt.

Die Größe der Tröpfchen hängen von der Niederschlagsintensität ab. Aus der Betrachtung der Abbildung 3 wird ersichtlich, dass bei geringer Niederschlagsintensität der Verlauf der Funktion eine positive Schiefe und positiver Exzess aufweist.

²⁰ Vgl. Janicke U., Janicke L. (2008): Auswaschen von SO_2 , NO_x und Staub durch Regen: Modellparameter für Ausbreitungsmodelle nach VDI 3945 Blatt 3, S. 5-11, (13.05.2014 – Dokument 077 der CD)

Mit steigender Niederschlagsintensität kommt es zum negativen Exzess. Die positive Schiefe bleibt.

Das hat zur Folge, dass bei geringerer Niederschlagsintensität den größten Anteil am Regen die Regentropfen mit kleinen Durchmessern ausmachen. Mit steigender Intensität steigt auch die Bildung von Regentropfen mit größeren Durchmessern. Der Grund für den Tröpfchenwachstum ist die häufigere Kollision von einzelnen Tropfen²¹.

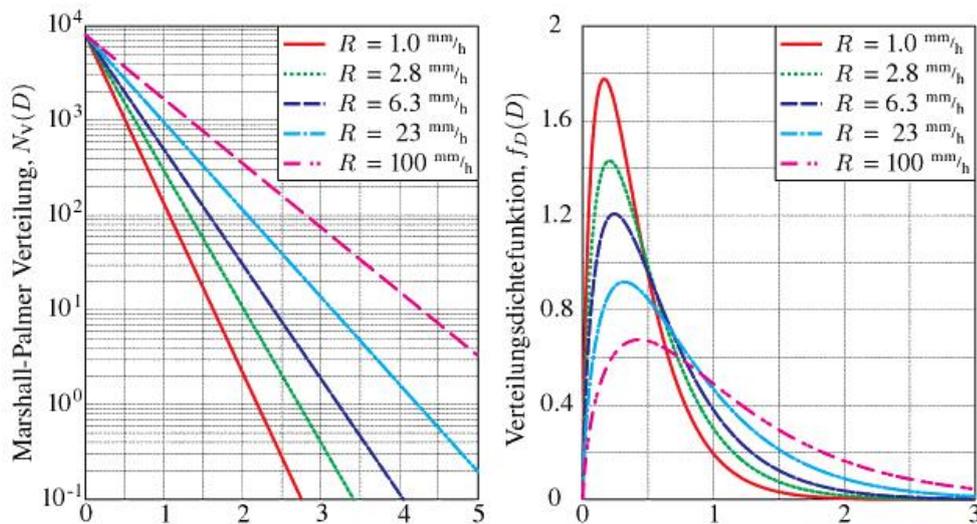


Abbildung 3: Tropfenspektrum für Verschiedene Niederschlagsintensitäten nach Marshall und Palmer und Verteilungsfunktion des Regentropfendurchmessers [in mm] für den Auftreffprozess

Quelle: Roser M. (2012): Modellbasierte und positionsgenaue Erkennung von Regentropfen in Bildfolgen zu Verbesserung von videobasierten Fahrerassistenzfunktionen, S. 12

Der Tropfendurchmesser spielt aufgrund der oben genannten Eigenschaften bei okkultur Deposition eine tragende Rolle. Zur okkulten Deposition, auch feuchte Deposition genannt, werden Nebel, Raureif, Reif und Tau zugeordnet²². Die feinen Nebel- und Tautröpfchen erreichen nach Abbildung 2 schnell an Sättigung mit Luftschadstoffen. Durch den geringen oder fehlenden Abstand zum Boden findet die Desorption in der Regel nicht statt. Diese Bedingungen sorgen dafür, dass die Konzentrationen an Schadstoffen sehr hoch ausfallen²³.

Bei der Deposition mit der Beteiligung des Wassers wird zwischen Auswaschen und Ausregnen der Luftschadstoffe unterschieden. Unter Ausregnen versteht man die Kondensation des Wasserdampfs auf die Schadstoffpartikeln in der Wolke.

²¹ Vgl. Roser M. (2012): Modellbasierte und positionsgenaue Erkennung von Regentropfen in Bildfolgen zu Verbesserung von videobasierten Fahrerassistenzfunktionen, S. 10

²² Vgl. Führer E., Nopp U. (2001): Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden, S. 206

²³ Vgl. Abart-Heriszt L. (1995): Wirkungsorientierte ökologische Planung – Stellenwert von Schadstoffkonzentration und -depositionen in der Raumplanung, S. 171

Werden die Partikeln außerhalb der Wolke durch Kollidieren mit den Regentropfen zum Boden gefördert, so spricht man von Auswaschung²⁴.

Bei trockener Deposition werden die Gase und Aerosole durch die Turbulenzen in der Luftschicht zum Boden transportiert. Die Deposition der Gase erfolgt hauptsächlich durch die Diffusionsvorgänge. Die Deposition der Aerosole und massenabhängiger Teilchen beruht auf der Sedimentation. Das Mitwirken der nassen und okkulten Deposition ist bei diesem Vorgang nicht vorhanden²⁵.

Die beschriebenen Reinigungsprozesse der Atmosphäre haben einen direkten Einfluss auf den pH-Wert des Niederschlags und einen indirekten durch die Schadstoffablagerung. Der natürliche pH-Wert des Niederschlags liegt im Bereich von 5,6. Der pH-Wert beim Niederschlag mit erhöhten Schadstoffkonzentration liegt im Bereich von 4,5 und weniger. In manchen Regionen der Erde wurden pH-Werte um 2,4 beobachtet²⁶.

Schadstoffpfad Boden

Im Boden (betrachtet als Schadstoffpfad) werden die Schadstoffe aus der Deposition und direkter Emission angereichert. Die Schadstoffe unterliegen im Boden den physikalisch-chemischen Mechanismen, Sorptions- und Ionenaustauschprozessen, Fällungsprozessen und biochemischen Prozessen²⁷.

Kommen Niederschläge, Grund- und Oberflächengewässer mit dem Boden in Kontakt, so wird der pH-Wert des wässrigen Mediums dadurch stark beeinflusst. Durch die Bodenfiltration werden die basischen Kationen freigesetzt und der pH-Wert des Wassers nimmt wieder zu. Neben den basischen Kationen werden bei gleichem pH-Wert zusätzlich Metalle und Schwermetalle mobilisiert²⁸. Die versauerungsrelevanten Prozesse in dem Schadstoffpfad Boden werden im Kapitel „Versauerungsprozesse“ ausführlich beschrieben.

²⁴ Vgl. Wiedenman M. (1999): Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Trockendeposition von polyzyklischen aromatischen Kohlewasserstoffen (PAH's) und vergleichende Messung der Einträge (trockene und nasse Deposition) an zwei unterschiedlich belasteten Standorten, S. 18-19

²⁵ Vgl. Kowal L. (1993): Messtechnik der Ammoniakemission – Am Beispiel der Rinderhaltung, S. 18

²⁶ Vgl. Kramer M. (2010): Integratives Umweltmanagement – Systemorientierte Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik, S. 12

²⁷ Vgl. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Dezember 1995): Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 4 Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Boden, S. 1, www.umwelt.sachsen.de, (13.05.2014 – Dokument 119 der CD)

²⁸ Vgl. Vornehm C. (2004): Hydro-geochemische Untersuchungen zum System Niederschlag – Boden – Grundwasser im Grundgebirge des Bayerischen Waldes, S. 52, <http://edoc.ub.uni-muenchen.de>, (14.05.2014 – Dokument 153 der CD)

Schadstoffpfad Wasser

Beim Schadstoffpfad Wasser wird zwischen Grundwasserpfad und Oberflächenwasserpfad unterschieden²⁹. Diese unterliegen den fünf wichtigen Mechanismen. Die Konvektion, Dispersion und Diffusion sind für den Transport von Schadstoffen zuständig. Die Adsorption sorgt für den Rückhalt des Schadstoffes an einem Korngerüst durch die Ablagerung. Eine wichtige Funktion spielt dabei der Abbau-Mechanismus. Er sorgt für die physikalischen, chemischen und biologischen Umwandlungsprozesse³⁰.

Die im Wasser gelösten basischen Kationen werden ebenfalls wie im Schadstoffpfad Boden an der Säureneutralisation beteiligt. Dabei sinkt der pH-Wert. Dieser kann im Laufe der Zeit durch eine weitere Bodenfiltration (Anreicherung) wieder ansteigen³¹. Die eigene Neutralisationskraft des Wassers ist gering, so dass die eigentliche Neutralisation im Boden erfolgt. Voraussetzung dafür ist ein Gleichgewicht zwischen basischen und sauren Ionen in der Bodenlösung³².

Schadstoffe und Schadstoffquellen^{33,34}

Im Folgenden werden die bedeutendsten Emittenten mit versauerungsrelevanten Schadstoffen beschrieben.

Der Verkehr umfasst alle mobilen Quellen, Warmbetrieb, Kraftstoffverbrauch und Abrieb. Zu den mobilen Quellen zählen neben den Fahrzeugen der Bahn-, Schiffs- und Flugverkehr. Die für den Versauerungsprozess besonders relevanten Schadstoffe aus dem Verkehr sind Kohlenstoffoxide, Stickstoffoxide, und Schwefeloxide. Die Emittentengruppe Verkehr wird als flächenhafte (diffuse) Schadstoffquelle betrachtet.

Eine andere Emittentengruppe stellt die Gebäudeheizung (nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen) dar und kann aufgrund hoher Dichte zu einander als flächenhafte Schadstoffquelle angesehen werden. Wichtige emittierende Schadstoffe sind Kohlenstoffoxide, Stickstoffoxide und Schwefeloxide.

²⁹ Vgl. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1996): Leitfaden zum Altlastenprogramm des Landes Sachsen-Anhalt, S. 30, www.lau.sachsen-anhalt.de, (13.05.2014 – Dokument 086 der CD)

³⁰ Vgl. GGU Zentrale Verwaltung mbH, Civilserve GmbH (September 2008): Berechnung von Schadstoffausbreitungen in Grundwassersystemen mit Finiten Elementen, S. 9, www.ggu-software.com, (13.05.2014 – Dokument 063 der CD)

³¹ Vgl. Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz (November 2013): pH-Wertveränderung, www.hortipendium.de, (14.05.2014 – Dokument 045 der CD)

³² Vgl. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Freistaat Sachsen): Ökologische Belastungsgrenzen unter Einfluss des Klimawandels, Schriftenreihe, Heft 12/2010, S. 19

³³ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (August 2005): Fortschreibung des Emissionskatasters Bayern für das Jahr 2000, S. 2, www.lfu.bayern.de, (14.05.2014 – Dokument 004 der CD)

³⁴ Vgl. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) (o.J.): Emissionskataster Hessen – Luft, www.hlug.de, (14.05.2014 – Dokument 069 der CD)

Zur Emittentengruppe Kleingewerbe zählen Tankstellen, Druckereien, chemische Reinigungen, Metallbe- und -verarbeitende Betriebe, Holzbe- und verarbeitende Betriebe, Kunststoffbe- und -verarbeitende Betriebe, Steinbrüche und andere.

Die Betrachtung kann je nach Konzentration von Betrieben punktuell und diffus erfolgen. Es werden Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxide als versauerungsrelevante Stoffe emittiert.

Eine weitere große Emittentengruppe ist die Industrie. In diese Gruppe fallen alle genehmigungsbedürftigen Anlagen entsprechend dem Anhang der 4.BImSchV (Bundesimmissionsschutzverordnung). Unter den genehmigungsbedürftigen Anlagen fallen die Branchen aus der Wärmeerzeugung, Bergbau, Energie, Metallverarbeitung, Steine und Erden, Baustoffe, chemische Erzeugnisse, Arzneimittel, Mineralöl, Harze und Kunststoffe, Holz und Zellstoff, Nahrungsmittel, landwirtschaftliche Erzeugnisse, Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen etc.

Aufgrund von hoher Emissionen wird die Emittentengruppe Industrie als punktuelle Schadstoffquelle betrachtet. Bei der Betrachtung der einzelnen Industriezweige aus der Emittentengruppe Industrie wurde festgestellt, dass gewisse Schadstoffquellen die Belastung direkt einleiten (ohne den Umweg durch den Schadstoffpfad Luft). Primär handelt es sich dabei um kommunale und private Kläranlagen, Altlasten, Abfallbehandlungsstandorte³⁵ und Bergwerkbau³⁶.

Ebenfalls in diese Gruppe können die Leckagen und Schadensfälle beim Betrieb oder Beförderung von versauerungsrelevanten Schadstoffen zugeordnet werden³⁷. Die charakteristischen Schadstoffe aus dieser Gruppe sind Kohlenstoffoxide, Stickstoffoxide, Schwefeldioxide, Ammoniak und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC).

Die Emittentengruppe privater Verbrauch wird durch die Emittierung von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan gekennzeichnet. Die Schadstoffquellen setzen sich aus Farben, Lacken, Pflegemittel (Autopflegemittel und sonstige chemische Pflegemittel) und Klebstoffe zusammen.

³⁵ Vgl. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (o.J.): punktuelle Belastungen, www.wrrl-mv.de, (15.05.2014 – Dokument 089 der CD)

³⁶ Vgl. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2001): Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser - Ergebnisse isopenhydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen im Teilprojekt 6 des Forschungsvorhabens „Konfliktarme Baggerseen (KaBa)“, www.lgrb.uni-freiburg.de, (15.05.2014 – Dokument 085 der CD)

³⁷ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA und Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz (Mai 2006): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen, S. 5, www.lawa.de, (15.05.2014 – Dokument 091 der CD)

Dabei werden im Vergleich³⁸ zu anderen Emittenten in dieser Gruppe bereits gebildete Säuren freigesetzt. Die entweichenden Säuren sind z.B. Propensäure (Acrylsäure)³⁹ und Methansäure (Ameisensäure)⁴⁰. Die Freisetzung der Schadstoffe kann als diffus angesehen werden.

Die letzte Emittentengruppe bilden biogene und nicht gefasste Quellen mit diffuser Schadstofffreisetzung. Dazu gehören landwirtschaftlich genutzte Böden, Mineral- und Wirtschaftsdüngeranwendung, Wald, Nutztierhaltung etc. Je nach Schadstoffquelle werden Stickstoffmonoxid, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan freigesetzt und Nitrat⁴¹.

In folgender Abbildung werden versauerungsrelevante Aspekte nach deren Einflussstärke auf pH-Wert zusammengefasst. Die Darstellung erfolgt im Allgemeinen.

Einflussfaktor	Versauerungsstärke		
	niedrig	mittel	hoch
Emissionen von säurebildenden Schadstoffen			x
nasse Deposition		x	
trockene Deposition		x	
okkulte Deposition	x		
Temperatur	x		
Niederschlagsmenge		x	
Niederschlagshäufigkeit		x	
Niederschlagsintensität			x
Geländehöhe		x	
Lage der Schadstoffwolke			x
geologische Verhältnisse (Basenvorrat)			x
Basenvorrat im Wasser			x

Abbildung 4: Relevante Einflussfaktoren auf pH-Wert

Quelle: Eigendarstellung

³⁸ Vgl. Umweltbundesamt GmbH (Wien 2005): VOC-Monitoring 2003/2004 in Illmitz und an zwei Messstellen in Wien, S. 18, www.umweltbundesamt.at, (15.05.2014 – Dokument 146 der CD)

³⁹ Vgl. STEINEL Normalien AG (2010): Sicherheitsdatenblatt Loctite 603, S.1, www.steinel.com, (15.05.2014 – Dokument 134 der CD)

⁴⁰ Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH (2013): Die Nutzung des Energiespeichermittels Ameisensäure für den kontinuierlichen Brennstoffzellenbetrieb, S. 3, www.zbt-duisburg.de, (15.05.2014 – Dokument 158 der CD)

⁴¹ Vgl. YARA GmbH & Co. KG (2011): Nitratdünger - Erträge optimieren, die Umwelt schonen, S. 5, www.yara.de, (15.05.2014 – Dokument 156 der CD)

2.1.2. Versauerungsprozesse

Der Wasser-pH-Wert und seine wichtigsten Einflussgrößen

Der pH-Wert wird als der negative Zehnerlogarithmus der Wasserstoffionenkonzentration gemessen in mol/l definiert und ist somit die Kenngröße zur Beurteilung des Säurezustandes von wässrigen Medien⁴². Es ist sehr wichtig zu beachten, dass der pH-Wert sich nur auf die aktiven (wirksamen) Wasserstoffionen bezieht. Der pH-Wert hängt dabei von den gelösten Stoffen, der Temperatur und dem Druck ab. Grund dafür ist die Ionenaktivität. Bei steigender Temperatur vergrößert sich die Dissoziation der Wasserstoffionen und Hydroxidionen⁴³.

Säuren und Basen leiten im Gegensatz zu neutralen Lösungen den elektrischen Strom. J.N. Brønsted stellte fest, dass die Säure Protonenspende (Protonendonator) sind und H⁺-Ionen abgeben, welche mit dem Wasser Oxoniumionen bilden⁴⁴



In einer neutralen Lösung (25°C) liegt die Stoffmengenkonzentration der Oxoniumionen bei 10⁻⁷ mol/l vor. Der neutrale pH-Wert ist dabei auf pH 7,0 definiert.

Folgende Abbildung zeigt die Konzentrationen an Oxoniumionen in Abhängigkeit vom pH-Wert. Es wird deutlich, dass die Konzentrationen pro pH-Wert-Einheit sich um Zehnerpotenz unterscheiden. Spricht man bei pH-Wertabnahme von 7 auf 1, so steigt die Konzentration an Oxoniumionen um Faktor 1*10⁶.

H ⁺ -Ionen-Konzentration (mol/l)	OH ⁻ -Ionen-Konzentration (mol/l)	pH
1	0.0000000000000001	0
0.1	0.000000000000001	1
0.01	0.0000000000001	2
0.001	0.00000000001	3
0.0001	0.0000000001	4
0.00001	0.000000001	5
0.000001	0.00000001	6
0.0000001	0.0000001	7
0.00000001	0.000001	8
0.000000001	0.00001	9
0.0000000001	0.0001	10
0.00000000001	0.001	11
0.000000000001	0.01	12
0.0000000000001	0.1	13
0.00000000000001	1	14

Abbildung 5: pH-Skala und die Konzentrationen an Oxonium- und Hydroxidionen

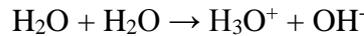
Quelle: Hamilton Bonaduz AG (April 2007): pH-Messung in der Praxis, S. 5, www.hamiltoncompany.com (10.06.2014 – Dokument 068 der CD)

⁴² Vgl. Grimm H. (o.J.), www.wissenschaft-technik-ethik.de, (15.03.2014 – Dokument 065 der CD)

⁴³ Vgl. Hamilton Bonaduz AG (April 2007): pH-Messung in der Praxis, S. 6, www.hamiltoncompany.com (09.06.2014 – Dokument 068 der CD)

⁴⁴ Vgl. CHEMIE.DE Information Service GmbH, www.chemie.de, (16.03.2014 – Dokument 030 der CD)

Im reinen Wasser ohne Zugabe von Säuren und Basen findet eine Autoprotolyse statt. Es existieren bereits die Oxoniumionen⁴⁵. Dieses Phänomen wird auch als Eigendissoziation des Wassers bezeichnet.



Durch die Zugabe einer Säure werden die Protonen an Wassermoleküle weitergegeben, was zur Erhöhung der Gleichgewichtskonzentration führt. Die Gleichgewichtsgleichung auch Massenwirkungsgesetz wird dabei wie folgt definiert:

$$K = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}] \times [\text{H}_2\text{O}]}$$

K ist dabei die Gleichgewichtskonstante. Da das Gleichgewicht stark auf der Seite des Wassers liegt, kann die Konzentration des Wassers als konstant angesehen werden. Beim Umstellen der Gleichung bekommt man die Konstante K_w , die auch als Ionenprodukt des Wassers bezeichnet wird⁴⁶.

$$K_w = c [\text{H}_3\text{O}^+] + c [\text{OH}^-]$$

Ist der Maß an H_3O^+ (Oxoniumionen) in einer Lösung höher als der Maß an OH^- (Hydroxidionen), spricht man von saurer Lösung. In einer neutralen Lösung ist dieses Verhältnis gleich und in einer basischen Lösung ist der Maß an Hydroxidionen höher als der Maß der Oxoniumionen⁴⁷.

Folgende Abbildung zeigt die pH-Skala mit zugeordneten flüssigen Medien nach ihrem pH-Wert.

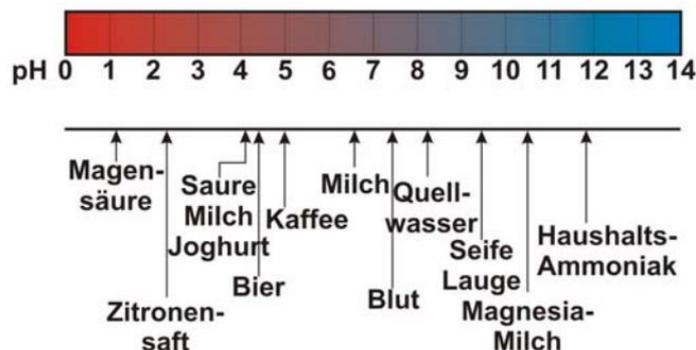


Abbildung 6: pH-Skala mit ausgewählten flüssigen Medien, zugeordnet nach ihrem pH-Wert

Quelle: Hamilton Bonaduz AG (April 2007): pH-Messung in der Praxis, S. 5, www.hamiltoncompany.com (21.06.2014 – Dokument 068 der CD)

⁴⁵ Vgl. Christoph Tornau (o.J.), www.chemieseite.de, (16.03.2014 – Dokument 140 der CD)

⁴⁶ Vgl. Bibliographisches Institut GmbH, Duden Paetec GmbH (o.J.), www.schuelerlexikon.de, (16.03.2014 – Dokument 009 der CD)

⁴⁷ Vgl. Gasteiger J. (o.J.), Eigendissoziation des Wassers, www2.chemie.uni-erlangen.de, (16.03.2014 – Dokument 060 der CD)

Wie schon oben erwähnt wurde, haben die zeitlichen Schwankungen einen Einfluss auf die Gewässerqualität. Folgende Abbildung zeigt die Temperaturänderung im Grundwasser in Abhängigkeit von der Tiefe und Jahreszeit.

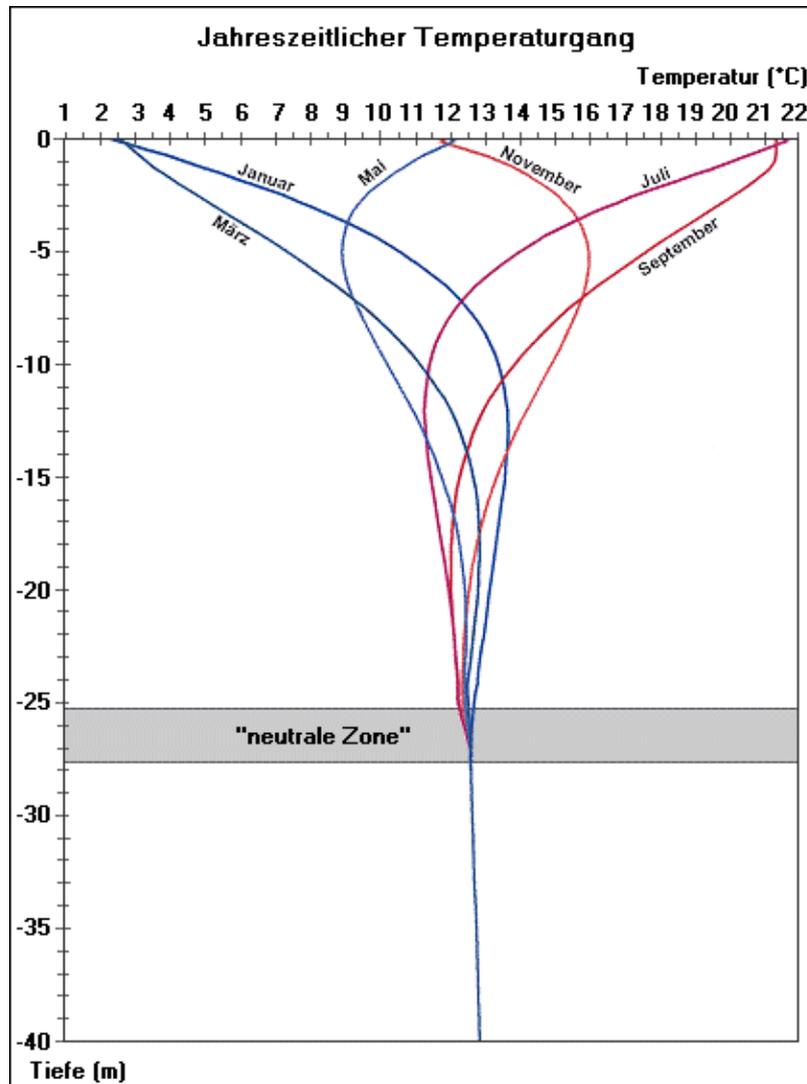


Abbildung 7: Schematischer jahreszeitlicher Temperaturgang des Grundwassers,

Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (Berlin) (2011), www.stadtentwicklung.berlin.de, (15.03.2014 – Dokument 120 der CD)

Daraus wird ersichtlich, dass auch der pH-Wert sich je nach Messtiefe und Jahreszeit unterscheiden kann. Dies hat zur Folge, dass bei oberflächennaher Grundwasserförderung bzw. Quellwassernutzung unter Umständen mit kleineren pH-Werten zu rechnen ist. Nimmt man zur Verdeutlichung eine neutrale Lösung bei der der pH-Wert 7,0 beträgt (bei 25 °C), so steigt dieser auf 7,48 bei 0°C und sinkt auf 6,92 bei 30 °C⁴⁸.

⁴⁸ Vgl. Cornelsen Schulverlage GmbH, Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie (o.J.), Ist heißes Wasser saurer als kaltes? www.chemieunterricht.de, (15.03.2014 – Dokument 033 der CD)

Bei oberflächennaher Grundwassergewinnung bzw. Quellwassernutzung hat der Druck einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die pH-Werte, da der Grundwasserleiter in der Regel ungespannt ist.

Schaut man sich die folgende Abbildung an, stellt man fest, dass für die Trinkwassergewinnung nur die Funktionslinie zwischen dem Tripelpunkt und Siedepunkt interessant wäre. Bei 5 °C beträgt der Druck 8,7 mbar und bei 25 °C 31,7 mbar, was einer Wassersäule von ungefähr 0,09 Meter bzw. 0,32 Meter entsprechen würde⁴⁹.

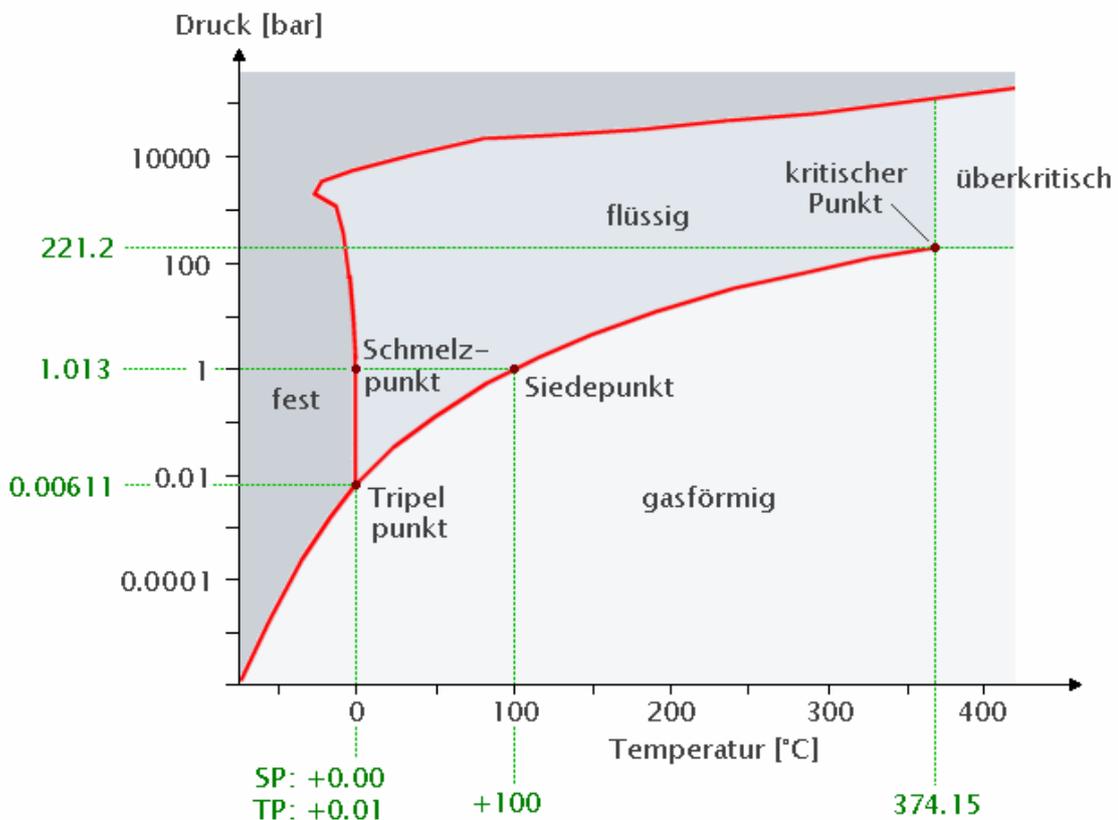


Abbildung 8: Anomalie von Wasser, pT -Phasendiagramm

Quelle: Hans Lohninger (o.J.), <http://anorganik.chemie.vias.org>, (16.03.2014 – Dokument 093 der CD)

Versorgungs- und Transportleitungen, sowie gespannte Grundwasserleiter haben einen wesentlich höheren Druck. Zum Vergleich: Ein Unternehmen gibt einen höchst zulässigen Druck für die Transportleitung von 28 Bar⁵⁰. Dieser Druck entspricht einer Wassersäule von ca. 280 Meter.

⁴⁹ Vgl. Grimm H. (o.J.), www.wissenschaft-technik-ethik.de, (15.03.2014 – Dokument 066 der CD)

⁵⁰ Vgl. Netze BW GmbH (Dezember 2010): Kenndaten zur Stuttgarter Trinkwasserversorgung 2010, www.netze-bw.de, (15.03.2014 – Dokument 101 der CD)

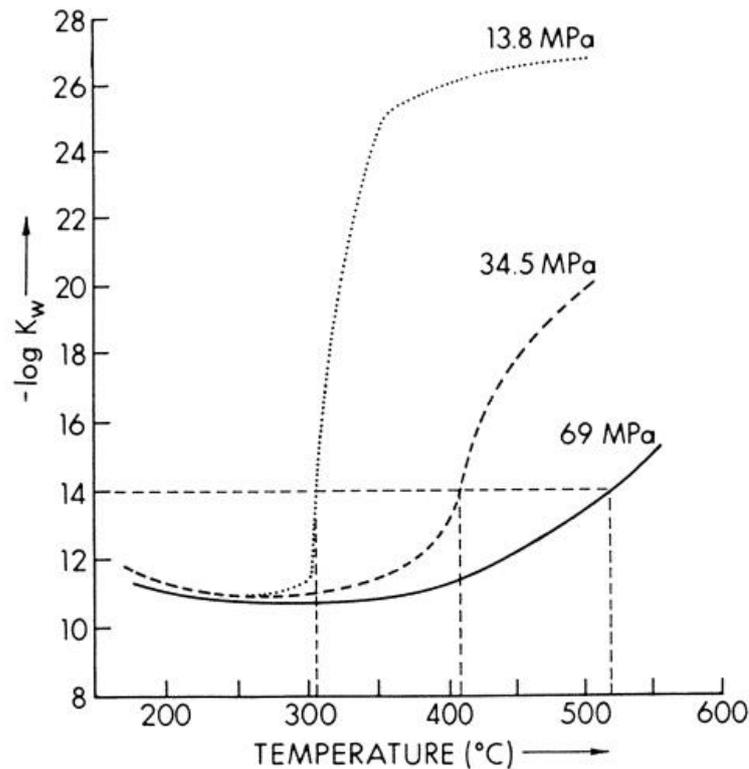


Abbildung 9: Der pK_w -Wert des Wassers als Funktion der Temperatur bei 13,8; 34,5 und 69 MPa

Quelle: *Karlsruher Institut für Technologie, Bühler W. (2000): Modellierung des Reaktionsverhaltens von Glycerin in sub- und überkritischem Wasser, S. 20, <http://bibliothek.fzk.de>, (16.03.2014 – Dokument 079 der CD)*

Durch die Betrachtung der Abbildung 9 wird der Zusammenhang zwischen dem pH-Wert, dem Druck und der Temperatur ersichtlich. Erst bei hohen Temperaturen und einem hohen Druck ist mit einer starken pH-Wertabnahme zu rechnen. Dieser steigt jedoch ab einer bestimmten Temperatur rasant an ($-\log K_w$).

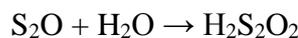
Wie schon erwähnt wurde, befindet sich der normale Temperaturbereich zwischen 5 °C und 25 °C. Auch der Druck von 28 bar (entspricht 2,8 MPa) ist im Vergleich zu dem Druck aus der Abbildung 9 deutlich kleiner. Vor diesem Hintergrund wird dem Einfluss durch den Druck auf den pH-Wert in dieser Arbeit weniger an Bedeutung beigemessen.

Versauerungsprozesse

Bei den Versauerungsprozessen verlaufen die chemischen Reaktionen als komplexe Vorgänge. Grund dafür ist wie im Kapitel „Schadstoffquellen, Schadstoffpfade und relevante Einflussfaktoren“ beschrieben, die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Substanzen natürlichen und anthropogenen Ursprungs, äußere Einflüsse und biochemische Prozesse in verschiedenen Pfaden.

Schadstoffpfad Luft

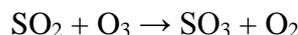
Das freigesetzte Schwefelmonoxid (SO) ist eine instabile Verbindung und wird in Millisekundenbereich⁵¹ zu Dischwefelmonoxid (S₂O) und Schwefeldioxid (SO₂) umgewandelt⁵². Dischwefelmonoxid ist ebenfalls eine instabile Verbindung und zerfällt in Schwefeltrioxid (SO₃) und Trisulfid (S₃)⁵³. Beim Kontakt mit Wasser (H₂O) bildet Dischwefelmonoxid die thioschweflige Säure (H₂S₂O₂).



Das freigesetzte und durch Umwandlungsprozesse entstandene Schwefeldioxid hat im Vergleich zu Schwefelmonoxid eine wesentlich höhere Verweilzeit (etwa 1-10 Tage)⁵⁴. Schwefeldioxid reagiert mit Wasser (Wasserdampf) und bildet schweflige Säure (H₂SO₃). Durch Sauerstoffaufnahme wird die schweflige Säure in Schwefelsäure (H₂SO₄) umgewandelt⁵⁵.



Durch die Reaktion mit Ozon (O₃) werden aus Schwefeldioxid das Schwefeltrioxid (SO₃) und der Sauerstoff (O₂) gebildet. Beim Kontakt mit Wasser bildet Schwefeltrioxid die Schwefelsäure. Durch die UV-Strahlung kommt es ebenfalls zur Schwefelsäurebildung zwischen Schwefeldioxid und Hydroxylradikal (OH)⁵⁶.



⁵¹ Vgl. Didaktik der Chemie (Universität Bayreuth): Der Schwefel und seine Sauerstoffverbindungen, <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de>, (11.06.2014 – Dokument 040 der CD)

⁵² Vgl. Institut für Anorganische Chemie der Universität Würzburg (April 1985): Vier- und fünffach koordinierte Schwefelmonoxid-Komplexe des Rhodiums und Iridiums, S. 1264, (11.06.2014 – Dokument 076 der CD)

⁵³ Vgl. Nakayama J. u.a. (2004): Reversible Disulfur Monoxide (S₂O)-Forming Retro-Diels-Alder Reaction. Disproportionation of S₂O to Trithio-Ozone (S₃) and Sulfur Dioxide (SO₂) and Reactivities of S₂O and S. 3

⁵⁴ Vgl. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (o.J.): Umweltatlas Hessen - Schwefeldioxid, <http://atlas.umwelt.hessen.de>, (11.06.2014 – Dokument 071 der CD)

⁵⁵ Vgl. Kurzweil P., Scheipers P. (2005): Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, S. 164

⁵⁶ Fellenberg G. (1999): Umweltbelastungen – Eine Einführung, S. 131

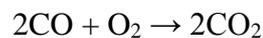
Bei Temperaturen von ca. -20°C und tiefer, kommt es durch Reaktion mit Schwefeltrioxid und Schwefelwasserstoff (H_2S) zur Bildung von Thioschwefelsäure ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_3$)⁵⁷. Bei Temperaturen von -10°C und wärmer zerfällt die Säure wieder in ihre Bestandteile. Diese Art der Säurebildung ist in nördlich liegenden Regionen mit borealen Wäldern von Bedeutung.



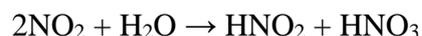
Eine weitere Säure, welche unter Beteiligung von Schwefeltrioxid entsteht ist die Dischwefelsäure ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$). Für die Bildung wird die Schwefelsäure benötigt, was dazu führt, dass die entstehenden Mengen sehr gering sind. Die Deposition erfolgt in der Regel durch Sedimentation und Adsorption (trockene Deposition). Kommt die Dischwefelsäure in Kontakt mit Wasser, zerfällt sie Schwefelsäure (doppelte Menge)⁵⁸.



Die emittierten Kohlenstoffoxide (CO , CO_2) sind ebenfalls an der Säurebildung beteiligt. Die Kohlensäure (H_2CO_3) ist ein Reaktionsprodukt des Gases Kohlendioxid mit Wasser. Die Beteiligung des Kohlenstoffmonoxids erfolgt durch Aufwertung zum Kohlenstoffdioxid durch Aufnahme von zusätzlichem Sauerstoffatom⁵⁹.



Weitere für den sauren Regen verantwortliche Schadstoffe (NO_x -haltige Abgase⁶⁰) sind Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2) und Distickstofftetroxid (N_2O_4). Dabei werden salpetrige Säure (HNO_2) und Salpetersäure (HNO_3) gebildet⁶¹.



⁵⁷ Vgl. uni-protokolle.de (o.J.), www.uni-protokolle.de, (12.06.2014 – Dokument 148 der CD)

⁵⁸ Vgl. Dickerson R.E. (1988): Prinzipien der Chemie, S. 447

⁵⁹ Vgl. Chemisches Ingenieurbüro Lapp: Kleines Wasserlexikon, S. 1, www.cil-online.de, (12.06.2014 – Dokument 032 der CD)

⁶⁰ Vgl. Novotny (Februar 2001): DGE GmbH: NO_x -Entfernung aus Abluft, www.x-technik.com, (12.06.2014 – Dokument 106 der CD)

⁶¹ Kurzweil P., Scheipers P. (2005): Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente, S. 150

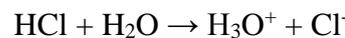
Zudem kann Salpetersäure und salpetrige Säure durch Reaktion von Hydroxylradikal und Stickstoffdioxid bzw. Stickstoffmonoxid gebildet werden^{62,63}.



Freigesetzter Ammoniak (NH_3) aus der Landnutzung reagiert in Wolken und Regentropfen schnell zum Ammonium (NH_4), welcher im Boden versauerungsrelevante Prozesse auslöst⁶⁴. Der Reaktionsverlauf ist im Schadstoffpfad Boden und Wasser identisch.



Viele direkt freigesetzte Säuren, wie z.B. Salzsäure (Chlorwasserstoff) reagieren mit Wasserdampf und bilden dabei Oxoniumionen⁶⁵.



Schadstoffpfad Boden / Wasser

Die atmosphärischen und natürlichen Säureeinträge werden durch Pufferung (Verdrängung der austauschbaren basischen Kationen) neutralisiert. Durch die unterschiedlichen geologischen Verhältnisse werden verschiedene Pufferungsbereiche angesprochen.

Kohlensäure-Carbonat-Pufferbereich ist wirksam in Böden mit hohem Carbonatgehalt (Calcit). So werden z.B. bei Neutralisation von Kohlensäure durch Calciumcarbonat Calcium- und Hydrogencarbonationen freigesetzt. Die Pufferung im Carbonatsystem dominiert im pH-Bereich von 6,2 bis 8,6.⁶⁶

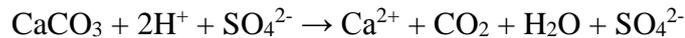
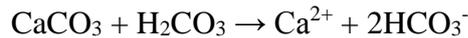
⁶² Vgl. Falbe J., Regitz M. (1998): Chemie M-Pk, S. 3316

⁶³ Vgl. Didaktik der Chemie (Universität Bayreuth): Der Schwefel und seine Sauerstoffverbindungen, <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de>, (13.06.2014 – Dokument 040 der CD)

⁶⁴ Vgl. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Januar 2010): Bericht zur Versauerung der Umwelt, S. 12, www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de, (15.06.2014 – Dokument 087 der CD)

⁶⁵ Vgl. Jansen W. u.a. (1987): Saurer Regen – Ursachen, Analytik, Beurteilung, S. 18-19

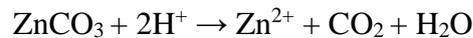
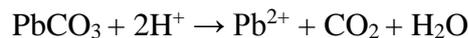
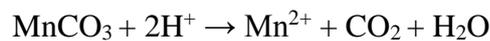
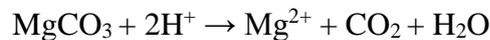
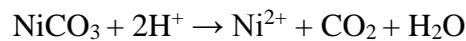
⁶⁶ Vgl. Hessisches Landesamt für Bodenforschung (1998): Hydrogeologische Untersuchungen zum Grundwasserversauerung im südlichen Taunus, S. 53



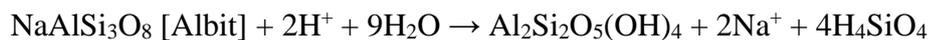
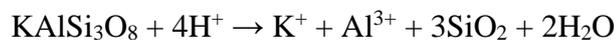
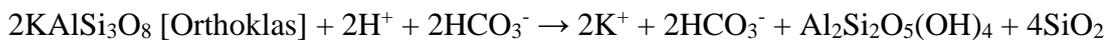
Dolomit hat im Vergleich zum Calcit eine geringere Lösungsgeschwindigkeit und puffert im pH-Bereich von 6,2 bis 7,0. Dabei werden Calcium- und Magnesiumionen freigesetzt.⁶⁷



Es gibt noch eine breite Reihe an Carbonaten, welche beim Kontakt mit Wasserstoffionen in eine Reaktion eingehen und weitere Ionen freisetzen.



Im pH-Bereich von 5,0 bis 6,2 wird das Silicat-Puffersystem aktiv. Dabei wird der Austausch basischer Kationen durch Feldspat bewirkt. So löst sich z.B. Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ - Gerüstsilikat) auf und dabei setzt Calciumionen, Aluminiumhydroxid und Siliciumsäure (Kieselsäure - H_4SiO_4) frei⁶⁸. Je nach Feldspat werden unterschiedlichen Ionen freigesetzt.

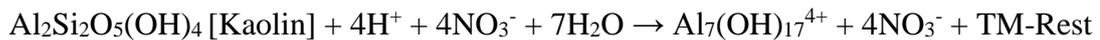
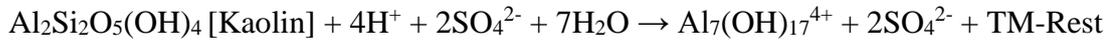


⁶⁷ Vgl. Engelhardt M. (o.J.): Prozesse und Eigenschaften, S. 4, <http://markusengelhardt.com>, (15.06.2014 – Dokument 049 der CD)

⁶⁸ Vgl. Morin K.A., Hutt N.M. (2006): Conversion of Minerals into Neutralization Potentials with Units of CaCO_3 Equivalent, S. 5, www.mdag.com, (15.06.2014 – Dokument 098 der CD)

Sinkt der pH-Wert im Boden auf 4,2 bis 5,0 so wird der Austauscher-Pufferbereich aktiv. Die Puffersubstanzen sind Tonmineralien und Restgitter primärer Silikate⁶⁹.

Der freigesetzte polymere Aluminium-Hydroxokation ($\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$) führt zur weiterer Bodenlösung von Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} und H^+ .⁷⁰ (TM-Rest = Tonmineralrest).



Sinkt der pH-Wert unter 4,2, so kommt man in Aluminium-Eisen-Pufferbereich. Die Pufferung erfolgt durch Auflösung bestimmter Hydroxide⁷¹.

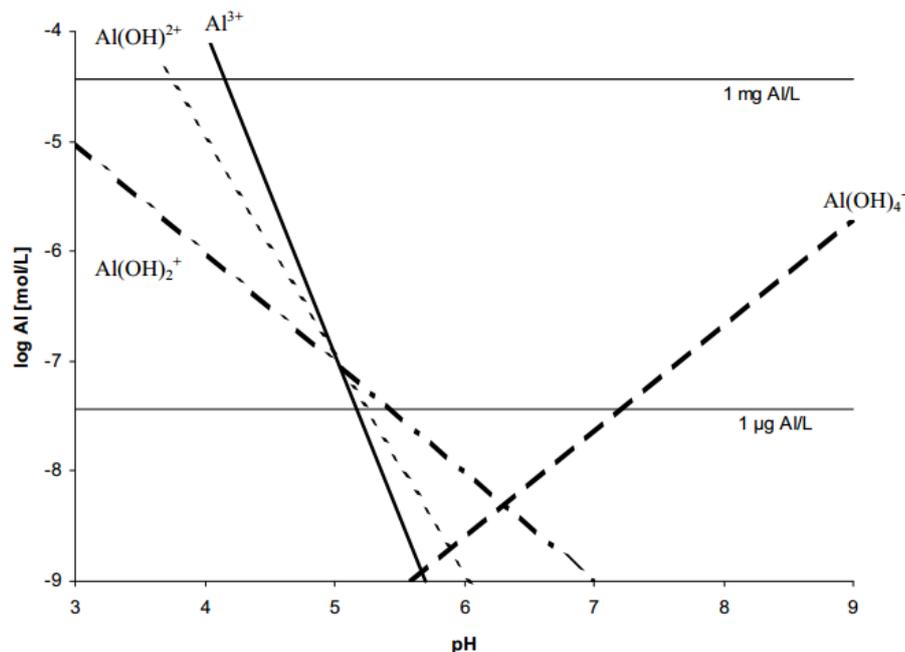
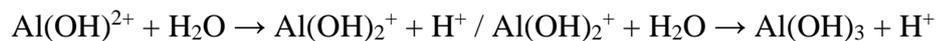
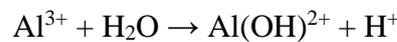
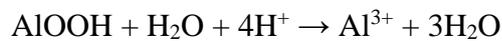


Abbildung 10: Konzentration von geladenen Aluminium-Spezies in Abhängigkeit vom pH-Wert

Quelle: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, LAWA Expertenkreis "Stoffe" (März 2010): Stoffdatenblatt Aluminium-Kation, S. 3, (15.06.2014 – Dokument 097 der CD)

⁶⁹ Vgl. Keitz S. (1994): Die Versauerung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme in Hessen – Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen (Schriftreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt), S. 45-46

⁷⁰ Vgl. Die multimediale Umweltbibliothek im Web: Pufferung im Austauscher-Pufferbereich, www.ubib-hs-rottenburg.de, (15.06.2014 – Dokument 043 der CD)

⁷¹ Vgl. Krieter M. (1991): Ökosystemare Untersuchungen zur Boden- und Gewässerversauerung im südlichen Taunus und Hunsrück, S. 46

Eisen weist den gleichen Reaktionsverlauf und wird im Weiteren nicht näher erläutert.



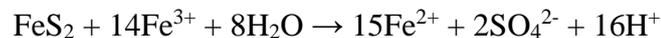
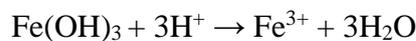
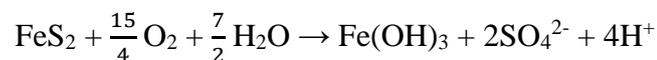
Die Freigesetzten Eisen(II)-Ionen und Magnesium(II)-Ionen, Sulfide und weitere Verbindungen werden durch Sauerstoff und Wasser oxidiert und setzen dabei weitere Wasserstoffionen frei.



Weitere Stoffe wie z.B. Ammonium werden im Boden mikrobiell zu Nitrat oxidiert (Nitrifikation). Dabei entstehen als Nebenprodukt freie Wasserstoffionen⁷².



Bergbaubedingte Versauerung entsteht durch Verwitterung der Eisensulfide und anderen Mineralien und Erze. Durch die Verwitterung von Pyrit (FeS_2) entsteht eine saure Lösung mit einem pH-Wert von ca. 3,5. Der niedrige pH-Wert wird durch die Bildung von Schwefelsäure und einem hohen Anteil an freien Wasserstoffionen begründet⁷³.



Weitere interessante Sulfide sind Alabandin (MnS), Anhydrit (CaSO_4), Arsenopyrit (FeAsS), Auripigment (As_2S_3), Cernyit ($\text{Cu}_2\text{CdSnS}_4$), Cinnabarit (HgS), Galenit (PbS) und Sphalerit (ZnS). Unter den Sulfiden sind auch Uransulfide wie z.B. Zippeit [$\text{K}_3(\text{UO}_2)_4(\text{SO}_4)_2\text{O}_3(\text{OH}) \times 3\text{H}_2\text{O}$] zu finden.

Aufgrund unterschiedlicher geologischer Verhältnisse sind die Versauerungsprozesse und der damit verbundener Stoffumsatz (Pufferung/Auswaschung) von Ort zu Ort unterschiedlich. Die Mengen an gelösten Anionen und Kationen im Wasser sind dadurch inhomogen.

⁷² Vgl. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Januar 2010): Bericht zur Versauerung der Umwelt, S. 12, www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de, (15.06.2014 – Dokument 087 der CD)

⁷³ Vgl. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und Brandenburgische Leßmann, D. & Nixdorf, B. (2009): „Konzeption zur Ermittlung des ökologischen Potentials von sauren Bergbauseen anhand der Qualitätskomponente Phytoplankton, S. 16-17, www.umwelt.sachsen.de, (19.06.2014 – Dokument 092 der CD)

2. Bedeutung und Eigenschaften des pH-Wertes in aquatischen Lebensräumen

Folgende Abbildung zeigt eine Zusammenfassung mit den Informationen zu den Säure-Pufferbereichen.

pH-Wert	8,6 – 6,2	6,2 – 5,0	5,0 – 4,2	4,2 – 3,8	< 3,8
Pufferbereich	Kohlensäure-Carbonat	Silikat	Austauscher	Aluminium / Eisen	Eisen
Pufferreaktion	Kalklösung	Silikatverwitterung	Kationenaustausch	Tonmineralverwitterung und Oxidlösung	
Pufferkapazität	groß	mittel	klein	groß	Mittel
Zusammensetzung der Boden- und Wasserlösung	hohe Gehalte von Ca^{2+} und HCO_3^-	niedrige Gehalte von Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und HCO_3^-	variable Gehalte von NO_3^- und SO_4^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_n^{3-n}$, Schwermetalle (Zn, Cd, Cu, Pb) etc.		
Reaktionspfad	Bodenluft/Sickerwasser Grundwasser/Boden (Gestein)				

Abbildung 11: Zusammenfassung zu Säure-Pufferbereichen

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (o.J.), www.umwelt.niedersachsen.de, (20.06.2014 – Dokument 105 der CD)

Folgende Abbildungen zeigen die Korrelation der pH-Werte mit ausgewählten Schadstoffen.

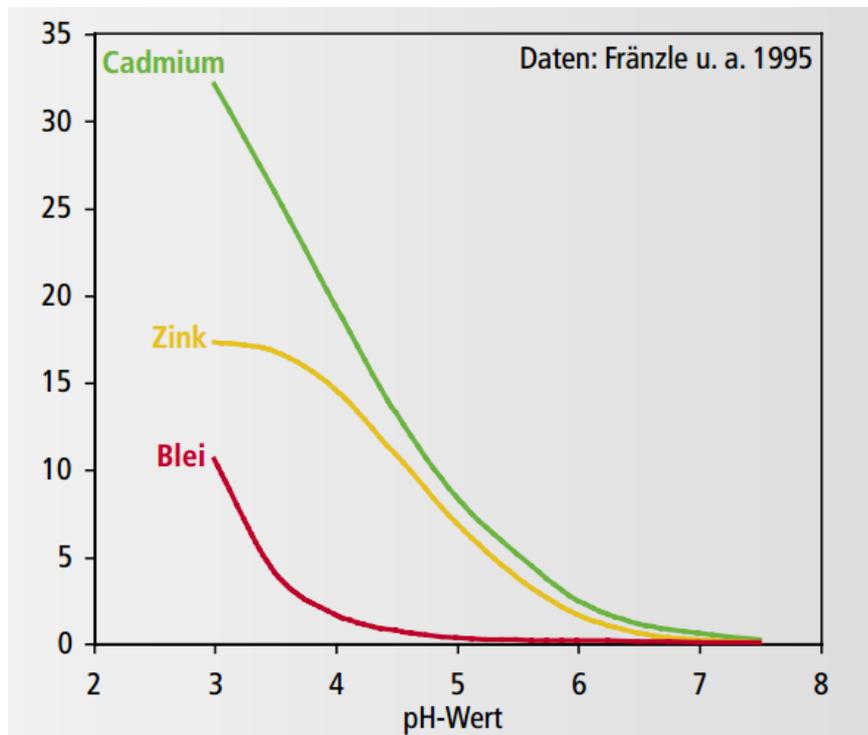


Abbildung 12: Anteil der mobilen Fraktion am Gesamtschwermetallgehalt im Boden vor Auswaschung (Angaben in Prozent)

Quelle: Rheinkalk KDI GmbH & Co. KG (2009): Kalkung zur Qualitätssicherung, S. 2, www.rheinkalk-kdi.de, (23.06.2014 – Dokument 118 der CD)

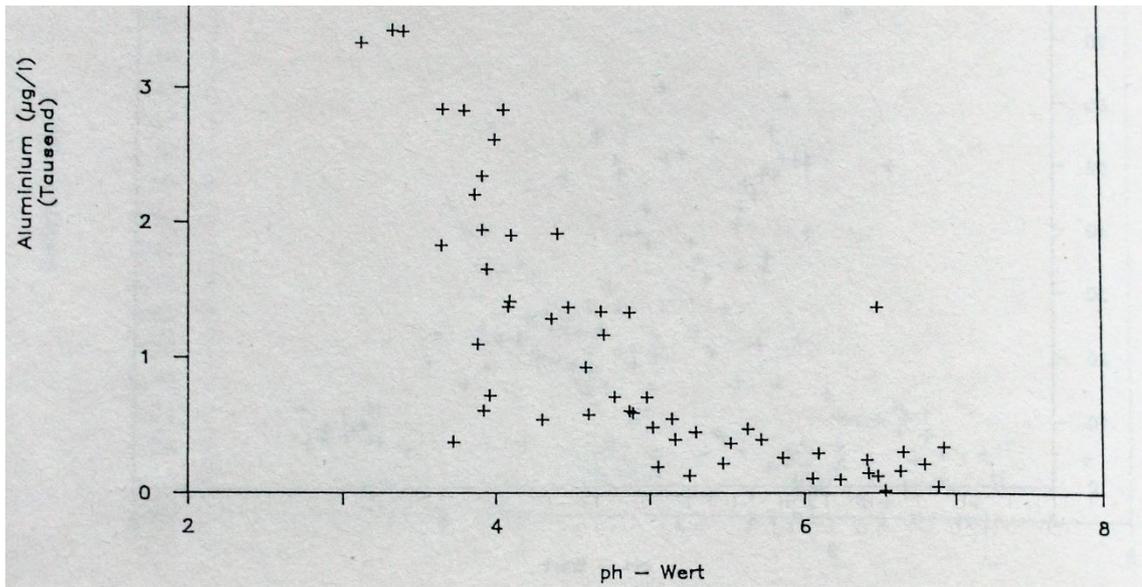


Abbildung 13: Korrelation pH-Wert – Aluminium (am Beispiel Fichtelgebirge)

Quelle: Umweltministerium Baden-Württemberg (1995): Saurer Regen – Probleme für Wasser, Boden und Organismen, S. 48

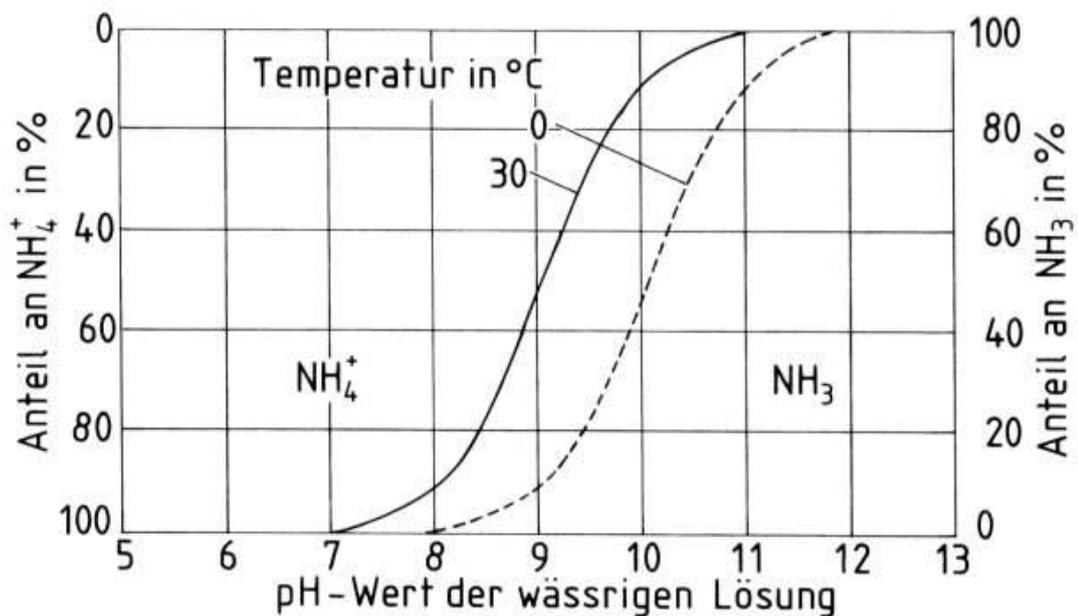


Abbildung 14: pH-Abhängigkeit des Gleichgewichts Ammonium – Ammoniak

Quelle: Der Niedersächsische Bildungsserver (NiBiS) (o.J.): Flussanalyse des Laufes, www.nibis.ni.schule.de, (23.06.2014 – Dokument 037 der CD)

Für Mangan wurde kein Diagramm gefunden. In einer neutralen Bodenlösung beträgt der Mn-gehalt ca. 0,001 bis 3 mg/l. Pro pH-Einheit steigt dieser um 100-fach und reicht durch Mobilisierung die wässrige Lösung an⁷⁴.

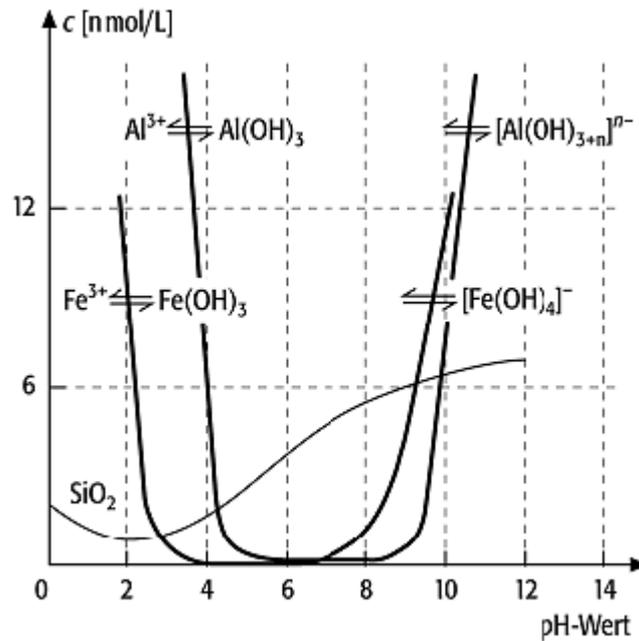


Abbildung 15: pH-abhängige Löslichkeit von Aluminium- und Eisenhydroxiden

Quelle: Stolzenberger-Ramirez A. (Universidad Nacional de Jujuy) (o.J.): Metallhydroxide, www.geodz.com, (23.06.2014 – Dokument 137 der CD)

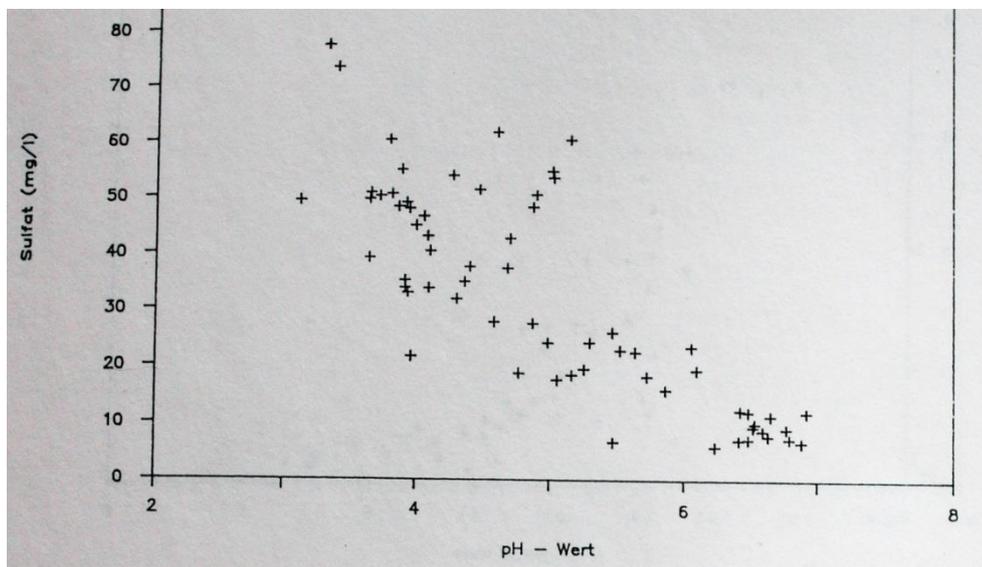


Abbildung 16: Korrelation pH-Wert – Sulfat (am Beispiel Fichtelgebirge)

Quelle: Umweltministerium Baden-Württemberg (1995): Saurer Regen – Probleme für Wasser, Boden und Organismen, S. 47

⁷⁴ Vgl. Technisches Büro für Landschaftsökologie, -Planung, -Pflege, Univ.Lek.DI Hans Unterfrauner (2010): Vorräte und Mobilisierung von Spurenelementen im Boden und deren Funktionen für Boden und Pflanze, S. 7, www.landschaftsoekologie.at, (23.06.2014 – Dokument 138 der CD)

2.2. pH-Wertabnahme und deren Umweltauswirkungen

Der saure Regen wirkt sich auf Boden, Gewässer, menschliche Gesundheit, Gebäude, Flora und Fauna aus. Der saure Regen kann direkt, als auch indirekt schädigen. Bei direktem Weg kommt die freigesetzte oder umgewandelte Säure zum Kontakt mit der Oberfläche eines Schutzgutes. Indirekte Schädigung erfolgt durch die Wirkung der verschiedenen Ionen (z.B. Schwermetallionen) und Änderung des pH-Werts⁷⁵.

2.2.1. Umwelteinflüsse auf Flora und Fauna

Die mobilisierten Ionen können bei Flora und Fauna akute Schäden und Schäden durch Anreicherung von Schadstoffe in einem Organismus anrichten (Langzeitwirkung). Die durch einen Stoff verursachten Veränderungen sind aufgrund vielfältiger Wechselbeziehungen oft sehr komplex. Ansatzweise kann ein bestimmter Schadstoff z.B. den Stoffwechsel angreifen oder die abiotische Umweltfaktoren ändern, was zur Änderung des Lebensraums führen kann. Greift ein Schadstoff den Stoffwechsel der Pflanzen an, so wird das Wachstum von bestimmten Pflanzen beeinträchtigt, was zum Verlust der Konkurrenzstärke führen kann. Bei langfristiger Einwirkung können Verschiebungen in der Artenzusammensetzung auftreten. Die neue Pflanzengesellschaft kann dabei den Stoffhaushalt vom Boden und Wasser stark verändern⁷⁶.

In folgender Abbildung wird für ausgewählte Ökosysteme/Biotope und Pflanzen der existenznotwendiger pH-Wert abgebildet. Daraus kann die Empfindlichkeit auf Änderung der Lebensgemeinschaften bestimmter Ökosysteme abgeleitet werden.

Ökosystem / Biotop	pH-Wert	Pflanzenart	pH-Wert
Hochmoor	2,5 bis 3,5	Torfmoos	2,8 bis 4,0
Sumpfwiese	3,9 bis 6,0	Heidelbeere	3,5 bis 4,5
Mischwald	4,7 bis 6,3	Heidekraut	3,7 bis 5,2
Flachmoor	5,7 bis 6,8	Weizen, Mais	5,3 bis 7,0
trockene Wiese	6,3 bis 7,4	Mohn, Zwiebel	5,8 bis 7,5
Acker (Kalkboden)	6,8 bis 8,2	Hauflattich	6,9 bis 8,3

Abbildung 17: pH-Werte für ausgewählte Ökosysteme und Pflanzen

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Stadt Wuppertal: Versauerung von Böden – die Bodenreaktion, Versuchseinheit 3, S. 4, www.wuppertal.de, (23.06.2014 – Dokument 131 der CD), Broßke D.: Ökosysteme, www.abiwissen.info, (23.06.2014 – Dokument 009_2 der CD) und Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2006): Hoch- und Niedermoore Entstehung und Eigenschaften, (23.06.2014 – Dokument 029 der CD)

⁷⁵ Vgl. Didaktik der Chemie (Universität Bayreuth): Saurer Regen – Entstehung, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen, <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de>, (21.06.2014 – Dokument 041 der CD)

⁷⁶ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Luftschadstoffe – Wirkungen auf Ökosysteme, S. 2, www.lfu.bayern.de, (23.06.2014 – Dokument 005 der CD)

Die Änderungen im Stoffwechsel bezüglich Nährstoffaufnahme durch sinkenden pH-Wert werden in folgender Abbildung dargestellt.

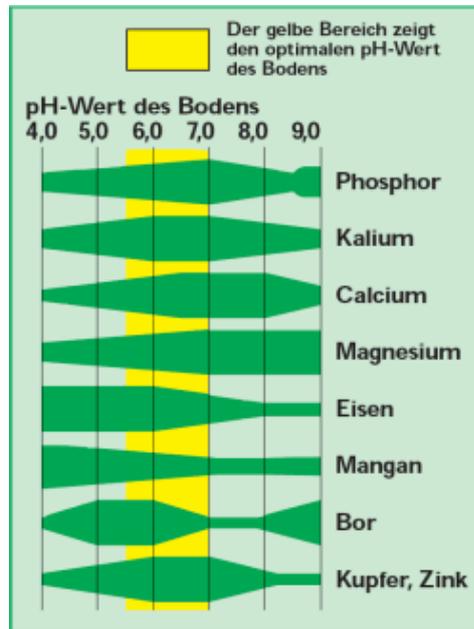


Abbildung 18: Verfügbarkeit der Nährstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert

Quelle: W. Neudorff GmbH KG (o.J.): pH-Wert, www.neudorff.de, (23.06.2014 – Dokument 155 der CD)

Die Beeinträchtigung auf das Wachstum von Schwermetallen wird in folgender Abbildung dargestellt.

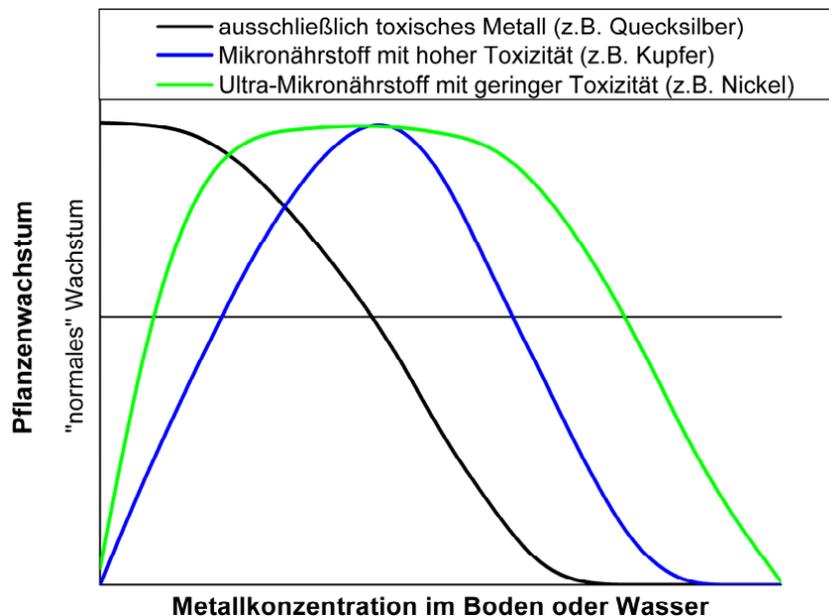


Abbildung 19: Wachstumsverlauf einer Pflanze in Abhängigkeit von dem Schadstoff

Quelle: Universität Konstanz (2010): Schwermetalle und Pflanzen – eine komplizierte Beziehung (II), www.uni-konstanz.de, (24.06.2014 – Dokument 149 der CD)

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass sinkender pH-Wert Einfluss auf die Enzymaktivität, Stoffwechselregulation, Zelltod und sogar Pflanzentod haben kann⁷⁷. Besonders grundwasserabhängige Ökosysteme sind Niedermoore, Feuchtheiden, Feuchtgrünland, Flutrasen, Bruchwälder, Uferweiden, Eichen-Heinbuchenwälder und Auenwälder⁷⁸.

Folgen der Einwirkung auf Fauna durch den sinkenden pH-Wert sind mit den Pflanzen identisch. Makrozoobenthos (aquatische Wirbellose) und Diatomeen (Kieselalgen) reagieren besonders empfindlich auf die Änderung des pH-Werts. Es treten markante Artenverarmungen auf⁷⁹. Weitere Einwirkung erfolgt durch den Sauerstoffentzug bei Oxidationsprozessen während der Säurebildung. Dies führt zum vermehrten anaeroben Abbau der Organik und Absterben der auf Sauerstoff angewiesenen Organismen⁸⁰.

Durch die gelösten Schwermetalle kann in wässrigen Medien und im Boden eine Toxizität auftreten, welche den mikrobiellen Abbau von organischen und anorganischen Schadstoffen hemmt oder ganz unterbindet⁸¹.

Durch das Absterben oder Zurückgehen des tierischen Benthos und Fauna kommt es zur Beeinträchtigung in der Nahrungskette von höheren Organismen. Die Abnahme des pH-Werts kann zur Schädigung der Eier, Larven und Jungtieren von Fischen und Amphibien beitragen. Bei Bachforelle (tödlicher pH-Wert < 5,5)⁸² kann es sogar zum Ausfall von ganzem Jahrgang kommen und bei wiederholten Ereignissen zur Auslöschung der ganzen Population⁸³.

Weitere Gefahr besteht durch die Akkumulation von Schadstoffen in einem Organismus. Die Aufnahme kann durch die Nahrungskette (Pflanzen etc.) und Wasser erfolgen⁸⁴.

⁷⁷ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004): Luftschadstoffe – Wirkungen auf Ökosysteme, S. 3, www.lfu.bayern.de, (23.06.2014 – Dokument 005 der CD)

⁷⁸ Vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (März 2007): Grundwasser – Guter Zustand bis 2015!, S. 7, www.bund.net, (23.06.2014 – Dokument 016 der CD)

⁷⁹ Vgl. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz: Biologische und chemische Qualitätskomponenten zur Einstufung des ökologischen Zustandes, S. 2-3, www.wrrl.rlp.de, (24.06.2014 – Dokument 095 der CD)

⁸⁰ Vgl. Lohmeyer S. (1993): Wassernutzung und Abwasserreinigung in Betrieb und Kommune I, S. 339

⁸¹ Vgl. Scholz R.W. u.a. (1997): Zentrum Zürich Nord – Stadt im Aufbruch, S. 223

⁸² Vgl. Fischerzeugerring Niederbayern e.V. (2004): pH-Wert, <http://fischerzeugerring-niederbayern.de>, (24.06.2014 – Dokument 058 der CD)

⁸³ Vgl. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Januar 2010): Bericht zur Versauerung der Umwelt, S. 16, www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de, (24.06.2014 – Dokument 087 der CD)

⁸⁴ Vgl. Kaltschmitt M. u.a. (2009): Energie aus Biomasse, 2. Auflage, S. 345

2.2.2. Umweltauswirkungen auf Menschen

Der Konsum vom sauren Trinkwasser in Verbindung mit sauren Lebensmitteln kann zur Übersäuerung des menschlichen Organismus führen. Wird zu viel Säure dem Körper zugeführt, so kann diese nicht durch normale Wege neutralisiert und ausgeschieden werden. In extremen Fällen kann es sogar zur Entmaterialisierung des Skelets und Einlagerung der Säure in Bindegewebe, Gelenken und Muskeln kommen (Zwischen- und Endlagerung). Zugleich wird durch Übersäuerung der Säure-Basen-Balance gestört, was zur Beeinträchtigung des Stoffwechsels und dem Wohlbefinden führt (Müdigkeit, Konzentrationsschwäche)⁸⁵. Die Trinkwasserverordnung sieht dabei einen minimalen pH-Grenzwert von 6,5.

Weitere Gefahren entstehen durch die im Kapitel 2.2.1. genannte Aspekte. Zum einem führen diese zum Verlust der Ökosystemleistungen, zum anderen tragen diese zur körperlicher Schädigung durch Akkumulation von Schwermetallen bei. Die Schädigung der Flora und Fauna führt dazu bei, dass die Ökosystemleistungen geschwächt werden. Dies führt zur verringerten Wasserreinigung, Bodenfruchtbarkeit, Lebensraumverlust etc.⁸⁶ Die Qualität an Gewässern wird dadurch schlechter und die Aufbereitungsschritte aufwendiger. Dies führt zur materiellen und monetären Schäden.

Die Einlagerung der Schadstoffe im Körper führt bei bestimmter Konzentrationen zur Toxizität. Die Akkumulation erfolgt in Haaren, Knochen, Haut, Leber und Niere. Die Schadstoffe können über das Wasser und Nahrung (die durch Versauerung verstärkt die Schadstoffe aufnimmt) in den menschlichen Körper gelangen. Neben der Einlagerung wird zusätzlich eine Wirkung auf den Stoffwechsel ausgeübt. Die Schwermetalle können im Körper essentielle (lebensnotwendige) und nicht essentielle Funktionen unterstützen⁸⁷.

Durch die Aufbereitungsprozesse können die Schwermetalle entfernt und der pH-Wert angehoben werden. Schwierig wird es in Länder mit „einfacher“ oder fehlender Trinkwasseraufbereitung. Vor allem durch die Verschlechterung der Gewässerqualität (Süßwasser) wird das lebensnotwendige Medium knapper. Die säurebedingte Freisetzung von Mangan und Eisenionen machen sogar das Wasser ungenießbar und somit nicht direkt zum Nahrungsgebrauch nutzbar⁸⁸.

⁸⁵ Vgl. Ingenieurbüro Bodenhöfer (o.J.): Die Bedeutung des pH-Wertes beim Menschen, www.bodenhoefer.com, (24.06.2014 – Dokument 075 der CD)

⁸⁶ Vgl. Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention, Tasser E. (o.J.): Ökosystemleistungen der Berglandwirtschaft, www.alpconv.org, (24.06.2014 – Dokument 133 der CD)

⁸⁷ Vgl. Technische Universität Dresden, Dittmar T. (o.J.): Vorlesung Wasserinhaltsstoffe – Schwermetalle, <http://tu-dresden.de>, (25.06.2014 – Dokument 139 der CD)

⁸⁸ Vgl. Deutscher Verein d. Gas- u. Wasserfaches e.V. u.a. (März 200): Wasserverwendung/Trinkwasser-Installation, Band 4, S. 64

Weitere Gefahren bestehen durch die Änderung der Vegetation (wie z.B. Waldsterben). Es ist nicht auszuschließen, dass durch die sinkende Ökosystemleistungen die Biomassenaktivität (C-Senke) kleiner ausfällt, was dazu führt, dass die Konzentrationen an Luftschadstoffen steigen und somit den Versauerungsprozess verstärken. Zum Vergleich: Moore bedecken etwa 3 Prozent der weltweiten Landfläche und binden doppelt so viel Kohlenstoff wie alle Wälder der Erde⁸⁹. Die Schädigung der menschlichen Gesundheit durch die Kohlenstoffoxide sind Kopfschmerzen, kardiale Störungen, Herz-Gefäß-Krankheiten und Tod⁹⁰.

Bei extremer Versauerung über längere Zeit ist der pH-bedingter Verlust von Ackerfläche nicht auszuschließen. Als Folge kann hier die Lebensmittelknappheit genannt werden⁹¹.

3. Aktuelle Regelungen und Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung

In diesem Kapitel werden die aktuelle Regelungen und Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung auf der EU und Deutschland ebene betrachtet. Bei der Betrachtung werden Emissions- und Immissionsrechte, Wasser- und Bodenrecht, sowie weitere schadstoff- und versauerungsrelevante Regelungen berücksichtigt.

3.1. Gesetzliche Regelungen in Deutschland und EU

EG-Wasserrahmenrichtlinie

Die „Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“ stellt eine neue Dimension in der europäischen Gewässerpolitik. Sie fordert die Bewirtschaftung der Flusseinzugsgebiete über Staats- und Ländergrenzen hinweg. Eine der zentralen Ziele der Wasserrahmenrichtlinie ist alle Gewässer in der Gemeinschaft bis 2015 in einen guten Zustand zu überführen. Durch diese Zielsetzung setzt die Richtlinie einen Qualitätsmaßstab, an dem sich die Nutzung orientieren soll.

Durch den angestrebten guten chemischen Zustand der Gewässer (incl. Grundwasser) wird für die bestimmten Schadstoffe eine Konzentrationsgrenze gefordert⁹².

⁸⁹ Vgl. Aktionsgemeinschaft „Rettet den Burgwald“ e.V. (o.J.): Moore, www.ag-burgwald.de, (25.06.2014 – Dokument 001 der CD)

⁹⁰ Vgl. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Baumann H.J. (o.J.): Luftschadstoffe als Belastungsfaktor für die menschliche Gesundheit, S. 3, <http://bund-hamburg.bund.net>, (25.06.2014 – Dokument 017 der CD)

⁹¹ Vgl. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Januar 2010): Bericht zur Versauerung der Umwelt, S. 93, www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de, (25.06.2014 – Dokument 087 der CD)

Durch das Ziel zur Vermeidung einer Verschlechterung und Schutz, sowie Verbesserung des Zustands der aquatischen Ökosysteme kann auch der pH-Wert eine entscheidende Rolle spielen. Der Schutz der Ökosysteme durch spezifische Maßnahmen zur Reduzierung der Einleitungen, Emissionen und Verlusten von gefährlichen Stoffen kann ebenfalls als ein Ziel mit Hinblick auf den pH-Wert angesehen werden (Säurebildner).

In der Wasserrahmenrichtlinie taucht der Begriff pH-Wert in Verbindung mit physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten auf und ist somit ein Bewertungskriterium für Gewässerqualität. Außerdem wurde der pH-Wert als ein pflichtiger Leitparameter zur Überwachung der Grundwasserkörper festgelegt⁹³.

EG-Grundwasserrichtlinie

Die „Richtlinie zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung“ ist ein Instrument zum Schutz des Grundwassers auf europäischer Ebene. Eine der Ziele dieser Richtlinie ist der Schutz des Grundwassers vor Verschlechterung und chemischer Verschmutzung. Es wird noch mal betont, dass das Grundwasser das empfindlichste und größte Süßwasservorkommen in der Europäischen Union ist.

Im Weiteren wird in der Richtlinie die Mindestliste von Schadstoffen und ihren Indikatoren in Erwägung gezogen. Unter diesen Stoffen sind Blei, Cadmium, Arsen, Ammonium und Sulfat zu finden. Diese können in Verbindung mit dem sinkenden pH-Wert gebracht werden⁹⁴.

EG-Nitratrichtlinie

Die „Richtlinie zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen“ ist ein Instrument um die Belastungen diffusen Quellen zu minimieren. Der Schutz zielt auf menschliche Gesundheit, lebende Ressource und Ökosysteme der Gewässer ab.

⁹² Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (August 2008): Grundwasser in Deutschland, S.58-59

⁹³ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 012 der CD)

⁹⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: RICHTLINIE 2006/118/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung, www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 013 der CD)

Es wird die Notwendigkeit für die Ausbringung von Düngemitteln erwähnt⁹⁵. Die Beteiligung des Nitrats am Versauerungsprozess ist im Kapitel 2.1.2 beschrieben.

EG-Industrieemissionsrichtlinie

Die „Richtlinie über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)“ enthält Informationen zu Genehmigungsaufgaben, welche die Anforderungen für den pH-Wert pro Zeiteinheit berücksichtigen. Im Weiteren enthält die Richtlinie Sondervorschriften für Titanoxid produzierenden Anlagen, in denen das Verbot der Einleitung von Abfällen mit einem pH-Wert unter 5,5 untersagt ist (Filtersalze, Schlämme, flüssige Abfälle).

Die Emissionsüberwachung im Teil 6 der Richtlinie schreibt die kontinuierliche pH-Wertmessung vor. Zusätzlich enthält die Richtlinie die Anforderung an Überwachung von säurebildenden Luftschadstoffen wie z.B. Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid etc. Emissionen von Säuretröpfchen in die Luft aus den Anlagen sind zu vermeiden. Dies bezieht sich vor allem auf die Anlagen zur Herstellung von Carbonsäure, Chromsäure, Flusssäure, Salpetersäure, Salzsäure, Schwefelsäure etc.⁹⁶

Weitere relevante EG-Richtlinien

Die „Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ ist ein Instrument zur Genehmigung von Anlagen und wirkt medienübergreifend. Die Behörden sollen bei der Genehmigung die Auswirkungen auf die Luft, Wasser und Boden abwägen, da bestimmte Schadstoffe einen Einfluss auf Versauerungsprozesse haben⁹⁷.

Sie fordert Berücksichtigung der Schadstoffe wie z.B. Schwefeloxide und Stickstoffoxide im Pfad Luft, sowie Berücksichtigung von säurebildenden Verbindungen (z.B. Nitrate) im Schadstoffpfad Wasser⁹⁸.

⁹⁵ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: RICHTLINIE DES RATES vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen, www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 014 der CD)

⁹⁶ Vgl. RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 056 der CD)

⁹⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (August 2008): Grundwasser in Deutschland, S.61

⁹⁸ Vgl. RICHTLINIE 2008/1/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 054 der CD)

Die „Richtlinie zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen“ sieht den Schutz für Umwelt und Menschen vor. Dort werden unter anderem säurebildende Stoffe und Säuren aufgelistet, welche den pH-Wert extrem (je nach Menge) beeinflussen können⁹⁹.

Indirekt wirkt sich auch die „Richtlinie über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch“ auf den pH-Wert aus, indem diese die Qualitätsanforderungen anspricht¹⁰⁰.

Weitere Richtlinie die im Zusammenhang mit dem pH-Wert steht, ist die „Richtlinie über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten“. Dort werden die pH-Werte für verschiedene Gewässertypen festgelegt und die Notwendigkeit der pH-Wertüberwachung. Daneben enthält die Richtlinie die Werte für Zink und Ammonium¹⁰¹.

Die „Richtlinie über die Qualitätsanforderungen an Muschelgewässer“ enthält ebenfalls die Qualitätsanforderungen an pH-Wert. Dieser liegt im Bereich von 7-9. Zusätzlich werden die Schwermetalle aufgelistet¹⁰².

Die „Richtlinie über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik [...]“ sieht die Notwendigkeit von Einführung des pH-Werts bei bestimmten Qualitätsnormen, da der pH-Wert die Bioverfügbarkeit von Metallen beeinflusst¹⁰³.

Wasserhaushaltsgesetz

Im „Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts“ werden die grundlegenden Bestimmungen zur Gewässerbewirtschaftung festgehalten. Unter allgemeinen Grundsätzen werden Ziele genannt, die eine Interpretation zum pH-Wert ermöglichen.

⁹⁹ Vgl. RICHTLINIE 96/82/EG DES RATES vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen, eur-lex.europa.eu, (25.06.2014 – Dokument 055 der CD)

¹⁰⁰ Vgl. RICHTLINIE 98/83/EG DES RATES vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 051 der CD)

¹⁰¹ Vgl. RICHTLINIE 2006/44/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten, <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 052 der CD)

¹⁰² Vgl. RICHTLINIE 2006/113/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Dezember 2006 über die Qualitätsanforderungen an Muschelgewässer, <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 053 der CD)

¹⁰³ Vgl. RICHTLINIE 2008/105/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG, <http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 050 der CD)

So gehört z.B. zum Schutz von nachteiligen Veränderungen von Gewässereigenschaften auch die Regulierung des pH-Wertes. Mit dem Ziel die möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen, gehört auch der pH-Wert mit dazu. Grundlagen dafür sind die sauren Niederschläge und die Nutzungsumstellung in Folge des Klimawandels.

Zum Ziel die Gewässer in ein natürliches oder naturnahes Zustand zu überführen oder zu schützen kann der pH-Wert eine wichtige Rolle spielen. Die Regelungen zur Erlaubnis oder einer Bewilligung lassen Spielräume zu den Auflagen bezüglich des pH-Werts offen. Weitere Anhaltspunkte können Heilquellenschutz und Abwasserbeseitigung bieten¹⁰⁴.

Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ regelt den Umgang mit den Abfällen. Das Gesetz sieht vor, dass der gesamte Schadstoffgehalt der Abfälle unerheblich sein muss und nicht die Qualität von Oberflächen- und Grundwasser gefährden¹⁰⁵.

Chemikaliengesetz

Das „Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen“ definiert, dass umweltgefährdende Stoffe und Gemische bzw. deren Umwandlungsprodukte in der Lage sind, die Beschaffenheit von Wasser, Boden, Luft, Mikroorganismen etc. derart zu verändern, dass dadurch Gefahren für Umwelt herbeigeführt werden können¹⁰⁶.

Bundes-Immissionsschutzgesetz

Das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ verfolgt das Ziel, Menschen, Tiere und Pflanzen, Boden, Wasser, Atmosphäre und weitere Schutzgüter vor schädlichen Auswirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umweltauswirkungen vorzubeugen. Dies kann in Zusammenhang mit Versauerung durch Luftschadstoffe gebracht werden¹⁰⁷.

¹⁰⁴ Vgl. Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG), www.gesetze-im-internet.de, (25.06.2014 – Dokument 019 der CD)

¹⁰⁵ Vgl. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), www.gesetze-im-internet.de, (25.06.2014 – Dokument 020 der CD)

¹⁰⁶ Vgl. Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG), (26.06.2014 – Dokument 021 der CD)

¹⁰⁷ Vgl. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 022 der CD)

Abwasserverordnung

Die „Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer“ kann aufgrund der enthaltenen Mindestanforderungen für das Einleiten von Abwasser in Gewässer für bestimmte Anwendungsbereiche ein Instrument zur Einhaltung des pH-Werts dienen. Sie enthält unter anderem Grenzwerte zu Ammonium und Sulfat¹⁰⁸.

Grundwasserverordnung

Die „Verordnung zum Schutz des Grundwassers“ beinhaltet Kriterien zur Beurteilung des chemischen Grundwasserzustands. Die Verordnung schreibt bei der Beschreibung des Grundwasserkörpers die Angaben zur diffusen und punktuellen Schadstoffquellen, sowie Angabe einer allgemeinen Charakteristik für Deckschicht über dem Grundwasser im Einzugsgebiet.

Die weitgehende Beschreibung fordert die Angaben zur geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters, welche durch die weitere Beschreibung der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (einschließlich der Einträge aus menschlichen Tätigkeiten) ergänzt werden. Eine der pflichtigen Parameter bei der Überwachung von ausgewählten Grundwasserkörpern ist der pH-Wert. Neben dem pH-Wert sollen Nitrat und Ammonium gemessen werden¹⁰⁹.

Klärschlammverordnung

Die Verordnung beinhaltet eine Regelung zur Aufbringung vom Klärschlamm. Die Aufbringung vom Klärschlamm erfordert eine Untersuchung des Bodens und Schlamms auf pH-Wert. Für bestimmte Bodenarten ist ein Grenzwert festgelegt¹¹⁰.

Düngemittelverordnung

Die „Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln“ schreibt die Grenzwerte an Zusammensetzung für Düngemittel vor. Darunter befinden sich Angaben zum Stickstoff, Schwefel und pH-Wert.

¹⁰⁸ Vgl. Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 023 der CD)

¹⁰⁹ Vgl. Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 025 der CD)

¹¹⁰ Vgl. Klärschlammverordnung (AbfKlärV), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 024 der CD)

Bei Verwendung von konzentrierter Schwefelsäure oder Perfluorooctansäure muss der pH-Wert ebenfalls angegeben werden. In den Tabellen werden für die Düngung erlaubte Säuren aufgelistet wie z.B. Diethylentriaminpentaessigsäure ($C_{14}H_{23}O_{10}N_3$ - DTPA) oder 2-Hydroxypropan-1,2,3-tricarbonsäure ($C_6H_8O_7$ – Zitronensäure) aufgelistet¹¹¹.

Deponieverordnung

Die „Verordnung über Deponien und Langzeitlager“ schreibt Anforderungen an abgelagerte Abfälle und Deponiebau vor. Eine geologische Barriere und Rekultivierungsschicht sollen ein pH-Wert von 6,5 bis 9,0 aufweisen. Die Ablagerung gefährlicher Abfälle auf Deponien der Klassen I und II darf nur bei Abfällen mit einem pH-Wert von mind. 6,0 erfolgen. Dadurch wird vermieden, dass das nicht erfasste Sickerwasser den pH-Wert des Bodens bzw. Grundwassers stark beeinflusst.¹¹²

3.2. Aktuelle Gegenmaßnahmen

Etwa die Hälfte des Schwefeldioxidaustrags wird den Kraftwerken zugeschrieben. Kommen Kleinhaushalte und produzierendes Gewerbe dazu, steigt der Anteil auf etwa 80 Prozent. Die Freisetzung der Stickstoffoxide erfolgt zu 50 Prozent durch Verkehr. Die Energieindustrie hat dabei einen Anteil von ca. 20 Prozent¹¹³. Etwa die Hälfte der Kohlenstoffdioxidemissionen geht auf die Energiewirtschaft zurück. Zusammen mit Industrie und Verkehr, steigen diese auf ca. 80 Prozent¹¹⁴.

Als eine der aktuellsten Maßnahmen gegen die Versauerung durch Luftschadstoffe kann die Umstellung von fossiler auf regenerative Energieträger genannt werden. Durch die Umstellung wird es möglich gigantische Mengen an säurebildenden anthropogen verursachten Luftschadstoffen zu vermeiden. Die Umstellung kann im Energiesektor, Industrie, privaten Haushalten und Verkehr erfolgen.

Weitere Maßnahmen bezüglich der Luftschadstoffminimierung ist die Verschärfung der Grenzwerte (Gesetze, TA-Luft etc.). Dadurch werden Emittenten gezwungen bessere Abluftreinigungssysteme zu installieren bzw. auf schadstoffärmere Verfahren oder Ersatzenergieträger umzusteigen.

¹¹¹ Vgl. Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 027 der CD)

¹¹² Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 026 der CD)

¹¹³ Vgl. Universität Stuttgart, Friedrich R. (Oktober 2007): Luftschadstoffemissionen- Entwicklung in den letzten Jahrzehnten und Projektion in die Zukunft, S. 19-20, www2.ier.uni-stuttgart.de, (26.06.2014 – Dokument 150 der CD)

¹¹⁴ Vgl. NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V.: CO₂-Emissionen durch private Haushalte, www.nabu.de, (26.06.2014 – Dokument 099 der CD)

Im Bereich der Forst- und Landwirtschaft kommen Düngungsmaßnahmen und Nutzungsanpassungen in Frage. Durch Umbau von Fichtenreinbeständen auf Laub- und Mischwälder wird der schnelle Nährstoffentzug aus dem Boden vermieden. Da die Laubbäume in der Regel tiefreichende Wurzeln als die Nadelbäume besitzen, wird die Nitrat- und Nährstoffauswaschung gehemmt.

Durch Düngungsmaßnahmen (Kalkung) können die Versauerungsprozesse im Boden ausgeglichen bzw. die Alkalität (Basizität) erhöht werden. Die ältere Kalkungsversuche zeigen bereits heute noch ihre Erfolge. Es wird eine verbesserte Humusform, Regenwürmeraktivität und erhöhte pH-Werte in Humusaufgabe beobachtet. Um die Magnesiumversorgung zu gewährleisten werden heute magnesiumhaltige Kalke verwendet. Die Kalkung soll in geringen Mengen erfolgen (nur zur Kompensation), da sonst von einer erhöhter Auswaschung von Nitrat aus dem Boden auszugehen ist¹¹⁵.

Das Entgegenwirken der Versauerung durch Nutzungsumstellung kann z.B. durch Umstellung auf ökologischen Landbau und extensiver Weidenwirtschaft von Milchvieh erfolgen¹¹⁶.

Als technische Maßnahme bei der Trinkwassergewinnung vom versauerten Wasser wird karbonatisches Material (Filtration) angewendet¹¹⁷. Weitere Möglichkeiten der Trinkwasserentsäuerung stellt die Entsäuerung durch Ausgasen von Kohlenstoffdioxid und Dosierung basischer Stoffe¹¹⁸.

¹¹⁵ Vgl. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (1997): Bodenversauerung Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen Literaturstudie, www.lubw.baden-wuerttemberg.de, (26.06.2014 – Dokument 088 der CD)

¹¹⁶ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): Ammoniak und Ammonium, S. 10, www.lfu.bayern.de, (26.06.2014 – Dokument 006 der CD)

¹¹⁷ Vgl. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Gegenmaßnahmen, www.umwelt.niedersachsen.de, (27.06.2014 – Dokument 104 der CD)

¹¹⁸ Vgl. Zühlke K.: Entsäuerung nach der Trinkwasserverordnung, www.trinkwasserspezi.de, (in Anlehnung an DVGW Arbeitsblatt W214), (27.06.2014 – Dokument 159 der CD)

4. Gewässerqualität in Deutschland

In diesem Kapitel wird die aktuelle Qualität von oberflächennahem Grundwasser und Quellen (als Teil der Binnengewässer) dargestellt. Beim Grundwasser werden nur hydrogeologische Großräume, aufgeteilt in hydrogeochemische Einheiten betrachtet.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) schätzt das potentielle Wasserdargebot in Deutschland auf 188 Milliarden m³ pro Jahr. Das Grundwasser hat einen Anteil von ca. 26 Prozent. Dies entspricht einer Wassermenge von rund 49 Milliarden m³ pro Jahr¹¹⁹.

Die Qualität von Quell- und Grundwasser spielen eine große Rolle, da diese im Durchschnitt zu 70 Prozent an der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Deutschland beteiligt sind. Bremen, Hamburg, Saarland und Schleswig-Holstein haben im Jahre 2010 den Trinkwasserbedarf zu 100 Prozent aus Quell- und Grundwasser gedeckt. In Berlin und Sachsen waren es knapp 30 Prozent.

Insgesamt wurden im Jahr 2010 etwa fünf Milliarden m³ Wasser gewonnen. Davon waren etwa 3,6 Milliarden m³ für private Haushalte und Kleingewerbe bestimmt. Die Quell- und Grundwasserentnahme bei der nichtöffentlichen Wasserversorgung betrug im Jahre 2010 ca. 2,3 Milliarden m³. Insgesamt nimmt die Quell- und Grundwasserförderung rund 12 Prozent am gesamten Wasserdargebot ein¹²⁰.

4.1. Aktuelle Grundwasserqualität in Deutschland

Die Grundwasserbeschaffenheit wird im Wesentlichen durch pedologische, hydrogeologische, mineralogische und biochemische Wechselwirkungen am Standort beeinflusst. Dazu kommen noch anthropogene Einwirkungen und zeitliche Schwankungen, was die Beurteilung schwierig macht und sich nur punktuell anwenden lässt¹²¹.

Im Folgenden wird versucht die Grundwasserqualität als ein Ganzes zu erfassen und zu bewerten. Ein besonderer Blick wird dabei auf die Grundwasserversauerung, die Versauerungsempfindlichkeit und die Schadstofffreisetzung gelegt.

¹¹⁹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (August 2008): Grundwasser in Deutschland, S.6

¹²⁰ Vgl. Statistisches Bundesamt (Pressemitteilung vom 5. Februar 2013 – 43/13): Trinkwasser wird überwiegend aus Grundwasser gewonnen

¹²¹ Vgl. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (o.J.), www.nlwkn.niedersachsen.de, (13.03.2014 – Dokument 102 der CD)

4.1.1. Vorgehensweise zur Abschätzung der Grundwasserqualität und – versauerung

Datengrundlage

Die Datengrundlage dieser Untersuchung bildet der Web Map Service (WMS) „Hintergrundwerte Grundwasser“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. WMS basiert auf einer online hinterlegten, hydrogeologischen Übersichtskarte von Deutschland im Maßstab 1:200.000, welche mit Datensätzen aus zahlreichen anorganischen Haupt-, Neben- und Spurenelementen verknüpft ist.

Die in Web Map Service betrachteten Hintergrundwerte setzen sich aus dem geogenen Grundgehalt und unterschiedlich bedeutsamen Komponenten eines ubiquitären diffusen Eintrags in Grundwasser zusammen. Die zur Verfügung stehenden Hintergrundwerte basieren auf der Analyse von ca. 52.700 Einzelanalysen von Grundgewässern, die im Wesentlichen aus den Jahren 1980 bis 2005 stammen. Bei Überwachungsstellen z.B. von Deponien oder Altlasten wurde eine Präselektion vorgenommen, um den Zustand des Grundwassers im Allgemeinen repräsentativ darstellen zu können¹²².

Zusätzlich werden aktuelle Publikationen der Ämter und Monitoringprogramme zur Gewässerversauerung analysiert.

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet besteht aus 10 hydrogeologischen Großräumen. Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Großräume.

Zu jedem hydrogeologischen Großraum werden nur die relevanten hydrogeochemischen Einheiten betrachtet. Die Relevanz orientiert sich dabei an der Größe der einzelnen Einheiten. Die größte untersuchte Einheit hat eine Fläche von ca. 22859 km² und die kleinste untersuchte Einheit ist ca. 322 km² groß. Insgesamt wurden 87 von 112 hydrogeochemischen Einheiten mit einer Gesamtfläche von ca. 348.152 km² untersucht. Die Fläche der Bundesrepublik Deutschland beträgt¹²³ ca. 357.167 km².

Damit werden mit 87 untersuchten Einheiten ca. 97,5 Prozent der Landfläche abgedeckt.

¹²² Vgl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Juni 2011): Erläuterung zum Web Map Service (WMS) „Hintergrundwerte Grundwasser“, S. 1-4, (24.04.2014 – Dokument 028 der CD)

¹²³ Vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Stand 10.04.2014): Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung, www.statistik-portal.de, (24.04.2014 – Dokument 132 der CD)

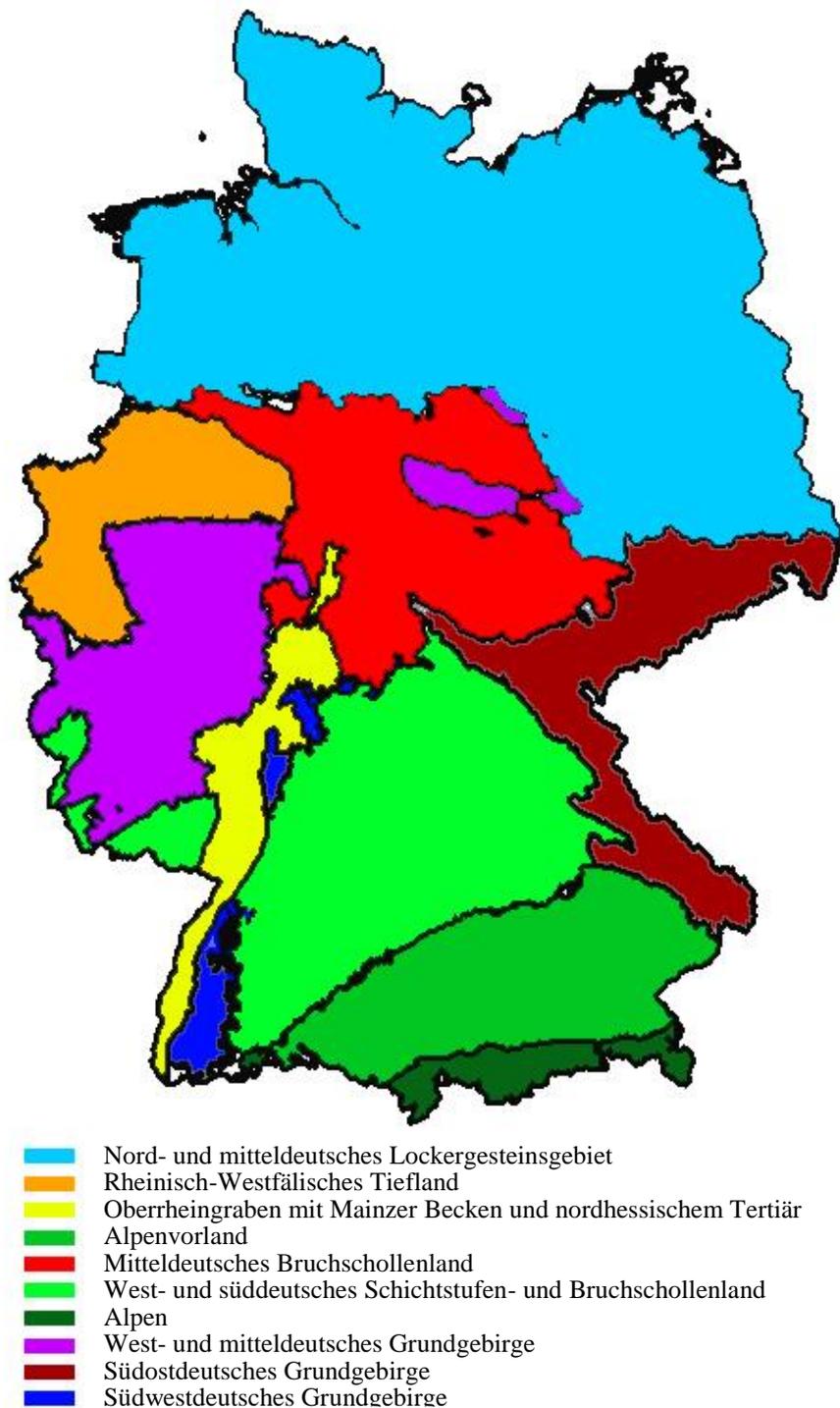


Abbildung 20: Hydrogeologische Großräume

Quelle. Eigendarstellung in Anlehnung an Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Die Bezeichnungen von 87 hydrogeochemischen Einheiten mit dazugehöriger Fläche im Ordner „HGC-Einheiten“ auf der CD im Anhang zu finden.

Datenerfassung und Untersuchungsparameter

Die in WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“ zur Verfügung stehenden Hintergrundwerte werden nur in 90%-Perzentil angezeigt. Folgende Abbildung zeigt ein Ausschnitt aus dem Ansichtsfenster (WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“).



Abbildung 21: Darstellung der Hintergrundwerte im WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Diese Art der Darstellung ist für die gewählte Analysemethodik jedoch ungeeignet, da es weder das arithmetische Mittel noch den Median anzeigt. Die Erfassung der notwendigen Daten erfolgte daher manuell in folgenden Arbeitsschritten.

Jede hydrogeologische Einheit musste zunächst einzeln rausgesucht werden. Folgende Abbildung zeigt die unterschiedliche Verteilung der einzelnen hydrogeochemischen Einheiten. Das Selektieren der einzelnen Einheiten wurde durch die gleiche Klassengrenzen für bestimmte Einheiten deutlich erschwert, vor allem bei der Wertermittlung für den verschiedenen Untersuchungsparameter. Zu einem konnten sich in einem Farbbereich mehrere Einheiten befinden, zu anderem wechselten sich die Farben je nach Untersuchungsparameter. Folgende Abbildung zeigt Beispiel.

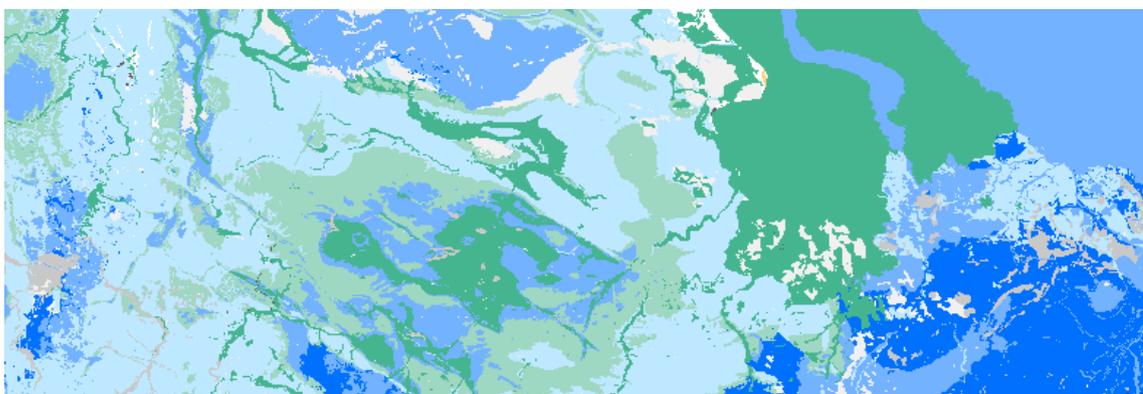


Abbildung 22: Darstellung von hydrogeochemischen Einheiten im WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Durch das Draufklicken mit Hilfe des Werkzeugs „Datenabfrage“ wurde ein Fenster aufgerufen, in dem die Bezeichnung, die Fläche, sowie die Aufteilung der Hintergrundwerte in Perzentile abgebildet waren. Folgende Abbildung zeigt die Darstellung.

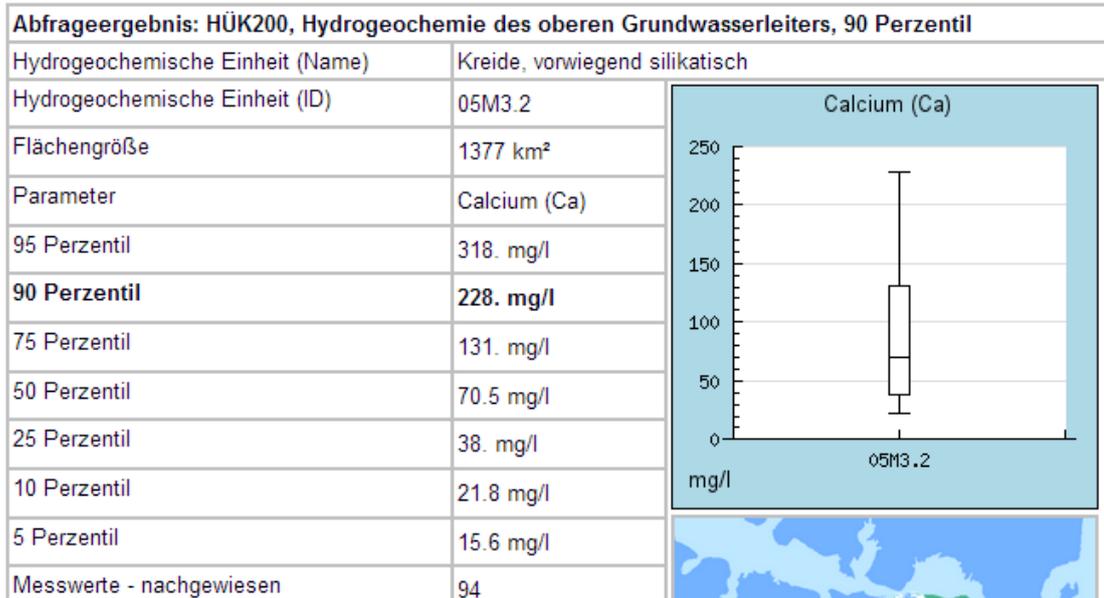


Abbildung 23: Darstellung der Datenabfrage im WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Die Abfrage bezieht sich jeweils für ein einzelnen hydrogeochemischen Einheit und gewähltes Untersuchungsparameter. Die Auswertung erfolge für 87 Einheiten mit jeweils elf Untersuchungsparametern. Um die Datenmenge zu sichern und die Vorgehensweise bei der Analyse zu optimieren, wurden die einzelnen Werte in die eigenerstellte Tabellen übernommen. Folgende Abbildung zeigt ein Beispiel.

Hydrogeochemische Einheit	Messwerte (nachgewiesen)	Calcium [mg/l] in Perzentil							Flächengröße [km²]
		5	10	25	50	75	90	95	
karbonische Ton- bis Sandsteine	210	11,1	14,7	23,6	40,0	67,8	109	145	3875
paläozoische Schiefer und Sandsteine	895	5,66	7,73	13,0	23,2	41,3	69,5	94,9	15789
paläozoische Sandsteine und Quarzite	195	3,31	4,73	8,62	16,8	32,6	59,4	85,0	2081
Rotliegend Klastite	59	17,5	22,6	34,6	55,6	89,3	137	177	2932
paläozoische Schiefer, karbonatisch	197	16,9	21,0	30,2	45,2	67,8	97,7	121	2131
paläozoische Karbonate	123	52,1	58,7	71,8	89,7	112	137	154	681
Metavulkanite	108	35,8	40,1	48,6	60,2	74,5	90,2	101	609
känozoische Basalte und Tuffe	50	51,0	52,9	56,2	60,1	64,3	68,3	70,8	1096

Abbildung 24: Tabelle für die Datenerfassung

Quelle: Eigendarstellung

Die erfassten Daten sind im Ordner „HGC-Einheiten“ auf der CD im Anhang zu finden. Insgesamt wurden über 950 Datenreihen (ca. 8600 Einzelwerte) analysiert.

Für die Beurteilung des Grundwassers wurden folgende hydrochemische und physikochemische Parameter untersucht:

Hauptanionen und Hauptkationen:	Calcium Hydrogenkarbonat Magnesium Sulfat
Neben- und Spurenstoffe:	Aluminium Eisen Mangan Ammonium Nickel Zink
Physikochemische Parameter:	pH-Wert

Festlegungen zur Bewertung der Grundwasserqualität

Die Bewertung der Grundwasserqualität erfolgt durch den chemischen Zustand, den Versauerungszustand und die Versauerungsempfindlichkeit. In die Bewertung des chemischen Zustandes fließen Aluminium, Eisen, Mangan, Ammonium, Nickel und Zink ein. Die Hintergrundinformation zur Wahl dieser Parameter ist im Kapitel 2. beschrieben. Die Bewertung erfolgt durch ein selbstdefiniertes Bewertungssystem.

Im ersten Schritt werden die Grenzwerte für die Einstufung in die Perzentil-Klasse definiert. Die Festlegung der Grenzwerte für die Einstufung erfolgt durch die Übernahme von Grenzwerten aus der Trinkwasserverordnung bzw. aus den Geringfügigkeits-schwellenwerten aus LAWA-Veröffentlichungen (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser).

Folgende Werte würden übernommen:

Aluminium	Eisen	Mangan	Ammonium	Nickel	Zink
0,200 mg/l	0,200 mg/l	0,050 mg/l	0,50 mg/l	0,020 mg/l	0,058 mg/l

Tabelle 1: Festgelegte Grenzwerte für die Beurteilung des chemischen Grundwasserzustands

Für Aluminium, Eisen, Mangan und Ammonium wurden die Werte aus der Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 2. August 2013 übernommen. Nach LAWA-Veröffentlichungen wurden keine Geringfügigkeitsschwellenwerte zu oben genannten Untersuchungsparameter festgelegt. Der Grenzwert für Nickel wurde ebenfalls aus der TrinkwV (Trinkwasserverordnung) übernommen¹²⁴. Da für Zink kein Grenzwert existiert, wurde dieser aus der LAWA-Veröffentlichung „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ übernommen¹²⁵.

Für die Interpolation der Werte wurde ein Interpolationstool mit Excel erstellt. Eine nähere Beschreibung zum Aufbau und Auswirkung auf die Ergebnisse kommt am Ende von diesem Kapitelabschnitt.

Im nächsten Schritt wurden die ermittelten Interpolationswerte in Relation mit der Fläche der einzelnen hydrogeochemischen Einheiten gesetzt. Dadurch wird es möglich die Gewichtung der Belastungen aufrecht zu erhalten. Danach werden alle errechneten Werte zusammengefasst und abschließend erfolgt die Einteilung in die Bewertungsklasse. Dies bezieht sich auf die einzelnen Untersuchungsparameter.

Die Bewertungsklassen werden wie folgt definiert:

- natürlich bis sehr gering belastet: 100% bis 95% sind in gutem Zustand
- gering belastet: 95% bis 90% sind in gutem Zustand
- mäßig belastet: 90% bis 85% sind in gutem Zustand
- kritisch belastet: 85% bis 80% sind in gutem Zustand
- stark verschmutzt: 80% bis 75% sind in gutem Zustand
- sehr stark verschmutzt: 75% bis 70% sind in gutem Zustand
- übermäßig verschmutzt: 70% bis 65% sind in gutem Zustand
- ökologisch zerstört: die 65%-Marke wird unterschritten

¹²⁴ Vgl. Bundesanzeiger Verlag GmbH (2013): Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 2. August 2013, Bundesgesetzblatt Nr. 46, Seite 2994-2997, www.bgbl.de, (25.04.2014 – Dokument 018 der CD)

¹²⁵ Vgl. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, S. 25, www.lawa.de, (25.04.2014 – Dokument 096 der CD)

Die Einstufung des Grundwassers in Versauerungszustände erfolgt durch pH-Werte¹²⁶.

- liegt der pH-Wert über sieben, so gilt das Gewässer als „unversauert“
- beim pH-Wert zwischen sechs bis sieben wird das Grundwasser als „noch unversauert“ definiert
- liegt der pH-Wert zwischen fünf und sechs, so gilt das Grundwasser als „versauernd“
- beim pH-Wert unter fünf wird das Grundwasser als „versauert“ definiert

Im Weiteren erfolgt die Beurteilung der Grundwasserversauerung (als Ergänzung) durch die Einstufung in das Diagramm von Jacks. Dabei wird angenommen, dass das Grundwasser mit ausgeglichenem Ionenverhältnis unversauert bzw. gering versauert ist. Gewässer mit Ionenverhältnis > 1 werden als stärker versauert definiert. Dabei wird die Gesamthärte (Summe der Erdalkali-Äquivalentenkonzentration) gegen die Hydrogenkarbonat-Äquivalentenkonzentration aufgetragen. Die Formel wird wie folgt definiert¹²⁷:

$$\text{Ionenverhältnis (Jacks)} = \frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{\text{HCO}_3^-}$$

Die Versauerungsempfindlichkeit wird durch den Versauerungsindex nach Hendriksen bewertet. Eine wichtige Rolle dabei spielt der Lösungsinhalt des Grundwassers, insbesondere die Alkalinität, da diese ausschlaggebend für die pH-Wertänderung bei weiterer Säurezufuhr ist.

Mit Hilfe der von Hendriksen eingeführten Indizes ist es möglich die Pufferungsverhältnisse im System Boden-Wasser-Gestein abzuschätzen. Folgende Formel wird für die Ermittlung der Versauerungsempfindlichkeit verwendet¹²⁸:

$$\text{Versauerungsindex (Hendriksen)} = \frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{\text{SO}_4^{2-}}$$

In der Literatur wird erwähnt, dass die Voraussetzung für die Nutzung dieser Formel die geringen Sulfatgehalte sind. Es ist jedoch kein Wert für die Festlegung der Grenze für hohe Sulfatgehalte zu finden. Bei der Analyse wird die Annahme getroffen, dass die vorhandenen Sulfat-Werte für die Anwendung der Formel geeignet sind.

¹²⁶ Vgl. Hessische Landesanstalt für Umwelt (September 1999): Potentielle Grundwassergefährdung durch Versauerung im Hessischen Ried – Eine GIS-Modellierung zur Ermittlung von Gefährdungspotentialen, S. 68

¹²⁷ Vgl. Hessisches Landesamt für Bodenforschung (1998): Hydrogeologische Untersuchungen zum Grundwasserversauerung im südlichen Taunus, S. 75

¹²⁸ Vgl. Hessisches Landesamt für Bodenforschung (1998): Hydrogeologische Untersuchungen zum Grundwasserversauerung im südlichen Taunus, S. 74

Das Vorherrschen des Bicarbonat-Puffersystems wird bei Ionenverhältnissen größer 1,5 definiert. Die Versauerungsgefährdung nimmt im Bereich von 4,0 bis 1,5 zu. Der Übergang vom Bicarbonat- zum Aluminiumpuffersystem findet bei Werten zwischen 1,5 bis 1,0 statt. Bei dem Ionenverhältnis von kleiner 1,0 kann man bereits von starker Versauerung und negativer Alkalität sprechen¹²⁹.

Im Weiteren wird die Versauerungsempfindlichkeit durch den Versauerungsindex nach Schoen bestimmt. Dabei wird der Versauerungsindex von Hendriksen im Nenner um eine Größe (Nitrat) erweitert¹³⁰. Aufgrund der fehlenden Werte für den Nitratgehalt wird eine Konzentration von 50 mg/l angenommen (Grenzwert aus der Trinkwasserverordnung). Dieser Grenzwert wurde gezielt als eine Eingangsgröße für die Berechnung verwendet. Aus dem Nitratbericht 2012 geht hervor, dass 15 bis 50 Prozent (je nach Nutzungsaufteilung und Gebietseingrenzung) der mittleren Nitratgehalten den Grenzwert überschreiten¹³¹. Andererseits soll dadurch verdeutlicht werden, welchen Einfluss Nitrat bei Gewässerversauerung hat.

Die Werte für Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat und Sulfat werden in mg/l erfasst. Für die Berechnung des Ionenverhältnisses nach Jacks und den Versauerungsindex nach Hendriksen müssen diese in mmol/l umgerechnet werden. Für die Berechnung der Versauerungsempfindlichkeit nach Schoen wird auch der Nitrat-Wert von mg/l in mmol/l umgerechnet.

Dafür werden folgende Umrechnungsfaktoren verwendet^{132,133,134}:

- Calcium: 1 mg/l entspricht 0,025 mmol/l
- Magnesium: 1 mg/l entspricht 0,041 mmol/l
- Hydrogencarbonat: 1 mg/l entspricht 0,0164 mmol/l
- Sulfat: 1 mg/l entspricht 0,0104 mmol/l
- Nitrat: 1 mg/l entspricht 0,0161 mmol/l

¹²⁹ Vgl. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2007): Grundwasserversauerung - Methoden zur Gefährdungsabschätzung und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen, S. 10, www.nlwkn.niedersachsen.de, (26.04.2014 – Dokument 103 der CD)

¹³⁰ Vgl. Landesamt Brandenburg (Januar 2003): Versauerungserscheinungen in quartären Lockergesteinsgrundwasserleitern unter besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Stoffeinträge, S.11

¹³¹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (September 2012): Nitratbericht 2012, S. 28

¹³² Vgl. Hoffmann F., Karger R. (2013): Wasserversorgung – Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung, S.97

¹³³ Vgl. Zühlke K. (o.J.): Berechnungen von Wasserinhaltsstoffen und Umrechnungen, www.trinkwasserspezi.de, (26.04.2014 – Dokument 160 der CD)

¹³⁴ Vgl. Merkl G. (2008): Technik der Wasserversorgung – Praxisgrundlagen für Führungskräfte, S. 62

Für das Nachvollziehen der Vorgehensweise bei der gesamten Datenanalyse und Ergebnisdarstellung wurde eine Excel-Tabelle erstellt. Diese befindet sich im Ordner „Analyse zur Grundwasserversauerung in DE“ auf der CD im Anhang.

Interpolationstool (Excel) und Auswirkungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse

Um die Interpolation zwischen den erfassten Werten vornehmen zu können, wurde ein Interpolationstool mit Excel erstellt. Die vorhandenen Werte wurden in 7 Klassen erfassungsbedingt eingeteilt (5-, 10-, 25-, 50-, 75-, 90- und 95-% Perzentil). Das Tool verfügt über 7 Eingabefelder für X- und Y-Werte für die ganze Datenreihe.

Zusätzlich wurden Felder erstellt, welche automatisch den Interpolationsbereich anzeigen. Dadurch wird es möglich die Richtigkeit der Angabe zu überprüfen. Darüber hinaus wurde ein Feld für die Eingabe des gesuchten Wertes erstellt. Die Berechnung erfolgt automatisch. Das Tool ist im Ordner „Interpolationstool“ auf der CD im Anhang zu finden.

Für die Darstellung des Interpolationsbereichs wurden folgende Befehle verwendet:

Feld mit unterer Perzentil-Grenze im Interpolationsbereich:

```
=SVERWEIS($H$18;$H$5:$I$11;1;1)
```

Feld mit oberer Perzentil-Grenze im Interpolationsbereich:

```
=INDEX($H$5:$H$11;VERGLEICH($D$5;H5:H11;0)+1)
```

Feld mit unterem Wert bezogen auf untere Perzentil-Grenze im Interpolationsbereich:

```
=SVERWEIS($D5;$H$5:$I$11;2;0)
```

Feld mit oberem Wert bezogen auf obere Perzentil-Grenze im Interpolationsbereich:

```
=SVERWEIS($D6;$H$5:$I$11;2;0)
```

Feld mit dem Interpolationswert:

```
=TREND(E5:E6;D5:D6;H18)
```

Im Weiteren wurde ein Diagrammfeld mit der Interpolationsfunktion, dem Interpolationswert, einer Ausgleichsfunktion und dem Bestimmtheitsmaß erstellt. Die Interpolationsfunktion wird dynamisch angezeigt. Der Verlauf hängt von den eingegebenen X- und Y- Werten (I-VII) ab.

Die Anzeige des Interpolationswertes erfolgt ebenfalls automatisch (dynamische Anzeige) nach der Werteingabe in dem dafür vorgesehenem Feld (X III). Die Ausgleichfunktion und der Bestimmtheitsmaß ändert sich dynamisch in Abhängigkeit von der Interpolationsfunktion.

Die Ausgleichfunktion ist eine Polynomfunktion des 3-Grades. Die Variation der Breite hängt von dem zu analysierenden Untersuchungsparameter ab und liegt im Bereich von ca. 93-99 Prozent.

Es wurde festgestellt, dass bei bestimmten Messreihen eine höhere Genauigkeit durch die Angleichung an logarithmische Funktion erreicht werden konnte. Z.B. beim Zink (Messreihe „Nordwestdeutsche Moorniederungen“) konnte ein Genauigkeitssprung von 93,58 Prozent auf 98,99 Prozent erreicht werden.

Die automatische Einstellung ist auf Polynomfunktion des 3-Grades eingestellt. Folgende Abbildungen der Funktionsfensteransicht mit erwähnten Funktionselementen.

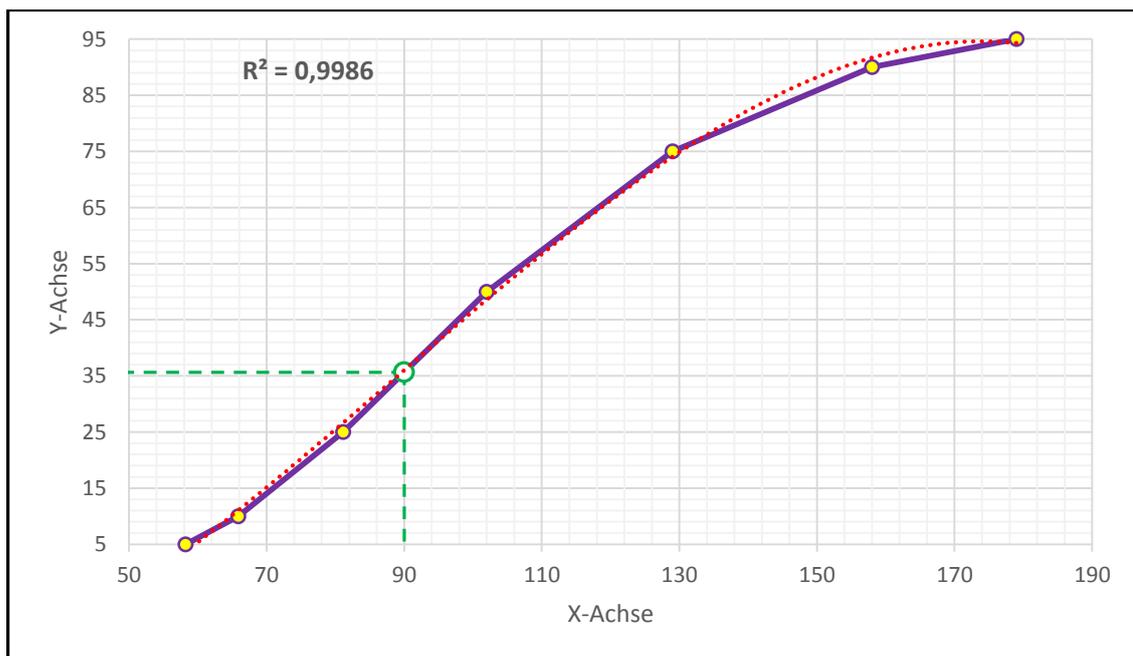


Abbildung 25: Funktionsansichtsfenster vom Interpolationstool (rot: Ausgleichsfunktion, violett: Interpolationsfunktion, grün: Interpolationswert, R^2 = Bestimmtheitsmaß),

Quelle: Eigendarstellung

4.1.2. Ergebnisdarstellung der Eigenuntersuchung zum Grundwasser

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Eigenuntersuchung für die Bundesrepublik Deutschland grafisch dargestellt.

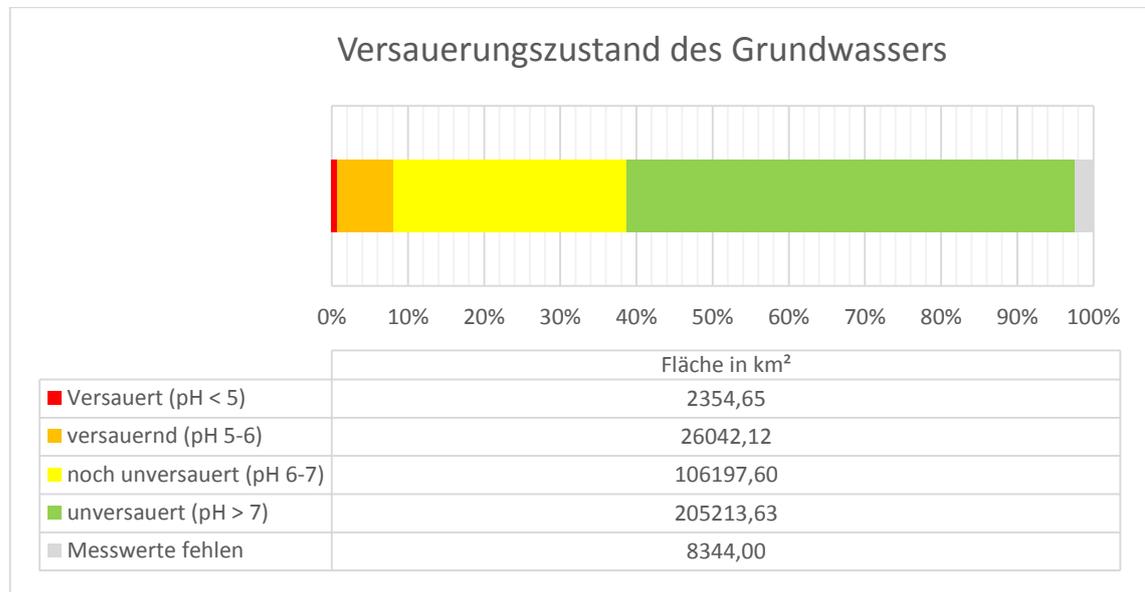


Abbildung 26: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (pH-Wert-Betrachtung)

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundgewässer mit beobachteten pH-Werten kleiner fünf (versauert) beträgt ca. 0,68 Prozent, mit pH-Werten von fünf bis sechs (versauernd) ca. 7,48 Prozent, mit pH-Werten von sechs bis sieben (noch unversauert) ca. 30,50 Prozent und mit pH-Werten größer sieben (unversauert) ca. 58,94 Prozent. Die restlichen 2,40 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden.

Die Betrachtung der einzelnen hydrogeochemischen Einheiten hat gezeigt, dass fünf der 87 untersuchten Einheiten pH-Werte kleiner fünf aufweisen. In weiteren 24 hydrogeochemischen Einheiten wurden pH-Werte im Bereich von fünf bis sechs beobachtet (19 davon haben keine Messwerte mit pH-Werten kleiner fünf). 77 Einheiten zeigten pH-Werte im Bereich von sechs bis sieben (in 53 davon wurden keine Messwerte mit pH-Werten kleiner sechs festgestellt).

In 83 hydrogeochemischen Einheiten konnten pH-Werte über sieben verzeichnet werden. Insgesamt wurden 87 aus 112 hydrogeochemischen Einheiten untersucht. Diese decken rund 97,5 Prozent der Bundesfläche ab.

Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse zum Versauerungszustand nach Jacks.

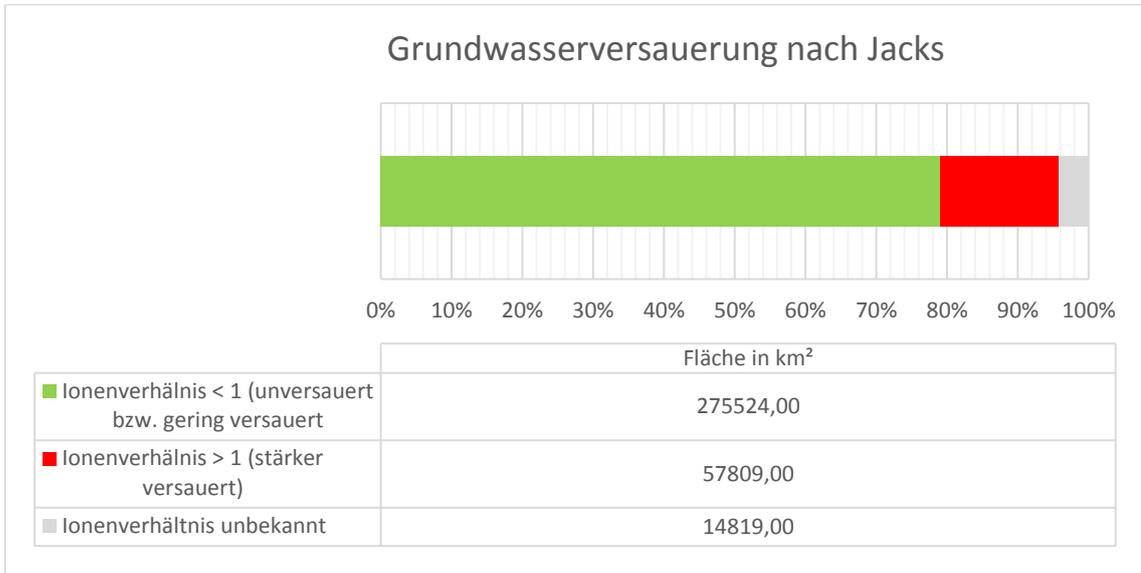


Abbildung 27: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Jacks)

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Ionenverhältnis kleiner eins (unversauert bzw. gering versauert) beträgt ca. 79,14 Prozent und mit Ionenverhältnis größer eins beträgt ca. 16,60 Prozent. 4,26 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden.

Im Folgenden werden drei Abbildungen zur Versauerungsempfindlichkeit dargestellt.

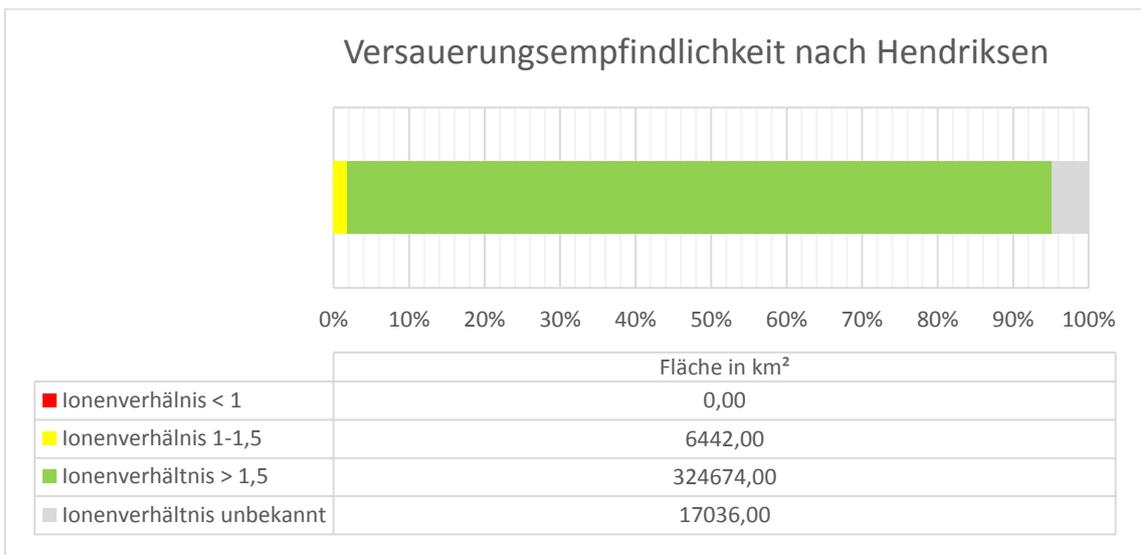


Abbildung 28: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Hendriksen)

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Ionenverhältnis größer 1,5 beträgt ca. 93,26 Prozent und mit Ionenverhältnis zwischen 1-1,5 ca. 1,85 Prozent. Ionenverhältnisse kleiner eins wurden nicht festgestellt. 4,89 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden.

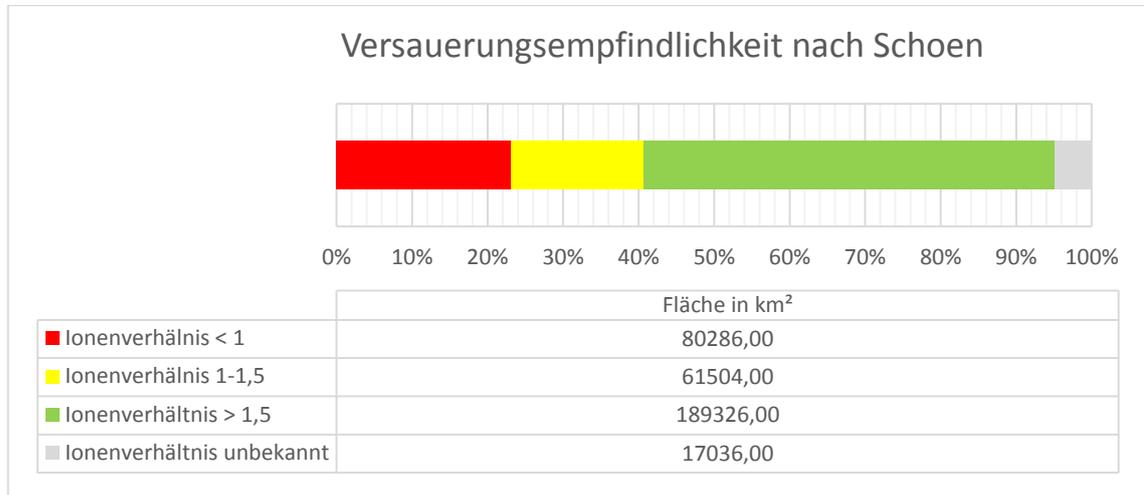


Abbildung 29: Versauerungszustand des oberflächennahen Grundwassers für Deutschland (nach Schoen)

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Ionenverhältnis größer 1,5 beträgt ca. 54,38 Prozent, Ionenverhältnis zwischen 1-1,5 rund 17,67 Prozent und Ionenverhältnisse kleiner eins ca. 23,06 Prozent. 4,89 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden.

Im Folgenden werden sechs Abbildungen zum chemischen Grundwasserzustand in Bezug auf ausgewählte Untersuchungsparameter dargestellt.

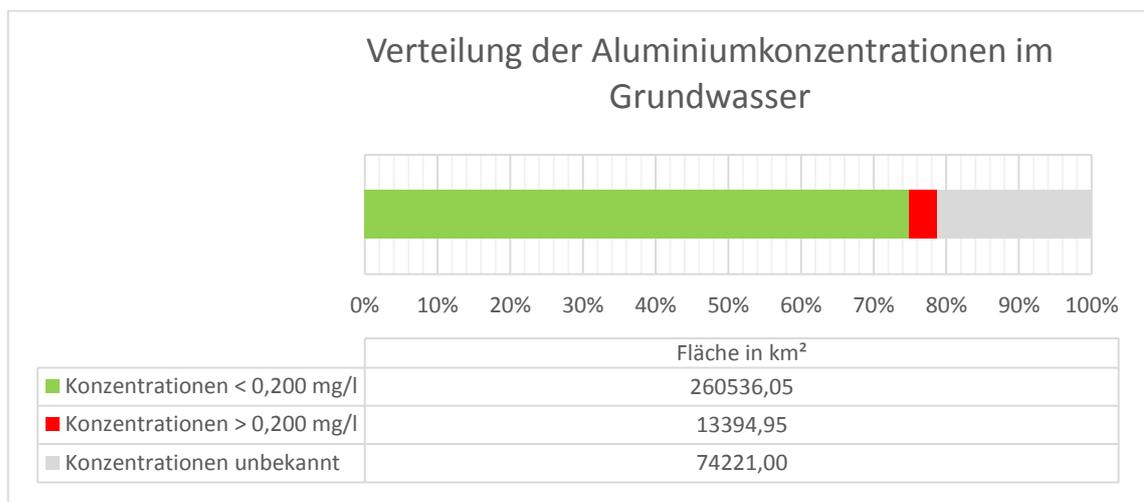


Abbildung 30: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Aluminium

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Aluminiumkonzentrationen kleiner 0,200 mg/l beträgt ca. 74,83 Prozent und Aluminiumkonzentrationen größer 0,200 mg/l ca. 3,85 Prozent. 21,32 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht 20 Einheiten). In 45 hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt.

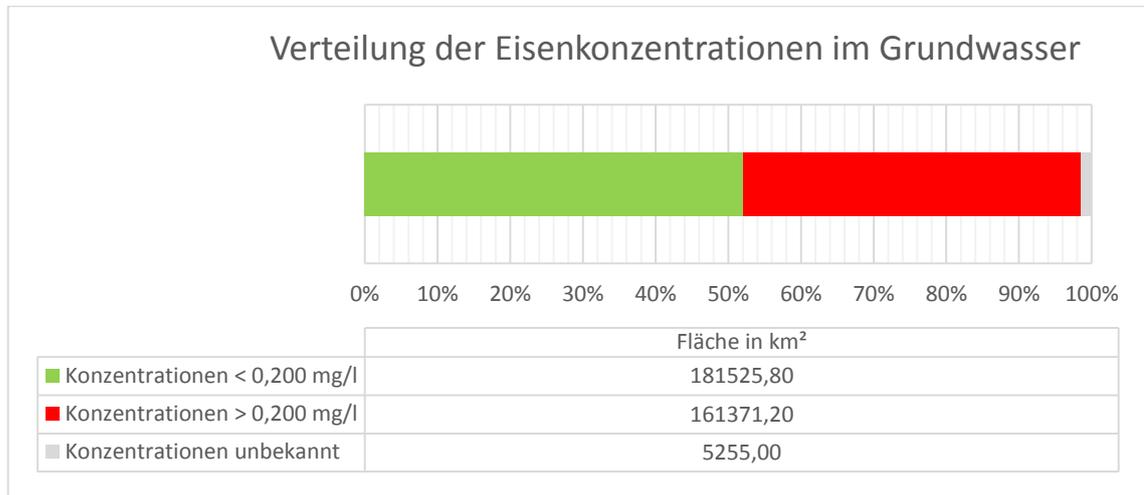


Abbildung 31: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Eisen

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Eisenkonzentrationen kleiner 0,200 mg/l beträgt ca. 52,14 Prozent und Eisenkonzentrationen größer 0,200 mg/l etwa 46,35 Prozent. 1,51 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht fünf Einheiten). In zehn hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen und in neun hydrogeochemischen Einheiten keine Grenzwertunterschreitungen festgestellt.

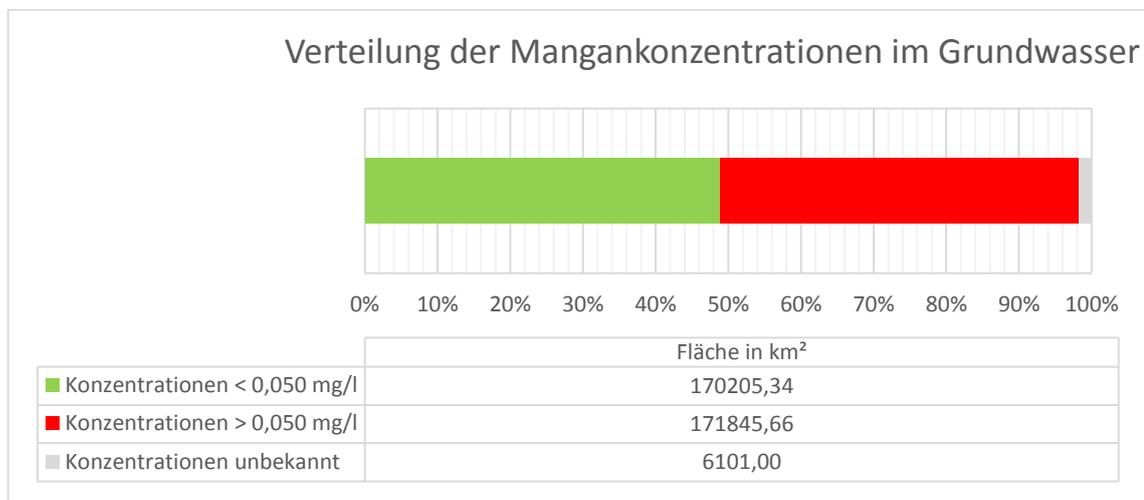


Abbildung 32: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Mangan

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Mangankonzentrationen kleiner 0,050 mg/l beträgt ca. 48,89 Prozent und Mangankonzentrationen größer 0,050 mg/l etwa 49,36 Prozent. 1,75 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht sieben Einheiten). In acht hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen und in acht hydrogeochemischen Einheiten keine Grenzwertunterschreitungen festgestellt.

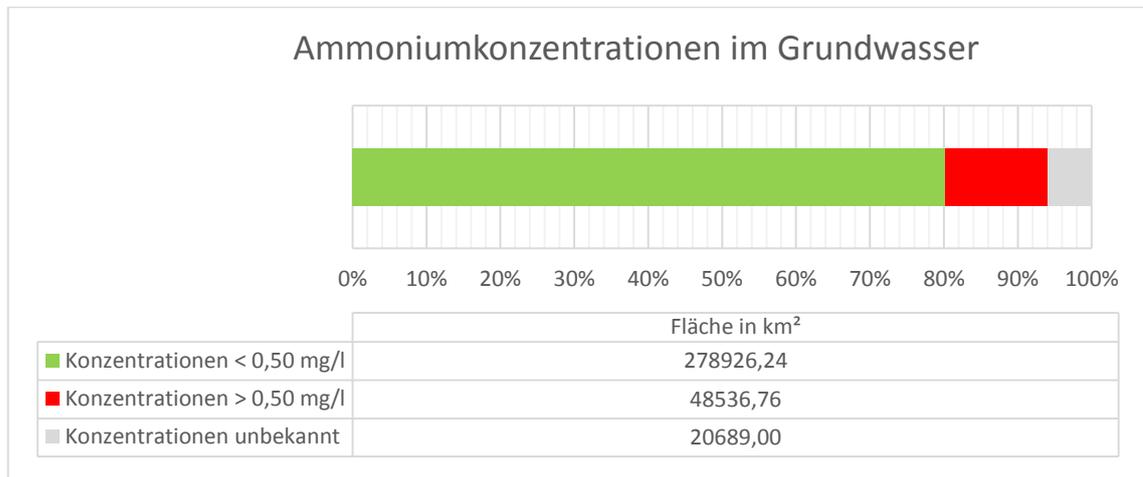


Abbildung 33: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Ammonium

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Ammoniumkonzentrationen kleiner 0,50 mg/l beträgt ca. 80,12 Prozent und Ammoniumkonzentrationen größer 0,50 mg/l etwa 13,94 Prozent. 5,94 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht 17 Einheiten). In 34 hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen und in fünf hydrogeochemischen Einheiten keine Grenzwertunterschreitungen festgestellt.

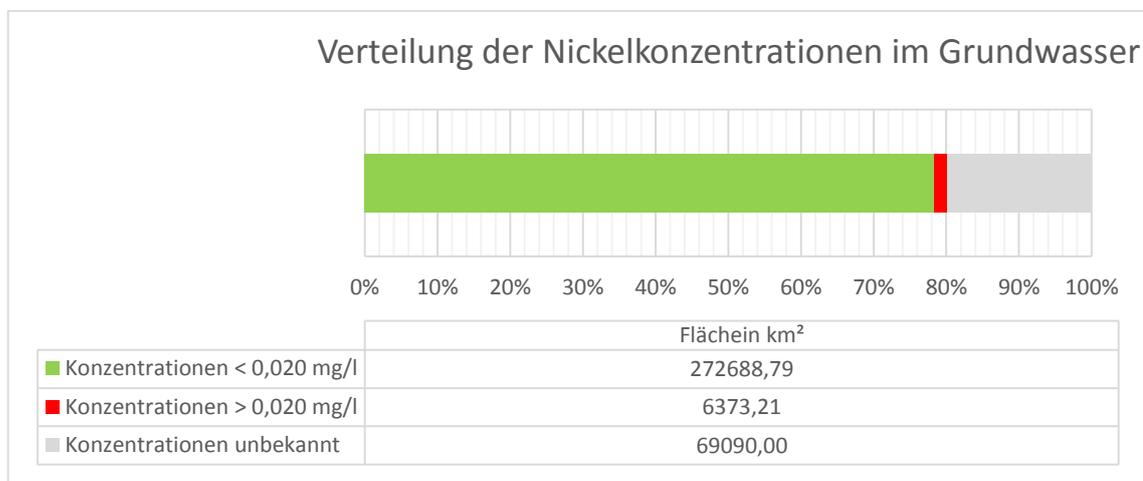


Abbildung 34: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Nickel

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Nickelkonzentrationen kleiner 0,020 mg/l beträgt ca. 78,32 Prozent und Nickelkonzentrationen größer 0,020 mg/l etwa 1,83 Prozent (entspricht eine Einheit). 19,85 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht 33 Einheiten). In 40 hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt.

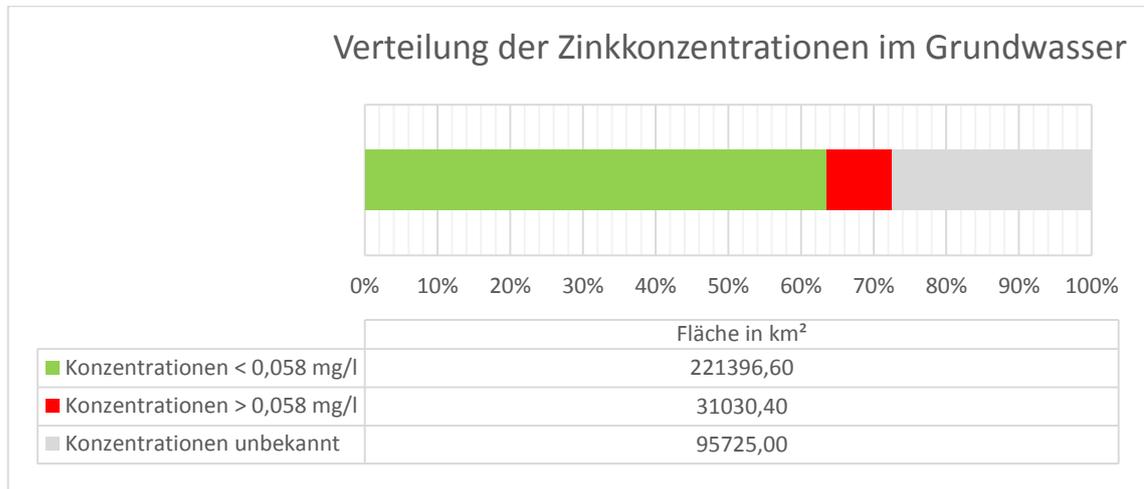


Abbildung 35: Chemischer Zustand der Grundwässer in Deutschland für Zink

Quelle: Eigendarstellung

Der flächenmäßige Anteil an Grundwässern mit Zinkkonzentrationen kleiner 0,058 mg/l beträgt ca. 63,59 Prozent und Zinkkonzentrationen größer 0,058 mg/l ca. 8,91 Prozent. 27,50 Prozent konnten aufgrund von fehlenden Daten nicht ausgewertet werden (entspricht 26 Einheiten). In 18 hydrogeochemischen Einheiten wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt. Folgende Tabelle zeigt die Maximal- und Minimalwerte bei 5- und 95%-Perzentil für ausgewählte Untersuchungsparameter.

Untersuchungsparameter	Minimalwert [mg/l], [-]	Maximalwert [mg/l], [-]	Grenzwert [mg/l], [-]
pH-Wert	4,49	8,29	6,5 - 9,5
Ammonium	> 0,00001	55,00	0,50
Eisen	> 0,00001	78,40	0,20
Mangan	> 0,00001	19,70	0,050
Aluminium	> 0,00001	1,93	0,20
Nickel	> 0,00001	271	0,020
Zink	> 0,00001	1060	0,058
Sulfat	> 0,00001	5490	240

Tabelle 2: Übersicht von Minimal- und Maximalwerten für ausgewählte Untersuchungsparameter (Deutschland)

Quelle: Eigendarstellung

4.1.3. Bewertung der Ergebnisse

Die Datenauswertung zur Versauerung und Grundwasserqualität hat gezeigt, dass es zum heutigen Zeitpunkt etwa 0,7 Prozent des oberflächennahen Grundwassers als „versauert“ eingestuft werden können. Rund 7,5 Prozent des Grundwassers wird als versauernd eingestuft. Bei weiterer Belastung kann sich diese Menge im Bereich des versauerten Grundwassers verschieben. Die Versauerung nach Jacks beträgt ca. 16,6 Prozent, was indirekt über die Empfindlichkeit dieses Bereichs aussagt. Weitere 30,5 Prozent gelten als „noch unversauert“ (pH-Wert 6,0 – 7,0). Dies ist jedoch kritisch zu betrachten, da der neutrale pH-Wert bei 7,0 liegt. Aus diesem Grund ist von einer Tendenz in Richtung „sauer“ auszugehen. Rund 60 Prozent des Grundwassers ist alkalisch und kann als unversauert angesehen werden.

Die Versauerungsempfindlichkeit des Grundwassers nach Schoen zeigt, dass die Basenkapazität der Böden durch saure Niederschläge einen negativen Zustand aufweist. Etwa die Hälfte des Bodens, welcher als Pufferschicht zwischen Oberfläche und Grundwasser gilt, verfügt über ein Bicarbonat-Puffersystem. Etwa ein Fünftel liegt im Übergangsbereich zum Aluminiumpuffersystem. Da dieses nur bei niedrigen pH-Werten zur Neutralisation aktiviert wird, ist das negativ zu bewerten. Den leichtsauren Niederschlägen kann dieses Puffersystem nur gering entgegenstehen. Den gleichen Anteil (etwa ein Fünftel) wird nach Schoen als versauert angesehen, das heißt, dass in der Jahresbilanz überwiegend Anionen vorhanden sind.

In Bezug auf die Trinkwasserversorgung wurden beachtliche Verhältnisse von Grenzwertüberschreitung und –Grenzwertunterschreitung bei ausgewählten Parametern festgestellt. Da bei vielen Parametern ein nicht zu vernachlässigender Anteil an fehlenden Daten existiert, wurde die Angabe als Verhältniszahl gewählt. Für genaue Aufteilung siehe Kapitel 4.1.2.

Beim Ammonium liegt das Verhältnis bei ca. 0,17. Das Verhältnis sagt aus, dass fast beim jeden 6 Liter der Grenzwert überschritten wird. Beim Nickel liegen die Verunreinigungen gering ($0,023 \approx$ jeder 43es Liter). Beim Zink wird etwa jeder 7 Liter belastet (Verhältnis von 0,14), wobei es sich nur auf etwa 70 Prozent der ausgewerteten Daten bezieht. Die restlichen 30 Prozent stehen nicht zur Verfügung und lassen große Spielräume zu.

Extreme Verunreinigungen wurden beim Mangan (Verhältnis von 1,00) und Eisen (Verhältnis von 0,89) festgestellt. Etwa jeder zweiter Liter entspricht nicht den Anforderungen nach der Trinkwasserverordnung. Beim Aluminium liegt das Verhältnis bei 0,05 (\approx jeder 20es Liter).

Es ist feststellbar, dass durch versauerungsrelevante Schadstoffe zu einer hoher Belastung im Grundwasser kommt. Diese kann sich jedoch auf Grund der sensiblen pH-Wertbereichen erhöhen.

Aufschlussreich war die Analyse von folgenden Untersuchungsparametern. Es wurde festgestellt, dass der pH-Wert im Grundwasser in gemessener Zeitperiode in bestimmten Gebieten den Wert von 4,49 erreicht hat (5 Prozent - Perzentil). Im Vergleich liegt der pH-Wert des sauren Niederschlags mit erhöhter Schadstoffkonzentration etwa in gleichem Bereich. Aufgrund der flächendeckender Messung und Datenselektion kann die punktuelle Belastung ausgeschlossen werden. Möglichen Ursachen der starken Versauerung können die ausgeschöpfte Pufferung und eine flächendeckende Bergbautätigkeit sein. Ebenfalls wurde festgestellt, dass in bestimmten Regionen die Grenzwerte für untersuchte Parameter vielfach Überschritten wurden. So liegt der Überschreitungsfaktor für Aluminium bei ca. 10 und für Eisen/Mangan bei ca. 400. Beim Nickel liegt der Faktor über 13.000.

Aus dem Kapitel „Versauerungsprozesse“ (Abschnitt Schadstoffpfad Boden/Wasser) geht hervor, dass die Schadstofffreisetzung erst bei pH-Werten kleiner als 5,6 erfolgt.

Die Betrachtung der pH-Werte von Niederschlägen zeigt, dass die Werte in dem Monitoringintervall besonders am Anfang gering waren. Obwohl eine Verbesserung feststellbar ist, sind die Werte immer noch im kritischen Bereich.

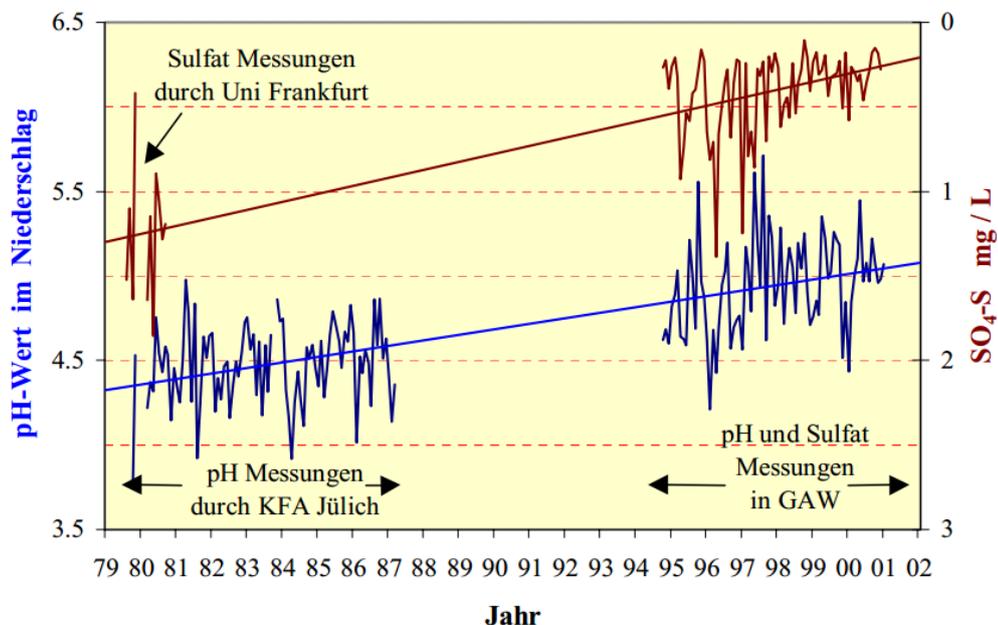


Abbildung 36: Zeitliche Änderung des pH-Wertes und der Sulfat-Konzentration

Quelle: Kaminski U. und Fricke M. (November 2001): Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, (17.07.2014 – Dokument 078 der CD)

Die Bewertung des Grundwasserzustands hinsichtlich der Versauerung durch selbstdefiniertes Bewertungssystem wird in folgender Tabelle dargestellt.

Untersuchungsparameter	Intervall [I]	Anrechenbarer Anteil (A _G)	Absoluter Anteil (A _A)	A _G × A _A	Bewertungsanteil B _n [%]
[-]	[-]	[%]	[%]	[-]	
pH-Wert	< 5	0,00	0,70	0,00	
	5-6	0,00	7,66	0,00	
	6-7	50	31,25	15,63	
	> 7	100	60,39	60,39	
				∑ 76,02	
Korrekturfaktor aus Versauerungsempfindlichkeit					
Ionenverhältnis	< 1	24,25	100	24,25	
$f_K = [A_{A(5-6)} \times 0,5 : 100] \times \sum_{pH} A_G \times A_A : 100$					
$f_K = [31,25 \times 0,5 : 100] \times 76,02 : 100$			$f_K = 0,119$		
			$\sum_{pH} A_G \times A_A : [1 + f_K]$		
			$76,02 : [1 + 0,119] = 67,94$		67,96
Aluminium	< 0,2 mg/l	100	95,11	95,11	95,11
	> 0,2 mg/l	0,00	4,89	0,00	
Eisen	< 0,2 mg/l	100	52,94	52,94	52,94
	> 0,2 mg/l	0,00	47,06	0,00	
Mangan	< 0,050 mg/l	100	49,76	49,76	49,76
	> 0,050 mg/l	0,00	50,24	0,00	
Ammonium	< 0,5 mg/l	100	85,18	85,18	85,18
	> 0,5 mg/l	0,00	14,82	0,00	
Nickel	< 0,020 mg/l	100	97,72	97,72	97,72
	> 0,020 mg/l	0,00	2,28	0,00	
Zink	< 0,058 mg/l	100	87,71	87,71	87,71
	> 0,058 mg/l	0,00	12,29	0,00	
Für die Bewertung wirksamer Anteil Q _G :			$\sum B_n : n_{Bn}$		
$Q_G = \frac{67,96 + 95,11 + 52,94 + 49,76 + 85,18 + 97,72 + 87,71}{7} = 76,63\%$				Zustand: stark Verschmutzt	

Tabelle 3: Einstufung des Grundwasserzustands hinsichtlich der Versauerung durch selbstdefiniertes Bewertungssystem

Die Qualität des Grundwassers hinsichtlich der Versauerung wird als „stark verschmutzt“ eingestuft.

4.2. Aktuelle Quellwasserqualität in Deutschland

Die Quellwasserbeschaffenheit wird wie das Grundwasser im Wesentlichen durch pedologische, hydrogeologische, mineralogische und biochemische Wechselwirkungen am Standort beeinflusst. Dazu kommen noch anthropogene Einwirkungen und zeitliche Schwankungen, was die Beurteilung schwierig macht und sich nur punktuell anwenden lässt.

4.2.1. Vorgehensweise zur Abschätzung der Quellwasserqualität und –versauerung

In dieser Arbeit werden aufgrund der direkten Korrelation mit dem sauren Regen ausschließlich Quellen oberflächennahen Ursprungs analysiert. Thermalquellen und tiefliegende Quellen der unterirdischen Gewässer werden aufgrund ihrer langen Verweilzeit unter der Erdoberfläche nicht berücksichtigt. Die Analyse erfolgt durch einen Vergleich der Literatur und Monitoringprogramme. Grund dafür ist die nicht zur Verfügung stehende (existierende) Datenbank.

4.2.2. Ergebnisdarstellung der Quellwasserqualität und –versauerung

Erste Hinweise liefert das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Aus dem „Grundwasserbericht 2000“ geht hervor, dass die Folgen des sauren Niederschlags bei Quellen sehr niedrige pH-Werte bzw. erhöhte Konzentrationen an Mangan, Aluminium und Nickel sind. Die niedrigsten pH-Werte und höchste Aluminiumkonzentrationen werden im hydrologischen Winterhalbjahr beobachtet. Bei Starkniederschlägen wird ebenfalls eine negative Beeinflussung beobachtet¹³⁵.

UPI Umwelt- und Prognose – Institut e.V. nennt 3 Quellen (Hellenbachquelle, Einsiedlerquelle und Mausbachquelle) mit durchschnittlichen pH-Werten zwischen 4,2 bis 4,5. Die Messdauer betrug ein Jahr und der Grenzwert nach Trinkwasserverordnung wurde 2002/2003 um das 100-fache bis 158-fache überschritten¹³⁶.

Das Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung untersuchte die wasserchemischen Eigenschaften von Waldquellen im silikatischen Mittelgebirge. Im Thüringer Wald wurden 29, im Frankenwald 22, im Fichtelgebirge 13 und im Erzgebirge 20 Wasserquellen untersucht.

¹³⁵ Vgl. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Mai 2001): Grundwasserbericht 2000, Auszug:, S. 56, www.luwg.rlp.de, (18.07.2014 – Dokument 090 der CD)

¹³⁶ Vgl. Vgl. UPI Umwelt- und Prognose – Institut e.V., Teufel D., Bauer P. (o.J.): Quellen in Handschuhsheim, www.upi-institut.de, (18.07.2014 – Dokument 152 der CD)

Die Untersuchung zeigt, dass die pH-Werte unterschiedlich ausgefallen sind. In folgender Abbildung werden die Ergebnisse dargestellt. Der pH-Wertbereich streckt sich von etwa 4,5 bis 7,5. Besonders auffällig ist die Häufigkeitsverteilung der Werte im Intervall von 4,5 bis 6,0.

Zudem geht aus dem Forschungsbericht hervor, dass die Durchführung von Messungen im Sommer erfolgte. Es wird in diesem nochmal darauf hingewiesen, dass bei der Frühjahrsmessung in Einzelfällen von starken Abweichungen der pH-Werte nach unten auszugehen ist ¹³⁷.

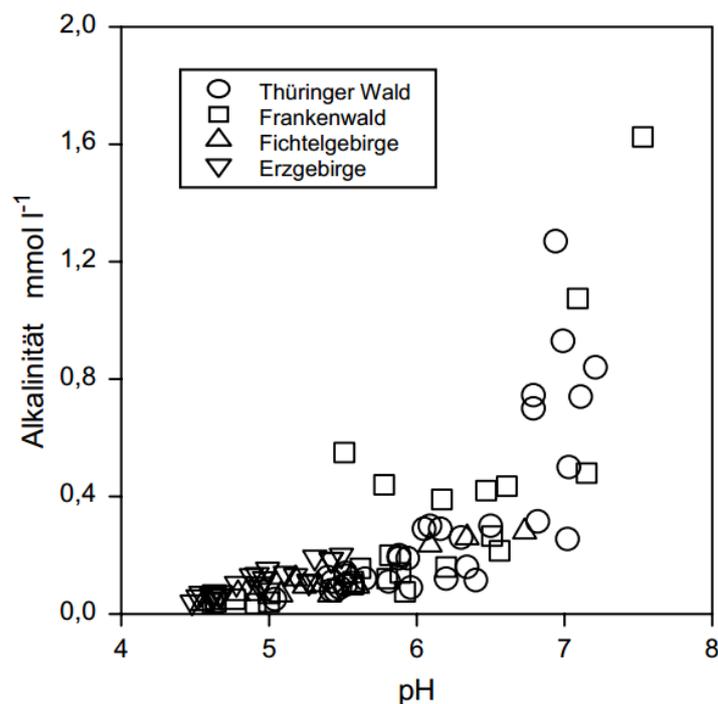


Abbildung 37: Alkalinität und pH-Wert von Quellwässern der Untersuchungsgebiete

Quelle: Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung

Die Abbildung 37 zeigt, dass die niedrigsten pH-Werte im Erzgebirge zu finden sind. Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung belegt, dass die höchsten Konzentrationen an Aluminium ebenfalls im Erzgebirge nachgewiesen wurden.

Die Deutsche Gesellschaft für Limnologie untersuchte in einem Forschungsprojekt die Versauerung von Quellen im Buntsandstein. Das Untersuchungsgebiet umfasst mehrere Bundesländer (Schwerpunkt: Hessen). In folgender Tabelle werden die Werte dargestellt.

¹³⁷ Vgl. Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung, Riedel R. u.a. (o.J.): Vergleich der wasserchemischen Eigenschaften von Waldquellen der silikatischen Mittelgebirge, S. 91-93, www.bayceer.uni-bayreuth.de, (18.07.2014 – Dokument 008 der CD)

Untersuchungsgebiet	Minimale Intervallgrenze	Maximale Intervallgrenze	Mittelwert
Sandsteinspessart	4,6	6,5	5,8
Fulda-Haune-Tafelland	4,4	6,5	5,6
Südrhön	4,2	6,4	5,6
Marburg-Gießener Lahntal	5,1	6,1	5,7
Burgwald	4,4	6,5	5,7
Vorder- und Kuppenrhön	4,3	6,5	5,8
Hohe Rhön	5,7	6,6	6,2

Tabelle 4: *pH-Werte der untersuchten Regionen*

Quelle: *Eigendarstellung in Anlehnung an Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL)*

Insgesamt wurden 771 Quellen erfasst (davon 579 in Hessen). Es wurde festgestellt, dass die Quellwasserversauerung im Buntsandstein regionalspezifisch und sehr unterschiedlich ausgefallen ist. Von den untersuchten Quellen waren rund 44 Prozent versauert, sprich der pH-Wert lag unter 6,5. Zudem wurde ein Trend zur Abhängigkeit zwischen Gewässerversauerung und Höhenlage festgestellt¹³⁸.

Ein weiteres Team untersuchte die Quellen im Naturpark Pfälzerwald. Insgesamt wurden 30 Quellen untersucht. Die pH-Werte lagen im Bereich 4,5 bis 6,7. Die Untersuchung fand im Jahre 2009/2010 statt¹³⁹.

4.2.3. Bewertung der Ergebnisse

Es ist eindeutig feststellbar, dass das Quellwasser in Vergleich zum Grundwasser deutlich geringere pH-Werte aufweist und somit der Versauerung ausgesetzt ist. Grund dafür ist die schnelle Verweilzeit im Boden. Dies führt dazu, dass die Pufferung nur in geringem Ausmaß an Neutralisation beteiligt ist. Ein anderer Grund kann die immer wieder dem sauren Niederschlag ausgesetzte wasserführende Schicht sein, welche durch den ständigen Kontakt mit dem Niederschlag die Pufferkapazität verloren hat.

Hinsichtlich der Konzentrationen an Aluminium, Nickel und weiteren Bestandteilen kann aufgrund der fehlenden Daten keine eindeutige Bewertung abgegeben werden. Die Tatsache, dass die Konzentration an Metallionen hoch ist, liegt in direktem Zusammenhang mit dem niedrigen pH-Wert.

¹³⁸ Vgl. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Reiss M., Zaenker S. (2012): Gewässerversauerung von Quellen im Buntsandstein – Kein Problem für Krenobionte?, S. 217-218, (18.07.2014 – Dokument 038 der CD)

¹³⁹ Vgl. Winter M., Schindler H. (2001/2012): Waldquellenmonitoring im Naturpark Pfälzerwald, S. 188, (18.07.2014 – Dokument 154 der CD)

4.3. Trend zur Gewässerversauerung

Um die zukünftige Entwicklung der Gewässerversauerung abzuschätzen, werden in diesem Kapitel die Schadstoffentwicklung und die Aussagen der Fachverbände ausgewertet.

Aus der Betrachtung der Schwefeldioxidemissionen in vergangenen Jahrzehnten wird eine Zunahme seit 1880 beobachtet. Von 1960 bis 1985 erreichten die Werte ihr Maximum und im Jahr 2000 wiederum ihr Tiefpunkt. In diesem Zeitabschnitt wurden massive Schäden an Flora und Bodenversauerung beobachtet. Gründe für den starken Abfall sind die emissionsmindernden Maßnahmen im Bereich der genehmigungsbedürftigen Anlagen und Gebäudeheizung, sowie Entschwefelung vom Treibstoff.

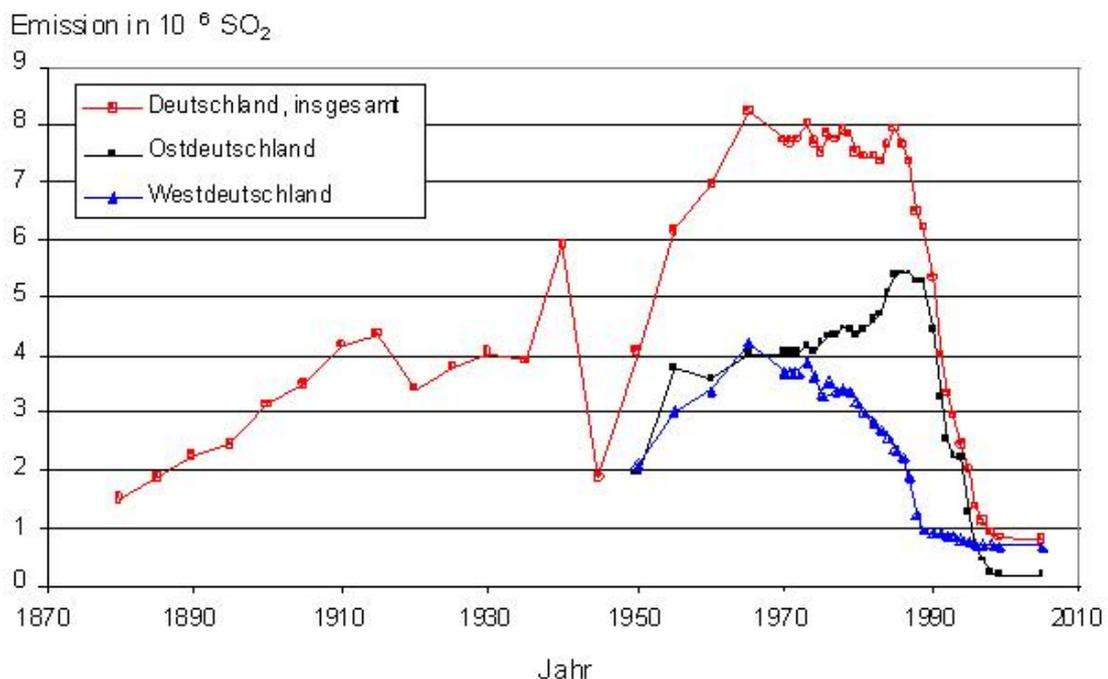


Abbildung 38: Entwicklung der Schwefeldioxid-Emission in Deutschland (in Mio. t)

Quelle: Bundeszentrale für politische Bildung, www.bpb.de

Bei Stickstoffoxiden und Stickstoffverbindungen wird ebenfalls eine Abnahme beobachtet. Der Grund für die Abnahme liegt größtenteils auf den gesetzlichen Vorschriften wie z.B. Bundesimmissionsschutzgesetz mit dazugehörigen Verordnungen und technische Maßnahmen zur Rauchgasentstickung an Anlagen.

Folgende Abbildung zeigt die Schadstoffentwicklung zwischen 1984 bis 2004.

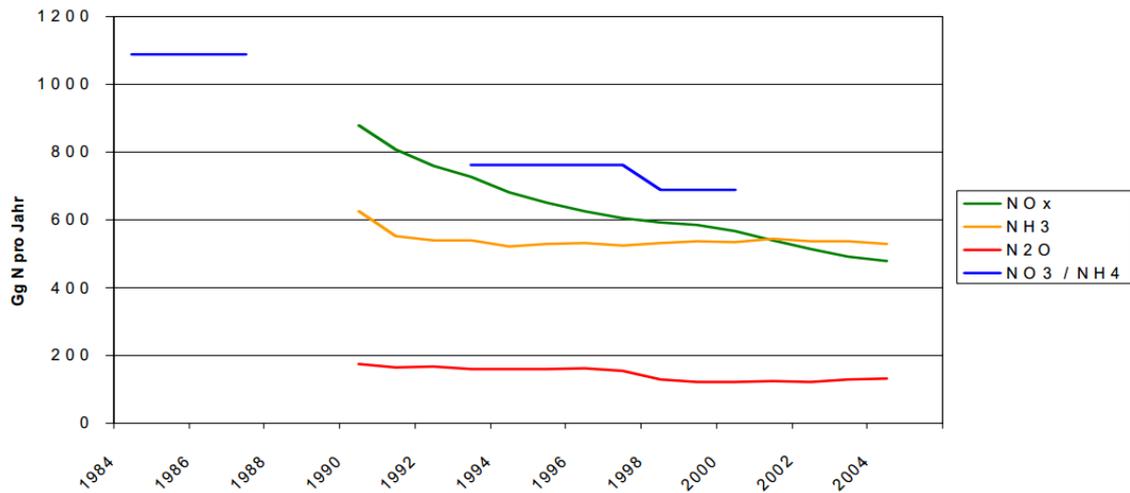


Abbildung 39: Entwicklung der Stickstoffemissionen in Deutschland in Gg N pro Jahr

Quelle: Umweltbundesamt (April 2009), HINTERGRUNDPAPIER ZU EINER MULTIMEDIALEN STICKSTOFF-EMISSIONSMINDERUNGSSTRATEGIE, S.29, www.umweltbundesamt.de, (18.07.2014 – Dokument 142_2 der CD)

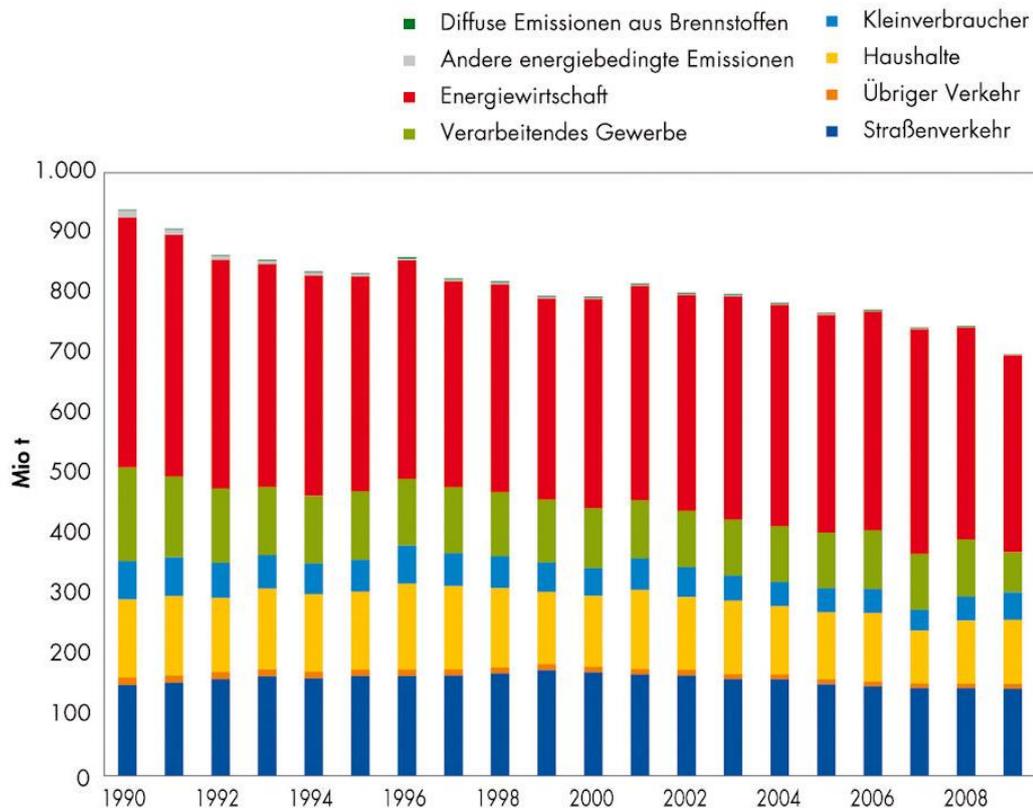


Abbildung 40: Entwicklung der CO₂-Emissionen in Deutschland nach Emittentengruppen

Quelle: Umweltbundesamt, veröffentlicht durch Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (o.J.), (18.07.2014 – Dokument 143 der CD)

Beim Kohlenstoffdioxid wird ebenfalls ein leichter Rückgang an Emissionen in Deutschland beobachtet. Die Abbildung 40 zeigt, dass der Rückgang an Kohlendioxidemissionen überwiegend auf Energiewirtschaft und verarbeitendes Gewerbe zurückgeht. Bei Emittenten Verkehr und Haushalten können die Emissionen über den betrachteten Zeitraum als konstant angesehen werden.

4.3.1. Untersuchung der pH-Wertschwankung in Deutschland

Aus den in vorherigen Kapiteln aufgeführten Faktoren werden die pH-Wertschwankungen durch natürliche und anthropogene Ereignisse beeinflusst. Zu anthropogen emittierten Schadstoffen zählen hauptsächlich Kohlenstoffdioxid, Stickstoffoxide und Schwefeldioxid. Diese werden durch Wetterereignisse am Versauerungsprozess beteiligt. Je nach Jahreszeit werden die anthropogenbedingte Schadstoffe in unterschiedlichen Mengen freigesetzt, was dazu führt, dass die pH-Wertschwankungen Jahreszeit abhängig sind.

Beim Schwefeldioxid sind die Konzentrationen in Wintermonaten deutlich höher als in wärmeren Perioden¹⁴⁰. Beim Stickstoffdioxid ist der Sachverhalt identisch¹⁴¹. Die Photosynthese bei Pflanzen führt dazu, dass auch die Belastung durch Kohlenstoffdioxid im Sommer geringer ist als im Winter¹⁴². Regionale Schwankungen sind durch die Höhenlage und Häufigkeit der Deposition bedingt.

4.3.2. Befragung von Fachleuten und Umweltverbänden

Bei der Befragung wurde Kontakt mit Fachleuten aus den Regierungspräsidien, den Ministerien, den Umweltfachbehörden- und Vereinen aufgenommen. Größtenteils wurde auf die Behörden und dort vorhandenen Veröffentlichungen hingewiesen. Die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie führt zurzeit kein Überwachungsprogramm in den oberirdischen Gewässern durch. Grund dafür sind die fehlenden Versauerungserscheinungen. In Rahmen der Grundwasserüberwachung wurden 15 Messstellen an Quellen in den Hochlagen des Thüringer Waldes überwacht. In der Gemeinde Lausche (730 müNN) lag der pH-Wert im Jahre 1992 bei 3,9 und im Jahre 2013 bei 5,88. Im Neuhaus am Rennweg (822 müNN) lag der pH-Wert im Jahre 1993 bei 5,1 und in im Jahre 2013 bei 5,69. Der Datenverkehr ist im Anhang auf der CD im Ordner „Mailtraffic“ zu finden.

¹⁴⁰ Vgl. Der Ministerpräsident des Landes Schleswig-Holstein mit der Staatskanzlei (o.J.), Trend Langzeitentwicklung 1979 – 2012, www.schleswig-holstein.de, (20.07.2014 – Dokument 035 der CD)

¹⁴¹ Vgl. Stadt Nürnberg (o.J.): Übersicht über den Jahresverlauf der in der Messstation des Chemischen Untersuchungsamtes gemessenen Luftschadstoffe im Vergleich zu den Vorjahren, <http://umweltdaten.nuernberg.de>, (20.07.2014 – Dokument 129 der CD)

¹⁴² Vgl. Universität Duisburg-Essen, Beckmann G., Klopries B. (1994): Die Antwort der Evolution - Auswirkungen des atmosphärischen CO₂-Anstiegs auf die Biosphäre, S. 32, www.uni-due.de, (20.07.2014 – Dokument 151 der CD)

4.3.3. Zukünftige Entwicklung des pH-Wertes

Die Emissionen von säurebildenden Luftschadstoffen sind in den letzten Jahren zurückgegangen und der pH-Wert des Niederschlags hat zugenommen. Die vorgeführten Abbildungen beziehen sich auf Deutschland und berücksichtigen nicht die Schadstoffimporte aus Nachbarländern.

Die im Kapitel „Versauerungsprozesse“ Abschnitt „Schadstoffpfad Luft“ genannte Verweilzeit von 1-10 Tage für Schwefeldioxid ermöglicht den Schadstofftransport aus Ländern wie z.B. Polen oder Bulgarien. Bei Stickstoffoxiden ist von einer lokaler bis regionaler Ausdehnung auszugehen. Die Verweilzeit von Kohlenstoffdioxid (etwa 120 Jahre) sorgt dafür, dass die Emissionen ein globales versauerndes Schadenspotential besitzen¹⁴³.

Abbildung 41 zeigt, dass die deutschlandweiten Emissionen des Kohlenstoffdioxids zurückgegangen sind. Folgende Abbildung zeigt die global verursachten Emissionen für Kohlenstoffdioxid.

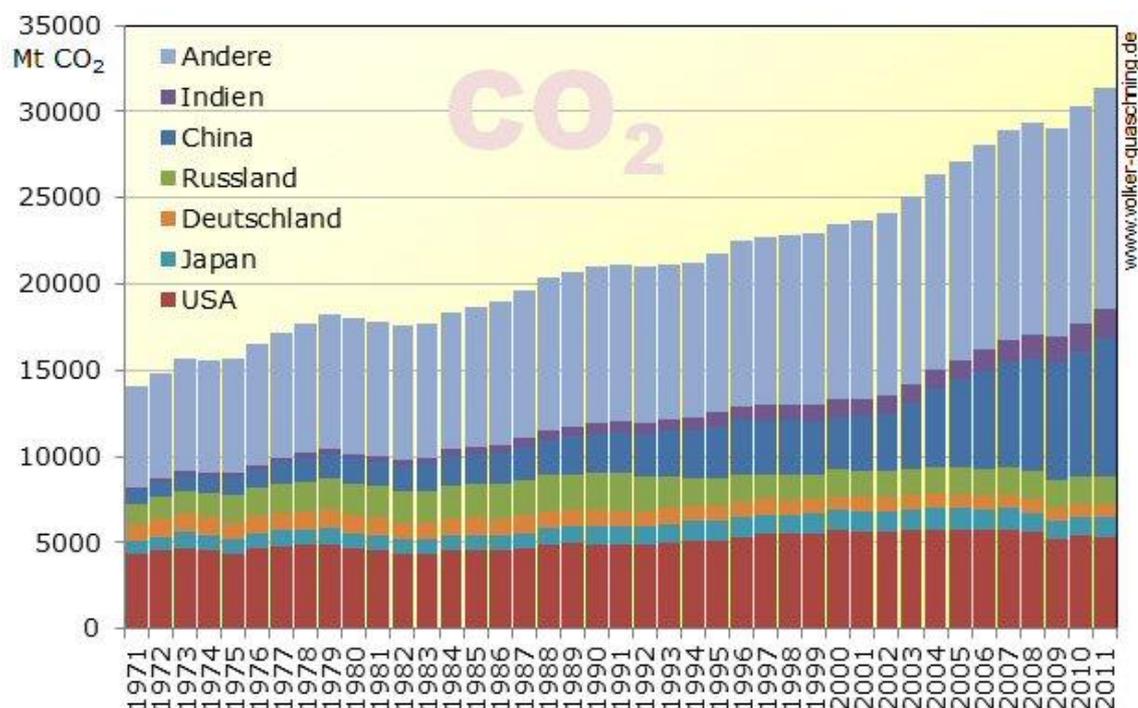


Abbildung 41: Entwicklung der CO₂-Emissionen einzelner Länder

Quelle: Quaschnig V. (o.J.), Weltweite Kohlendioxidemissionen und -konzentration in der Atmosphäre, <http://volker-quaschnig.de>, (18.07.2014 – Dokument 114 der CD)

¹⁴³ Vgl. Umweltbundesamt (September 2013): Die Treibhausgase, www.umweltbundesamt.de, (20.07.2014 – Dokument 142 der CD)

Obwohl die Schadstoffemissionen in Deutschland zurückgehen, wird immer noch der Niederschlag durch Luftschadstoffe beeinflusst. Die Tendenz beim Schadstoffpfad Luft kann als gleichbleibend eingeschätzt werden.

Die Gefahr für den Versauerungstrend besteht im Schadstoffpfad Boden und Wasser. Durch den stark sauren Niederschlag im zwanzigsten Jahrhundert wurde die Pufferkapazität des Bodens flächenhaft verbraucht. Als Gegenmaßnahme kam die massive Kalkung zum Einsatz. Bei besonders betroffenen Regionen wie z.B. Odenwald oder Schwarzwald sind Wiederholungskalkungen erforderlich¹⁴⁴.

Aus dem aktuellem Waldzustandsbericht 2013 geht hervor, dass immer noch etwa ein Drittel der Wälder versauerungsbedingte Schäden aufweisen (etwa drei Mal so viel wie in dreißiger Jahren). Um die Wälder durch effektive Kalkung zu schützen, müssen etwa 100 Millionen Euro pro Jahr an Finanzmittel eingesetzt werden. Zurzeit steht ein Fördervolumen von ca. 13 Millionen Euro zur Verfügung¹⁴⁵. Durch diesen Beleg wird die Aktualität der Versauerung betont.

Durch die global steigenden Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen in der Luft (siehe Abbildung 41) sank der pH-Wert der Ozeane in den letzten 200 Jahren um 0,1 auf 8,1 (entspricht einer Versauerung von ca. 30 Prozent). Es wird angenommen, dass bis zum Jahre 2100 der pH-Wert der Ozeane um weitere 0,3 bis 0,4 pH-Einheiten sinkt und das Meerwasser somit um 100 bis 150 Prozent saurer wird.

Die gelöste Kohlensäure im Meereswasser reduziert die Konzentrationen an Karbonationen und behindert dadurch die Kalkbildung bei Muscheln, Korallen und anderen Organismen. Sinkt der pH-Wert auf ein bestimmtes Niveau kann es sogar zur Auflösung der Kalkschalen kommen. Weitere Folgen der Ozeanversauerung könnten die Beeinträchtigungen in der Nahrungskette und steigende Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre sein (Kohlenstoffspeicherung durch Biomasse)¹⁴⁶.

¹⁴⁴ Vgl. Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (2002): Waldzustandsbericht 2002 - Geschädigte Waldfläche auf dem Niveau der Vorjahre, <http://mlr.baden-wuerttemberg.de>, (20.07.2014 – Dokument 094 der CD)

¹⁴⁵ Vgl. Düngekalk-Hauptgemeinschaft (o.J.): Deutschlands Wälder brauchen Hilfe, www.waldkalkung.com, (20.07.2014 – Dokument 047 der CD)

¹⁴⁶ Vgl. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (o.J.): Ozeanversauerung – Der böse Zwilling der Klimaerwärmung, www.awi.de, (04.08.2014 – Dokument 002 der CD)

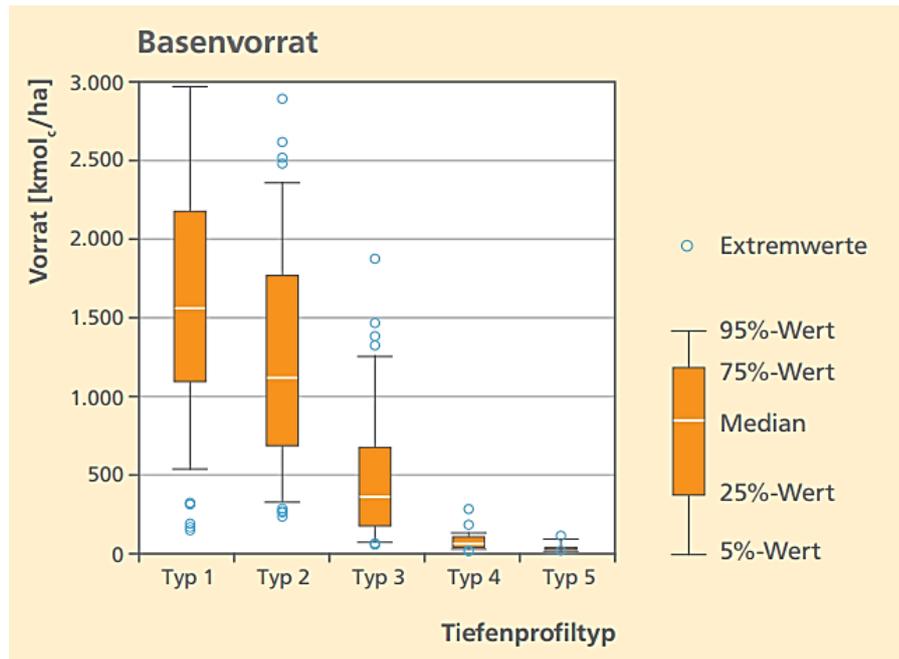


Abbildung 42: Basenvorräte und wichtige Kennwerte der Tiefenprofiltypen 1 bis 5

Quelle: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (o.J.): Bodenzustandserhebung – Macht sauer wirklich lustig?, www.lwf.bayern.de, (21.07.2014 – Dokument 007 der CD)

Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft gliedert die Böden in fünf Kategorien nach Basenvorrat ein. Abbildung 42 zeigt, dass der Boden mit Typ 5 über keine Pufferung mehr verfügt. Bei gleicher Entwicklung wird davon ausgegangen, dass die restlichen Böden den Tiefenprofil Typ 5 in etwa 100 bis 1000 Jahren erreichen. Etwa 5 Prozent der Fläche sind bereits in Bayern betroffen. Weitere 14 Prozent werden in die Kategorie 4 eingestuft¹⁴⁷.

Durch die Betrachtung der Abbildung mit der Verteilung von versauerten Böden und dem Ansicht aus dem WMS „Hintergrundwerte Grundwasser“ (siehe Kapitel 4.1.1) wird ein direkter Zusammenhang ersichtlich. Die Versauerung der Quell- und Grundwässer hängt mit der Alkalität der Böden zusammen. Folgende Abbildung zeigt die Gegenüberdarstellung.

¹⁴⁷ Vgl. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (o.J.), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Bodenzustandserhebung – Macht sauer wirklich lustig?, S.24, www.lwf.bayern.de, (21.07.2014 – Dokument 007 der CD)

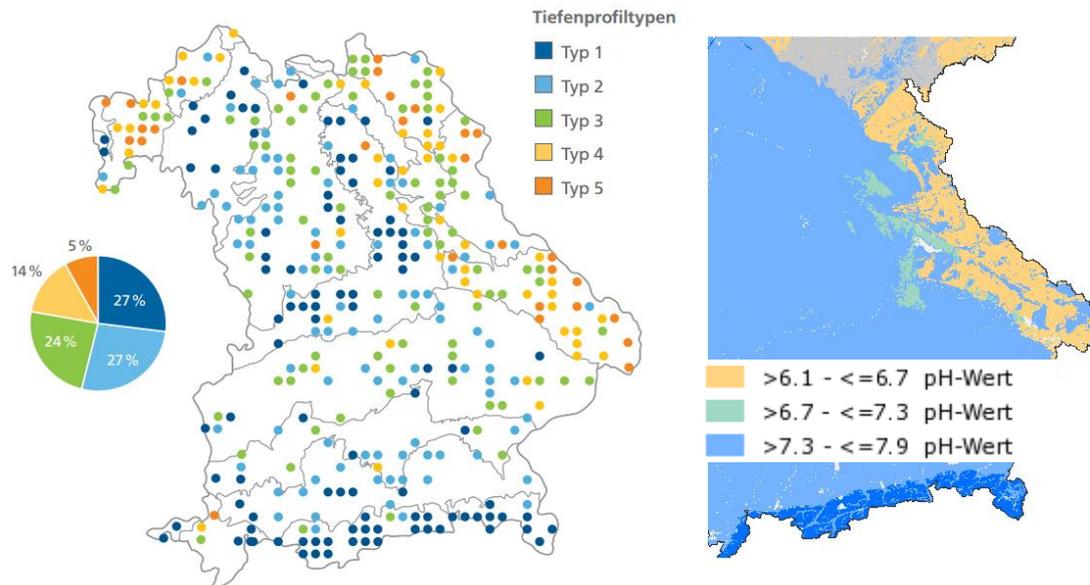


Abbildung 43: Gegenüberdarstellung von Bodenversauerung und Grundwasserversauerung

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft / Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Weitere Gefahr im Schadstoffpfad Boden besteht durch Nitratreintrag in der Landwirtschaft. Beim Schadstoffpfad Wasser kann Gefahr durch die Öl- und Erdgasförderung mit Hilfe der Fracking-Technologie bestehen.

Durch unachtsames Hantieren mit den Chemikalien können diese in den Boden und dann ins Grundwasser gelangen. Ein Aufsteigen der Chemikalien über geologische Störung, Schichten und künstliche Wegsamkeiten (z.B. entlang der Bohrung / Altbohrung) kann der Versauerung beitragen. Die freigesetzten versauerungsrelevanten Frackchemikalien sind Essigsäure, Ammoniak, Zitronensäure, Salzsäure, Nitrat¹⁴⁸ etc.

In den USA hat ein solches Ereignis bereits zum Fischsterben geführt. Dabei änderte sich der pH-Wert des Acorn-Fork-Flusses in Kentucky von 7,5 auf 5,6. Durch Zusatzbelastung mit anderen Chemikalien wurde die Flora und Fauna wochenlang negativ beeinflusst. Es wird vermutet, dass eine Fischart dabei komplett ausgerottet wurde¹⁴⁹.

Unter Betrachtung der aufgeführten Argumente wird der Trend zur Quell- und Grundwasserversauerung als ausgeglichen bis leicht schwankend bewertet (ab dem heutigen Zeitpunkt).

¹⁴⁸ Vgl. Krüger J. (o.J.): Unkonventionelle Gasförderung, www.unkonventionelle-gasfoerderung.de, (21.07.2014 – Dokument 084 der CD)

¹⁴⁹ Vgl. GREENPEACE Media GmbH (August 2013): Fracking verursacht Fischsterben, www.greenpeace-magazin.de, (21.07.2014 – Dokument 064 der CD)

Die Luftschadstoffbelastung in Deutschland ist zwar zurückgegangen, doch die Gesamtsumme liegt nach eigener Einschätzung etwas zu hoch. Die Böden sind versauert und benötigen Aufwertungsmaßnahmen um der Versauerung entgegenzuwirken. Die Gefahr durch Nutzung der Frack-Technologie bleibt bestehen.

5. Untersuchungen zur Quell- und Grundwasserversauerung im Westerwald und Ruhrgebiet

In diesem Kapitel wird die Eigenuntersuchung zur Quell- und Grundwasserversauerung in zwei unterschiedlich Gebieten durchgeführt. Im Ruhrgebiet wurde der Schwerpunkt der Untersuchung auf Grundwasserversauerung gesetzt. Dabei werden die Daten für drei Kreise vom Bearbeiter erfasst und statistisch ausgewertet. Im Westerwald wird der Schwerpunkt der Eigenuntersuchung auf Quellwasserversauerung gelegt.

5.1. Duisburg, Hamm und Kreis Recklinghausen als Untersuchungsareale im Ruhrgebiet

Die Wahl der Gebiete wurde anhand deren Lage und bergbaulicher Geschichte bestimmt. Duisburg liegt im Südwesten, Kreis Recklinghausen im Norden und Hamm im Nordosten des Ruhrgebiets. In allen dieser Gebiete fanden die bergbaulichen Tätigkeiten statt. Diese wurden mit Hilfe des Fachinformationssystems „Gefährdungspotenziale des Untergrundes in Nordrhein-Westfalen“ bestimmt. Folgende Abbildung zeigt ein Ausschnitt aus dem Fachinformationssystem mit der Anzeige von Bergbaustandorten.

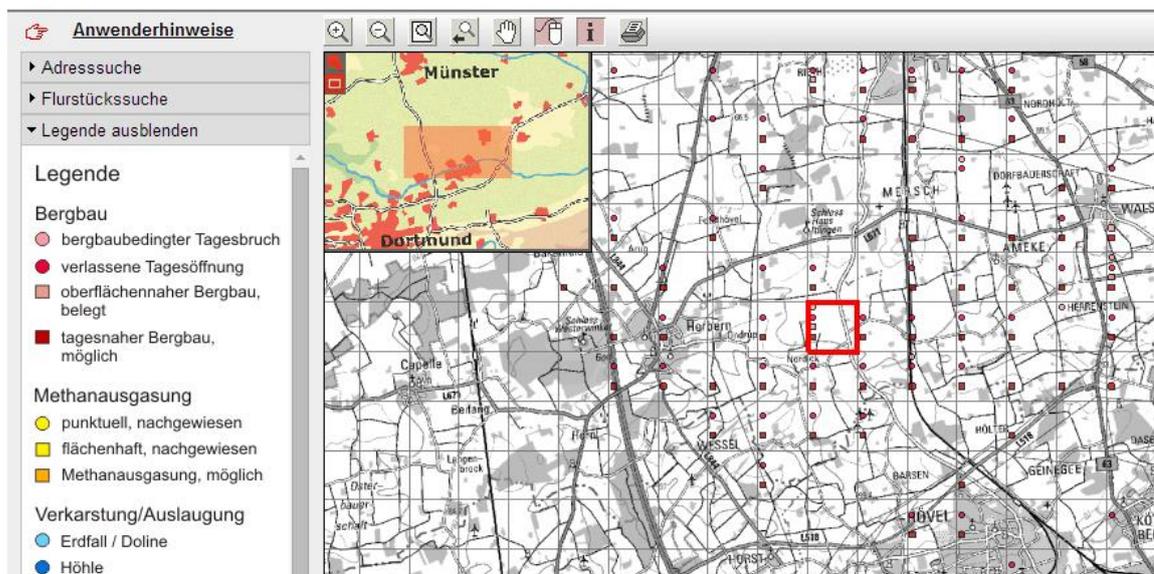


Abbildung 44: Ausschnitt aus dem Fachinformationssystem „Gefährdungspotenziale des Untergrundes in Nordrhein-Westfalen“

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Bezirksregierung Arnsberg

5.1.1. Physisch-geografischer Überblick

Die Untersuchungsgebiete liegen in Nordrhein-Westfalen und umschließen insgesamt eine Fläche von ca. 1220 km² (Duisburg: 232,8 km², Hamm: 226,2 km² und Kreis Recklinghausen mit 760,3 km²). Duisburg gehört zum Regierungsbezirk Düsseldorf, Kreis Recklinghausen zum Regierungsbezirk Münster und Hamm zum Regierungsbezirk Arnsberg.

Höchste Erhebung in Duisburg liegt bei 82,53 Meter über NN und der niedrigste Punkt bei 14,87 Meter über NN.

Im Kreis Recklinghausen liegt der höchste Punkt bei 153,00 Meter über NN und der tiefster Punkt bei 27,30 Meter über NN.

Die höchste Erhebung in Hamm liegt bei 102,00 Meter über NN und der niedrigste Punkt bei 37,7 Meter über NN¹⁵⁰. Folgende Abbildung zeigt die Lage der Untersuchungsgebiete.



Abbildung 45: Lage der Untersuchungsflächen im Ruhrgebiet

Quelle: Eigendarstellung

¹⁵⁰ Vgl. Stadt Duisburg (o.J.), Vermessung, Kataster und Geoinformationen, www.duisburg.de, (21.07.2014 – Dokument 127 der CD); Kreisverwaltung Recklinghausen (o.J.), Zahlen, Daten, Fakten im Kreis Recklinghausen, www.kreis-re.de, (21.07.2014 – Dokument 082 der CD); Regionalverband Ruhr (o.J.), Hamm - einfach l(i)ebenswert, www.metropoleruhr.de, (21.07.2014 – Dokument 117 der CD)

5.1.2. Geologischer Überblick

Das Ruhrgebiet gehört zum europäischen Steinkohlegürtel. Die Kohlevorkommen entstanden im Karbon vor ca. 300 Millionen Jahren. Das Ruhrgebiet liegt im Süden und Südosten zwischen Schiefergebirgen. Im Norden und Nordosten liegt die Westfälische Bucht. Im Westen ist befindet sich Niederrheinische Tiefebene. Das ganze Gebiet ist von geologischen Sätteln und Mulden durchgezogen, welche das Grundwassersystem prägen¹⁵¹.

Im Folgenden wird ein geologischer Überblick über die ausgesuchten Untersuchungsgebiete gegeben. Die Bestimmung erfolgt mit Hilfe der Fachinformationssystem (WMS) „Hintergrundwerte Grundwasser“ (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Für die Beschreibung wird Bodenübersichtskarte (M 1:1000, Stand 2013) und geologische Karte (M 1:1000000, Stand 2007) verwendet.

Duisburg

Entlang des Rheins befinden sich oberflächennah tiefgründige, lehmige bis tonige z.T. kalkhaltige Grundwasserböden breiterer Flusstäler. In höheren Lagen sind Auenböden und in tieferen Lagen Gleye (örtlich mit tief humosem Oberboden) anzutreffen. Das Vorkommen von Raseneisenstein und Auenpseudogleye sind stellenweise vorhanden.

Außerhalb des Rheins befinden sich mittel- bis flachgründige, schluffig-sandige bis schluffig-lehmige, braune Böden mit tonreicher Unterboden (Parabraunerde) aus zum Teil lössbedeckten Terrassenablagerungen des Rheins und der Elbe. Örtlich sind wasserstauende Unterboden (Parabraunerde-Pseudogley) anzutreffen. Ein Großteil an versiegelnden Flächen (Auffüllung als Unterbau) ist im Siedlungsbereich zu finden.

In tiefliegenden Schichten sind holozäne Sande und Kiese anzutreffen.

Kreis Recklinghausen

Entlang der Lippe befinden sich oberflächennah tiefgründige bis mittelgründige, sandige bis sandig-lehmige (örtlich sand-kiesige), z.T. kalkhaltige Grundwasserböden breiter Flusstäler. In tieferen Lagen sind Gleye und örtlich Raseneisensteine anzutreffen.

Außerhalb der Lippe sind mittel- bis tiefgründige, sandig-lehmige bis schluffig-lehmige, braune Böden aus z.T. lössvermischten Tertiärablagerungen oder geringmächtigem Lösslehm vorzufinden.

¹⁵¹ Vgl. Regionalverband Ruhr (o.J.): Die Geologie und Oberflächengestalt des Ruhrgebietes, www.ruhrgebiet-regionalkunde.de, (21.07.2014 – Dokument 115 der CD)

Auf Kuppen und an Hängen befinden sich flachgründige und sandig-kiesige, örtlich kalkhaltige oder tonreiche Böden. Stellenweise sind tiefgründige, trockene, saure Sandböden (oft mit podsoliertem Oberboden) anzutreffen.

Im Süden befinden sich tiefgründige, sandige bis schluffig-sandige, saure Böden (Braunerde etc.) aus unterschiedlicher Entstehung.

Im Südwesten sind durch Grundwasser vernässte, z.T. kalkhaltige Niedermoorböden zu finden. Im Siedlungsbereich sind die oberflächennahe Schichten versiegelt und größtenteils durch Auffüllung ersetzt.

Tiefliegende Schichten nahe Lippe bestehen aus holozänen Sanden (z.T. Fein- und Mitteleisand) und Kiesen. Umliegende Schichten sind Tonmineralgestein, Sandmergelstein, Sand und Sandstein aus Kreide und Oberkreide. Im südlichen Teil und örtlich ist feinsandigen, tonigen (z.T. nach unten Kalkhaltig) Schluff.

Hamm

Im Norden befinden sich oberflächennah mittel- bis flachgründige, lehmig-sandige bis sandige Böden mit lehmigem bis tonigem dichten Unterboden und zeitweiliger Staunässe. Entlang der Lippe sind tiefgründige, lehmige bis tonige, z.T. kalkhaltige Grundwasserböden zu finden. Südlich dieser Ablagerungen sind tiefgründige, trockene, saure Sandböden, oft mit podsoliertem Oberboden zu finden. Im Süden befinden sich mittel- bis tiefgründige, lehmig-sandige bis lehmig-schluffige, z.T. steinige braune Böden mit tonreichem Unterboden.

Tiefere Schichten entlang der Lippe bestehen aus holozänen Sanden und Kiesen. Im südlichen Teil sind vermehrt Tonmergelgestein, Sandmergelgestein, Sand und Sandsteine zu finden. Stellenweise sind feinsandige, tonige, z.T. kalkhaltige Schluffablagerungen anzutreffen.

5.1.3. Hydrogeologie und Wasserhaushalt

Die Bestimmung der Grundwasserleiter erfolgt mit Hilfe der hydrogeologischen Karte von Deutschland:

- Hohlraumart (M 1:200000, Stand 2011)
- Durchlässigkeit (M 1:200000, Stand 2008)
- geochemischer Gesteinstyp (M 1:200000, Stand 2008)
- Gesteinsart (M 1:200000, Stand 2008)
- Verfestigung (M 1:200000, Stand 2008)

Duisburg

Im Duisburg sind ausschließlich Porengrundwasserleiter in hoch durchlässigen silikatischen Sedimenten (Lockergestein) vorhanden. Der Durchlässigkeitsbeiwert liegt im Bereich $1 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$. Die Niederschlagsmenge in Duisburg liegt zwischen 700-750 mm im Jahresdurchschnitt¹⁵².

Kreis Recklinghausen

Im Kreis Recklinghausen sind Kluft, Poren sowie Kluft-Porengrundwasserleiter vorhanden. Kluft-Porengrundwasserleiter haben eine sehr geringe Durchlässigkeit ($k_f = 1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-9}$) und befinden sich überwiegend in karbonatischen Sedimenten / Festgestein.

Porengrundwasserleiter weisen eine hohe Durchlässigkeit im Norden und mittlere bis mäßige Durchlässigkeit in Süden ($k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$). Die Porengrundwasserleiter liegen in silikatischen Sedimenten (Norden: Festgestein, Süden: Lockergestein). Die Kluftgrundwasserleiter weisen eine sehr geringe Durchlässigkeit auf und sind karbonatischen Sedimenten (als Festgestein) zuzuordnen.

Im Kreis Recklinghausen kann aufgrund vieler Städte kein genaues Ergebnis für durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge angegeben werden. In der Stadt Recklinghausen liegt die Jahresniederschlagsmenge zwischen 750-800 mm¹⁵³.

Hamm

In Hamm sind Poren und Kluftgrundwasserleiter vorhanden. Porengrundwasserleiter weisen eine mäßige Durchlässigkeit auf ($k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$) und kommen in silikatischen Sedimenten/Lockergestein vor. Kluftgrundwasserleiter liegen im Norden und Süden. Sie weisen eine äußerst geringe Durchlässigkeit ($k_f = 1 \cdot 10^{-9}$) auf und sind in silikatischen/karbonatischen Sedimenten (Festgestein) vertreten. In Hamm liegt die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge zwischen 750-800 mm¹⁵⁴.

Zur genauer Niederschlagsverteilung, Verdunstung und Evapotranspiration liegen keine Daten vor.

¹⁵² Vgl. EMSCHERGENOSSENSCHAFT / LIPPEVERBAND (o.J.), KLIMA / NIEDERSCHLÄGE, www.eglv.de, (21.07.2014 – Dokument 048 der CD)

¹⁵³ Vgl. Stadt Recklinghausen (Juni 2010): Recklinghausen 2020 Flächennutzungsplan– Entwurf / Begründung, S. 14, www.recklinghausen.de, (21.07.2014 – Dokument 130 der CD)

¹⁵⁴ Vgl. Stadt Hamm / Landwirtschaftskammer NRW (Dezember 2006): Die Struktur der Landwirtschaft und ihre Entwicklung in der Stadt Hamm, S. 13, www.hamm.de, (21.07.2014 – Dokument 128 der CD)

5.1.4. Ergebnisdarstellung der Grundwasserqualität und –versauerung

Die Daten wurden in dem Zeitraum von etwa 1984 bis 2013 durch zuständige Behörden gemessen. Der Grundwasserflurabstand wird ab Jahr 2000 untersucht.

Duisburg

In Duisburg wurden insgesamt 11 Messstellen untersucht. In folgender Tabelle werden die relevanten Ergebnisse dargestellt.

Messstelle	Flurabstand	pH-Wert	Aluminium	Sulfat	Nitrat
[-]	[m]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
WALSUM 169	4,85-5,64	6,10-6,93	0,00-0,012	203,00-259,68	0,00-0,021
STERKRADE NR 98	3,79-4,57	6,20-7,80	0,00-0,060	190,00-334,00	0,00-0,40
DU BEECK NR 91	2,69-3,30	-	-	-	-
DUISBURG-LAAR 158	3,74-5,84	6,40-7,80	-	45,00-86,00	1,50-5,40
DU MEIDERICH NR 93	4,62-10,41	6,30-7,60	0,00-0,060	88,40-145,00	5,20-9,80
DU MEIDERICH NR 97	2,59-5,44	-	-	-	-
DUISSERN NR 53	4,54-6,50	6,50-7,30	0,00-0,020	120,00-382,00	3,23-19,00
WEDAUA NR 54	2,65-4,00	6,60-7,31	0,00-0,14	72,90-163,00	0,00-0,70
Sermer Str.	4,96-8,64	6,63-7,20	0,00-0,020	97,40-148,00	10,30-15,60
DUISB.SERM 161	-	6,20-7,20	-	163,00-208,00	15,40-33,60
GROSSENBRUNN NR 31	4,49-6,16	6,90-7,60	0,00-0,020	54,50-146,00	1,70-7,40

Tabelle 5: Daten zur Messstellenauswertung in Duisburg

Quelle: Eigendarstellung, Daten: ELWAS-WEB

Der chemische und mengenmäßige Grundwasserzustand wird nach Fachinformationssystem ELWAS-WEB (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz NRW) fast ausschließlich als schlecht bewertet.

Kreis Recklinghausen

Im Kreis Recklinghausen wurden insgesamt 29 Messstellen untersucht. In folgender Tabelle werden die relevanten Ergebnisse dargestellt.

5. Untersuchungen zur Quell- und Grundwasserversauerung im Westerwald und Ruhrgebiet

Messstelle	Flurabstand	pH-Wert	Aluminium	Sulfat	Nitrat
[-]	[m]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
RWI 25	0,63-2,11	7,06-7,20	0,00-0,043	219,00-273,00	-
RWI 22	0,79-2,87	7,00-8,20	0,00-0,19	155,00-220,00	0,00-4,20
GLADBECK -TNV01-	-	6,70-7,00	0,00-0,16	272,00-869,00	-
F.WESTZENTRA	-	6,80-7,90	0,00-1,40	0,00-370,00	0,00-1,50
HS 130	3,02-4,47	6,92-7,20	0,00-0,59	40,00-118,00	5,10-9,50
HS 76	0,29-1,93	6,94-7,34	0,00-0,020	76,80-130,00	-
HS 131	3,71-5,87	7,05-7,53	0,00-0,35	45,00-75,60	1,40-6,00
HS 133	1,29-2,66	7,00-7,43	0,00-0,030	54,00-132,00	3,90-17,70
HARDMC4	5,80-7,47	6,19-7,10	0,00-0,070	20,80-30,30	1,50-2,20
HS 147	21,68-23,35	7,10-7,43	0,00-2,00	155,00-237,00	0,00-1,80
HS 63	16,93-17,72	6,50-6,76	-	61,10-62,55	4,90-5,20
HS 25	11,88-13,85	6,30-7,20	0,028-0,040	67,50-93,10	19,60-26,30
HS 84	0,92-4,98	6,00-8,60	0,00-19,60	72,00-188,00	1,64-13,10
HS 134	4,77-6,07	3,80-6,60	0,69-18,70	105,00-240,00	6,40-12,90
HS 128	0,54-2,32	5,90-7,30	0,00-1,68	121,00-175,00	1,10-6,50
HS 35	2,09-3,52	7,00-7,46	0,00-0,020	56,70-63,70	14,80-18,70
RWI 110	1,94-6,04	6,80-7,14	0,00-0,36	119,00-256,00	-
RWI 103	-0,32-2,36	6,50-7,25	0,00-0,34	69,00-870,00	0,00-1,80
RWI 102	3,16-6,86	6,70-7,20	0,00-0,75	54,00-192,00	0,00-22,90
HS 100	10,03-14,17	6,80-7,10	0,00-0,020	130,00-166,00	0,00-2,10
HS 65 A	3,60-5,30	6,50-7,00	-	193,00-278,00	0,00-0,60
HS/11 -SYTHEN-	18,97-24,46	5,10-9,50	0,00-1,69	47,00-142,00	7,23-99,50
HS/70 -STRUENKEDE-	17,07-18,72	3,70-6,40	0,00-4,58	26,80-111,00	2,69-61,70
HS/74 -LOCHTRUP-	18,24-19,76	5,63-6,30	-	67,70-89,50	22,00-29,50
HS/42 A -EPPENDORF-	19,30-25,43	7,10-7,40	0,00-0,49	149,00-248,00	0,00-16,90
HS 30	4,97-6,52	7,70-8,00	0,00-0,026	56,80-69,00	-
HS 34 A	4,48-5,93	4,47-4,62	0,27-0,41	92,70-108,00	4,92-19,10
HS 18	4,68-5,91	5,08-7,20	0,00-0,67	69,00-227,00	0,00-32,20
HS 9	20,47-21,73	5,03-5,20	0,024-0,050	46,10-58,30	2,70-5,18

Tabelle 6: Daten zur Messstellenauswertung im Kreis Recklinghausen

Quelle: Eigendarstellung, Daten: ELWAS-WEB

Der chemische und mengenmäßige Grundwasserzustand wird nach Fachinformationssystem ELWAS-WEB (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz NRW) oberhalb der Lippe (Norden) als schlecht und unterhalb der Lippe (Süden) als gut bewertet.

Hamm

In Hamm wurden insgesamt 12 Messstellen untersucht. In folgender Tabelle werden die relevanten Ergebnisse dargestellt.

Messstelle	Flurabstand	pH-Wert	Aluminium	Sulfat	Nitrat
[-]	[m]	[-]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Quelle Halloh-Park	-	7,20-7,80	-	48,70-134,00	0,00-0,28
Quelle Südbecke	-	7,00-7,90	0,064	25,00-42,80	6,34-21,70
Waldbühne ML42	0,69-10,59	7,20-7,50	-	55,00-152,00	3,20-22,90
Hamm Haaren ML67	0,69-2,27	6,80-7,50	-	73,00-134,00	0,00-5,49
Hamm Lerche ML 21	0,35-2,20	7,70-8,00	0,72	49,90-55,60	-
1 12 150	0,050-1,47	6,00-7,30	0,00-0,30	29,00-137,00	0,00-2,10
Rhynern ML44	1,40-2,35	6,90-8,00	0,00-0,20	21,00-52,00	0,00-2,50
Süddinker	0,79-3,34	6,90-7,60	0,00-0,20	40,00-116,00	-
Osttünnen ML46	1,22-2,95	6,80-8,10	0,00-0,20	19,00-127,00	3,35-9,10
Norrdinker ML70	0,23-2,14	7,20-7,60	-	11,90-20,00	-
Ostwennemar ML41	0,67-1,79	7,30-7,80	0,090	107,00-119,00	0,00-1,74
Hamm-Mark ML4	1,24-2,75	6,90-7,60	0,00-1,00	57,00-200,00	0,00-30,40

Tabelle 7: Daten zur Messstellenauswertung in Hamm

Quelle: Eigendarstellung, Daten: ELWAS-WEB

Der chemische und mengenmäßige Grundwasserzustand wird nach Fachinformationssystem ELWAS-WEB (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz NRW) oberhalb der Lippe (Norden) als schlecht und unterhalb der Lippe (Süden) als gut bewertet.

5.1.5. Bewertung der Ergebnisse

Die Analyse der Ergebnisse hat gezeigt, dass der überwiegende Teil des Grundwassers in ausgewählten Untersuchungsgebieten sich in leicht saurem Zustand befindet. In einigen Untersuchungsstellen im Kreis Recklinghausen wurden pH-Werte kleiner fünf festgestellt (minimaler Wert: 3,7). Die in Hamm zwei untersuchten Quellen befinden sich in neutralem/leicht basischem Zustand.

In allen Untersuchungsgebieten wurden Grenzwertüberschreitungen für Sulfat (maximal 3,6-fach), Nitrat (2-fach) und Aluminium (maximal 98-fach) beobachtet. Bei 2 von 52 Nitrat-Grundwassermessstellen wurde eine Grenzwertüberschreitung beobachtet.

Die Nitratbelastung wird aufgrund dieser Daten als sehr gering eingestuft. Bei 18 von 52 Aluminium-Grundwassermessstellen wurde eine Grenzwertüberschreitung beobachtet.

Die Belastung durch Aluminium wird aufgrund dieser Daten als übermäßig verschmutzt eingestuft. Bei 9 von 52 Sulfat-Grundwassermessstellen wurde eine Grenzwertüberschreitung beobachtet. Die Belastung durch Sulfat wird aufgrund dieser Daten als kritisch eingestuft. Zieht man den chemischen und mengenmäßigen Grundwasserzustand aus ELWAS-WEB in die Betrachtung ein, so kann der Gesamtzustand als kritisch belastet bewertet werden.

Grund für die hohe Belastung an Metall- und Nichtmetallionen kann unter anderem die festgestellte Versauerung des Grundwassers in Verbindung mit Bergbautätigkeiten sein. Dies hat zur Folge, dass die Fauna, vor allem der Waldbestand nach jahrelangen Schadstoffeinträgen empfindlich auf zusätzliche Stressfaktoren reagiert. Laut Statistik stieg im Jahre 2012 der Schaden an Buche von 46 Prozent auf 54 Prozent an¹⁵⁵.

Eins der Gründe könnte die leichte Versauerung des Grundwassers in Verbindung mit Klimawandel sein. Der lebensnotwendige pH-Wert für Buche liegt zwischen 6,0 bis 8,0. Die Kiefer, Buche und Fichte sind erst bei niedrigeren pH-Werten Schadensanfällig¹⁵⁶. Zugleich kann das verschmutzte Grundwasser einen erhöhten Aufwand bei der Trinkwasseraufbereitung darstellen.

5.2 Mengerskirchen als Untersuchungsgebiet im Westerwald

Die Untersuchung an dieser Stelle wurde auf Grund einer Anfrage des Grundstücksnutzers durchgeführt, der auf dem Landstück Pferde hält. Bei den Pferden, die auf dem Landstück untergebracht sind, wurden im Sommer verstärkt Ekzeme festgestellt. Es entstand die Vermutung, dass es an der Qualität von Quellwasser liegen könnte, weil es für die Pferde als Trinkwasser dient. Im Folgenden wird die Qualität von Quell- und Grundwasser analysiert und bewertet. Abschließend erfolgt eine Stellungnahme, in der unter anderem das Verwendungsspektrum für das anstehende Quellwasser und ggf. mögliche Aufbereitungsschritte aufgeführt werden.

¹⁵⁵ Vgl. Schutzgemeinschaft Deutscher Wald (o.J.): Waldzustandsbericht 2012, S.4, www.sdw.de, (24.07.2014 – Dokument XX der CD)

¹⁵⁶ Vgl. Hochtaunuskreis: Hausbäume, www.hochtaunuskreis.de, (24.07.2014 – Dokument 123 der CD)

5.2.1. Physisch-geografischer Überblick

Die Gemeinde Mengerskirchen liegt in Hessen im Norden des Landkreises Limburg-Weilburg und gehört dem Regierungsbezirk Gießen an. Die Untersuchungsstelle befindet sich im Süden, nord-östlich von Waldernbach. Das Gemeindegebiet ist ca. 30,82 km² groß und ca. 35 Prozent der Gemeinde sind bewaldet. Die Gemeinde liegt im Osten des Westerwaldes an der Grenze zum Oberwesterwälder Kuppenland¹⁵⁷.

Der Ortsteil Winkels liegt im Tal auf einer Höhe von etwa 320 müNN. Der Ortsteil Dillhausen liegt auf einer Höhe von ca. 260 müNN. Der Ortsteil Mengerskirchen liegt bei einer Höhe von ca. 420 müNN¹⁵⁸.

Folgende Abbildung zeigt die Grenzen des Untersuchungsgebiets und die Untersuchungsstelle (blau). Grüne Flächen zeigen Naturschutz-, FFH- und Vogelschutzgebiete. Rote Flächen sind Trinkwasserschutzgebiete.

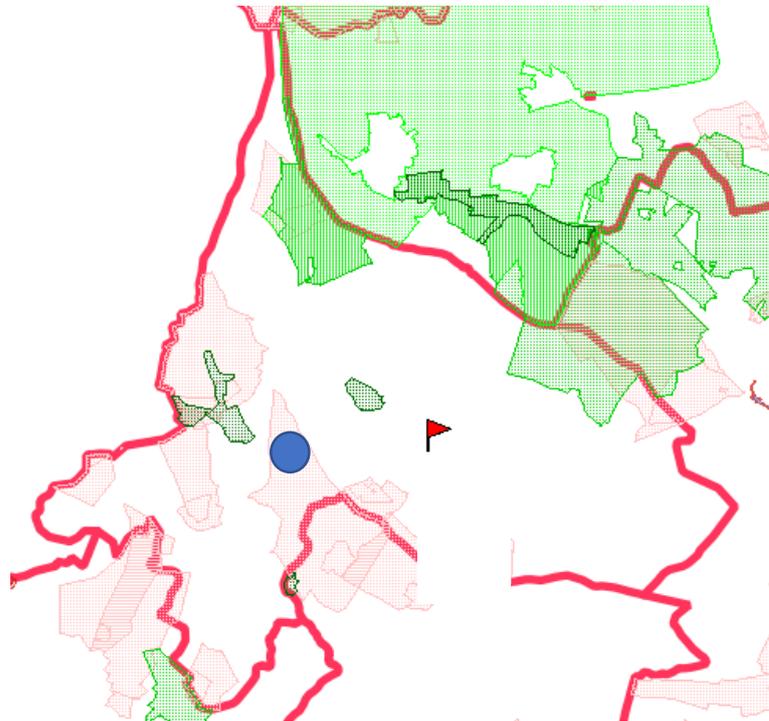


Abbildung 46: Mengerskirchen – Untersuchungsgebiet und Untersuchungsstelle

Quelle: Eigendarstellung in Anlehnung an Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

¹⁵⁷ Vgl. Gemeindevorstand des Marktflleckens Mengerskirchen (o.J.): Geschichte von Mengerskirchen, www.mengerskirchen.de, (24.07.2014 – Dokument 061 der CD)

¹⁵⁸ Vgl. Gemeindevorstand des Marktflleckens Mengerskirchen (o.J.): Herzlich willkommen im Marktfllecken Mengerskirchen, www.mengerskirchen.de, (25.07.2014 – Dokument 062 der CD)

Folgende Abbildung zeigt die Lage der Quelle, die Art der Quellwasserfassung und die nähere Umgebung.

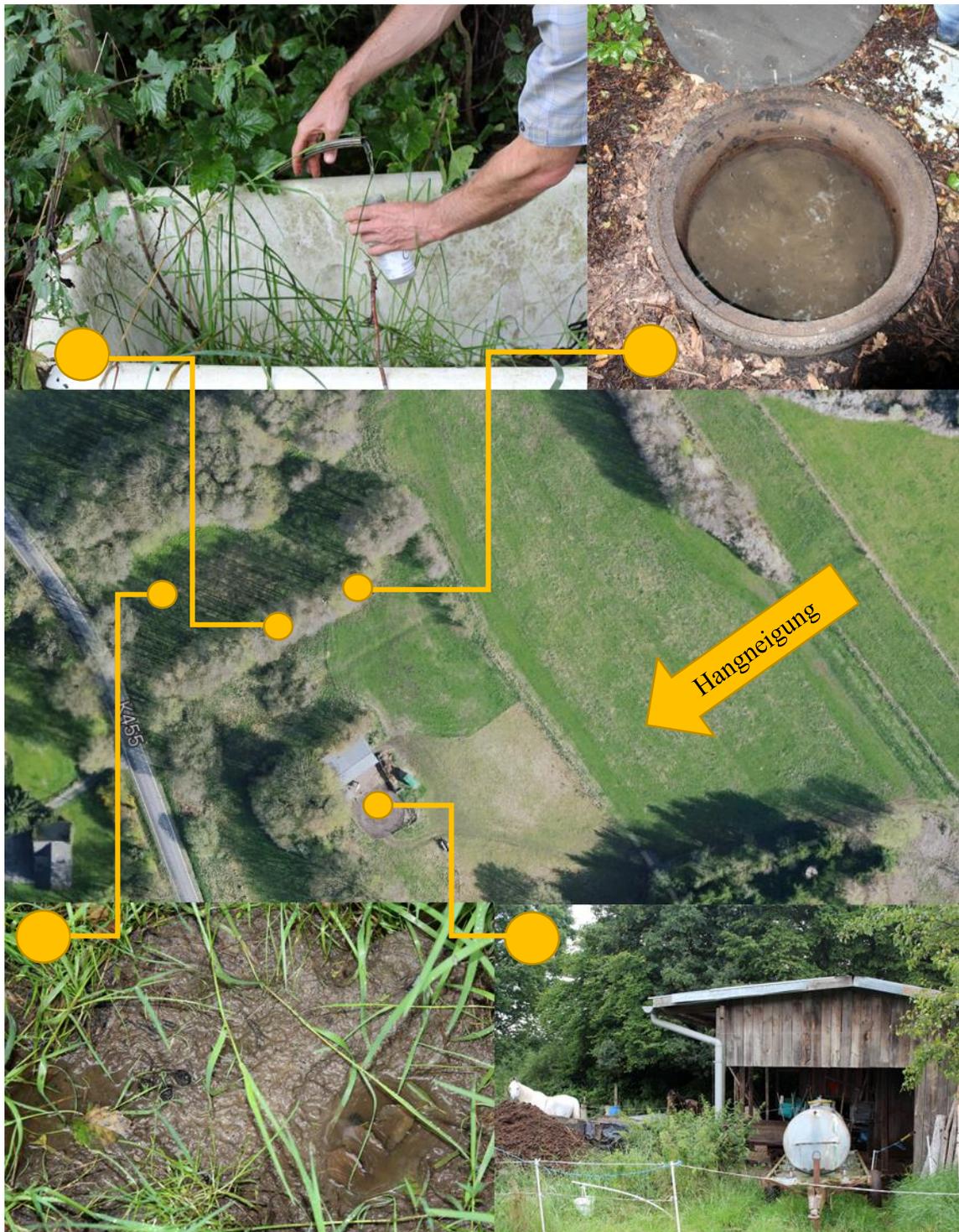


Abbildung 47: Mengerskirchen – Nähere Umgebung der Untersuchungsstelle. Oben rechts – Quellwasserfassung und Quellwasseraustritt, oben links – Quellwasserfassung für die Nutzung mit Hilfe des Schlauchs, Mitte – Draufsicht (Wald und landwirtschaftliche Nutzung), unten links – verdichteter und bindiger Boden (wasserstauend), unten rechts: Pferdestall

Quelle: Eigenaufnahme, Bild in der Mitte – Auszug aus GoogleMaps

5.2.2. Geologischer Überblick

Die Auswertung der geologischen Übersichtskarte von Hessen (M 1:300.000, Stand: August 2007) hat ergeben, dass oberflächennahe Schichten in Pleistozän entstanden sind. Diese bestehen aus Ton, Schluff, Sand und Grus (oft mit Steinen). Die tiefliegenden Schichten bilden Basanit, Alkalibasalt und Nephelinit aus Jungtertiär¹⁵⁹. Dieses lässt sich durch Ortsbegehung bestätigen (siehe Abbildung 42, unten links).

5.2.3. Hydrogeologie und Wasserhaushalt

Die Bestimmung der Grundwasserleiter erfolgt mit Hilfe der hydrogeologischen Karte von Deutschland:

- Hohlraumart (M 1:200000, Stand 2011)
- Durchlässigkeit (M 1:200000, Stand 2008)
- geochemischer Gesteinstyp (M 1:200000, Stand 2008)
- Gesteinsart (M 1:200000, Stand 2008)
- Verfestigung (M 1:200000, Stand 2008)

Das Untersuchungsgebiet verfügt über Kluftgrundwasserleiter. Die Durchlässigkeit des Bodens wird als mittel bis mäßig eingestuft. Geochemischer Zustand des Grundwasserleiters wird als silikatisch angegeben und es handelt sich dabei um Magmatite, welche als Festgestein vorzufinden sind (siehe Kapitel 5.2.2.).

Die Auswertung der Niederschlagsdaten durch den Deutschen Wetterdienst in dem Zeitraum von 1981 bis 2010 hat einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von etwa 1064 mm ergeben¹⁶⁰. Zur Verdunstung und Evapotranspiration liegen keine Daten vor.

5.2.4. Probenahme von Niederschlag und Quellwasser

Bei der Untersuchung wurden Proben vom Niederschlag und Quellwasser entnommen. Vor Ort erfolgte die Messwerterfassung für den pH-Wert. Im Labor für Siedlungswasserwirtschaft an der Hochschule RheinMain wurden weitere Bestimmungsparameter untersucht. Die Niederschlagerfassung erfolgte mit Hilfe eines Kunststoffbehälters. Zusätzlich wurden die Messdaten aus nahumliegenden Grundwassermessstellen analysiert.

¹⁵⁹ Vgl. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): geologische Übersichtskarte von Hessen (M 1:300.000, Stand: August 2007), www.hlug.de, (26.07.2014 – Dokument 072 der CD)

¹⁶⁰ Vgl. Deutscher Wetterdienst (Juni 2013): Niederschlag: langjährige Mittelwerte 1981 – 2010, www.dwd.de, (26.07.2014 – Dokument 039 der CD)

5.2.5. Ergebnisdarstellung der Quell- und Grundwasserqualität

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse aus der Untersuchung am 17.06.2014.

pH-Wert	Temperatur	Ammonium	Eisen	Aluminium	Nitrat	Phosphat
[-]	[°C]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
6,11	19,80	0,04	0,09	0,02	3,43	0,05

*Tabelle 8: Ergebnisdarstellung der Untersuchung am 17.06.2014 in Mengerskirchen
Quelle: Eigendarstellung*

Der pH-Wert für den Niederschlag, für die am 13.07.2014 durchgeführter Messung, beträgt 4,5. Die Durchgeführte Messung am 21.07.2014 hat einen pH-Wert von 6,8 für die Quelle und 5,0 für den Niederschlag ergeben.

Die pH-Werte der 12 nahumliegenden Grundwassermessstellen liegen zwischen 6,41 und 7,54 (Entfernung: max. 3800 Meter).

Die Ammoniumkonzentrationen der 12 nahumliegenden Grundwassermessstellen liegen zwischen 0,0017 mg/l und 0,01 mg/l. Die Aluminiumkonzentrationen der 12 nahumliegenden Grundwassermessstellen liegen zwischen 0,007 mg/l und 0,035 mg/l.

5.2.6. Bewertung der Ergebnisse

Die pH-Werte zeigen, dass das Quellwasser sich in einem leicht sauren Zustand befindet. Dies wird durch niedrige pH-Werte vom Niederschlag und kurzer Verweilzeit im Boden begründet. Der pH-Wert des Niederschlags liegt leicht unter dem Durchschnitt. Dieser kann zum Teil durch die Geländehöhe des Untersuchungsgebiets beeinflusst werden. Die Inhaltsstoffe des Quellwassers liegen weit unterhalb der Grenzwerte nach der Trinkwasserversorgung. Ausnahme ist der zu niedrige (saure) pH-Wert. Der Grenzwert nach Trinkwasserversorgung liegt bei 6,5.

Beurteilung der Quellwasserqualität (Gewässergüte) durch chemische und physikalische Parameter¹⁶¹ hat folgendes Ergebnis:

- Temperatur: Gewässergüteklasse II (wenig belastet)
- pH-Wert: Gewässergüteklasse I (nicht belastet) bis II (wenig belastet)
- Ammonium: Gewässergüteklasse I (nicht belastet)
- Nitrat: Gewässergüteklasse III (mäßig belastet)
- Phosphat: Gewässergüteklasse II (wenig belastet)

¹⁶¹ Vgl. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Ökologische Bewertung eines Baches, S. 195, www.umweltministerium.hessen.de, (27.07.2014 – Dokument 073 der CD)

Das Grundwasser liegt in einem leicht sauren bis leicht alkalischen Bereich. Grund für die geringe Pufferung des Bodens sind die silikatischen Gesteine und Ablagerungen. Der pH-Wert des Bodens wurde an dem Untersuchungsort nicht analysiert. Die Bepflanzung vor Ort lieferte keine Hinweise auf saure Böden (Indikatorpflanzen).

Zusammengefasst kann die Quell- und Grundwasserqualität als natürlich bis wenig belastet bewertet werden. Bis auf den pH-Wert besitzt das Quellwasser eine sehr gute Qualität (nach der Trinkwasserverordnung in Bezug auf die Untersuchungsparameter). Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Situation für andere, hier nicht untersuchte Trinkwasserparameter, natürlich ungünstiger darstellen kann.

5.2.7. Empfehlungen zum Verwendungsspektrum

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der pH-Wert von Quellwasser in leicht saurem Bereich liegt. Bei der Nutzung von Quellwasser als Trinkwasser für die Pferde kann es auf Dauer zur Übersäuerung im Organismus kommen. Dies führt ggf. dazu, dass die Entzündungen und Ekzeme länger abheilen als bei basenreichem Wasser¹⁶². Einer der möglichen Gründe für Ekzeme kann die Umstellung im Stoffwechsel und ein schwaches Immunsystem sein. Oft werden diese durch Futterumstellung (Winter/Sommer) verursacht¹⁶³.

Die Konzentrationen Ammonium, Aluminium, Nitrat, Phosphat und Eisen können als unbedenklich bewertet werden (entsprechen der Trinkwasserverordnung). Um die Qualität besser bewerten zu können sind Untersuchungen zu den Parametern wie z.B. Selen und Pestiziden notwendig.

Der pH-Wert von Quellwasser kann durch Filtration über Calciumcarbonat oder halbgebrannten Dolomit angehoben werden. Der Preis für Calciumkarbonat liegt in etwa bei 70-100 € pro Tonne. Diese Methoden sind gut für die Tiertränkung geeignet. Auf Grund von fehlender Information zur Säurekapazität und Basenkapazität kann keine Berechnung für Filtermenge und Verweilzeit durchgeführt werden.

Für die Bewässerungszwecke, Nahrungsmittelproduktion und Trinkwasseraufbereitung für den menschlichen Gebrauch können weitere Verfahren wie z.B. Dosierung von Natriumhydroxid (Natronlauge) und Calciumhydroxid (Kalkmilch, Kalkwasser) bzw. die Ausgasung von Kohlenstoffdioxid verwendet werden. Diese Verfahren sind jedoch aufwendiger und erfordern einen höheren Aufwand.

¹⁶² Vgl. Kattwinkel K. (o.J.): Mein Pferd ist sauer - im doppelten Sinne, www.artgerecht-tier.de, (27.07.2014 – Dokument 080 der CD)

¹⁶³ Vgl. KRISTALLKRAFT e. K. (o.J.): Entgiftung bei Pferden, www.kristallkraft-pferdefutter.de, (27.07.2014 – Dokument 083 der CD)

6. Schlussbetrachtung

Die im ersten Kapitel gestellte Zielsetzung wurde erreicht. Der Versauerungszustand und die damit verbundenen Verunreinigungen im Quell- und Grundwasser wurden für alle Untersuchungsgebiete (Deutschland, Ruhrgebiet und Westerwald) durch die theoretische und praktische Untersuchungen ermittelt. Das Zusammenspiel von Schadstoffquellen und Schadstoffpfaden in Bezug auf die Versauerung und die damit verbundenen Umweltauswirkungen wurden näher erläutert. Bei der Erarbeitung von aktuellen Regelungen durch die Gesetzgebung wurden Passagen für das direkte und indirekte Handeln aufgeführt.

6.1. Fazit

Die Gewässerversauerung (Grundwasser und Quellwasser) ist in den letzten Jahrzehnten auf Grund der sinkenden Luftschadstoffemissionen zurückgegangen. Die positive Entwicklung wurde durch die ständig fortführende Gesetzgebung auf allen Ebenen und technische Maßnahmen beeinflusst.

Das Resultat der Langzeiteinwirkung von sauren Niederschlägen ist die reduzierte (örtlich fehlende) Pufferkapazität der Böden, sowie teilweise erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser. Aus der Analyse geht hervor, dass der Anteil an versauertem Grundwasser sehr klein ausfällt. Dies ist jedoch auf Grund der festgesetzten Grenze ($\text{pH} < 5$) kritisch zu bewerten. Der Anteil an Gewässer mit pH-Werten kleiner sieben liegt bei fast 40 Prozent und wird nicht als Handlungsbedürftig angesehen. Die Gefahr stellt dabei die im Kapitel 4.1.2. ermittelte Versauerungsempfindlichkeit dar. Sink das Ionenverhältnis durch weitere Belastung, kann der Anteil an versauerten Gewässer erheblich zunehmen (um ca. 20-fache).

Bei der Datenanalyse aus unterschiedlichen Quellen wurden regionale Schwankungen festgestellt. Der Einfluss auf den pH-Wert wird durch verschiedene Faktoren wie z.B. Geologie, Vegetation, geografische Lage und Industrie begründet. Die niedrigen pH-Werte und teilweise hohe Konzentrationen an Metallionen im Ruhrgebiet sind nach Datenauswertung die Folgen der ausgeprägten Bergbautätigkeit und den geologischen Verhältnissen.

Durch die praktischen Untersuchungen im Westerwald wurden unter anderem die Proben für den Niederschlag entnommen. Die Messwerte lagen unter dem in der Literatur angegeben Durchschnittswerten und können als ein Indiz für die Aktualität der Versauerungsproblematik betrachtet werden.

Die Ergebnisse der theoretischen und praktischen Untersuchungen belegen, dass die Versauerung bei Quellen deutlich höher ausfällt als im Grundwasser.

Anhand der vorliegenden Daten, kann das Grund- und Quellwasser in bestimmten Regionen nicht ohne Aufbereitung zur Deckung des Trinkwasserbedarfs verwendet werden. Dazu gehören das Anheben des pH-Wertes und die Abscheidung der Spurenelemente.

Eine Schwierigkeit in dieser Arbeit bestand darin, dass es nur veraltete Bewertungsmöglichkeiten bzw. Ansätze zur Gewässerversauerung gibt. Aufgrund dessen wurde für die vorliegende Arbeit eine eigene Bewertungsmethode, basierend auf verschiedenen vorhandenen Ansätzen, entwickelt und angewandt. Auch bei der eigenentwickelten Methode gibt es Schwachstellen. Dazu gehören z.B. die Anzahl der Untersuchungsparameter und deren Gewichtung. Bei einer größeren Anzahl der Untersuchungsparameter kann das Ergebnis besser als auch schlechter ausfallen. Mögliche Ungenauigkeiten können durch fehlende Faktoren entstehen, welche die Korrelationen mit dem pH-Wert (Niederschlag, Boden und Wasser), Einwirkungsdauer und den im Boden vorhandenen Mineralien berücksichtigen sollen.

6.2. Empfehlung für Gegenmaßnahmen zur Gewässerversauerung

Um die Emissionen von Luftschadstoffen zu reduzieren, ist es wichtig die Vorgaben des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) zu erfüllen. Dadurch kommt es in dem Energiesektor zum Abfall der Emissionen durch Verzicht auf die fossilen Energieträger. Alternativ können die Industriebetriebe durch moderne bzw. weitere Rauchgasreinigungsanlagen ausgestattet werden.

In privaten Haushalten ist die Umstellung auf volatile Energien bzw. auf Erdgas anzustreben. Wärmedämmende Maßnahmen können ebenfalls einen Beitrag zur Minimierung des Energiebedarfs leisten. Im Verkehr könnte die Umstellung auf Elektrofahrzeuge, Fahrgemeinschaften, öffentlicher Verkehr und Rad den Ausstoß an Luftschadstoffen reduzieren. Im Bereich des Bodenschutzes sind weitere Kalkungsmaßnahmen notwendig (bei tiefgründiger Versauerung wirkungslos). Die geringere Verwendung von Düngemittel in der Landwirtschaft kann die Belastung durch Nitrat minimieren.

Im Hinblick auf die Luftschadstoffe ist es wichtig aufgrund des globalen Klimasystems die Emittenten außerhalb von Deutschland und ggf. EU auf die Problematik und Folgen der Versauerung aufmerksam zu machen. In Deutschland sind die Maßnahmen aktuell und werden zum Teil durchgesetzt. Diese stoßen jedoch auf hohe Kosten und wenig Akzeptanz in der Öffentlichkeit.

6.3. Ausblick

Obwohl die Gesamtdeposition für säurebildende Schadstoffe zurückgegangen ist, wird die Problematik der Versauerung örtlich stark diskutiert. Dabei geht es im Einzelnen um die Auswirkungen der Versauerung auf die Böden, Wald, Landwirtschaft, Denkmalbauwerke, Gewässerqualität, aquatische Flora und Fauna. Neben dem Umweltschutz ist auch die Frage nach dem monetären Aufwand für die Schadensbekämpfung (besonders örtlich) von hoher Bedeutung.

Die Untersuchung verschiedener Entwicklungen in den Schadstoffpfaden hat ergeben, dass die Versauerung in absehbarer Zukunft sich auf etwa gleichem Stand bewegen wird. Leichte Schwankungen in positive und negative Richtung sind durch Umstellungen im Energie- und Industriesektor nicht ausschließbar.

Ein wichtiger und aus meiner Sicht in Zukunft an Bedeutung zunehmender Punkt ist die Ozeanversauerung. Auf Grund von festgesetztem Untersuchungsumfang konnte die Ozeanversauerung nicht ausführlich betrachtet werden. Die Zusammenhänge sind jedoch eindeutig zuordenbar und die mögliche Schäden für Flora, Fauna und die Menschheit nicht abschätzbar.

Bei der Bearbeitung von Versauerungsproblematik wurde Forschungsbedarf festgestellt. In Rahmen weiterer Bachelor- und Masterarbeiten, sowie interdisziplinären Projekten an der Hochschule RheinMain können folgende Punkte erforscht werden:

1. Es wurde festgestellt, dass es zurzeit keine Daten darüber gibt, wie stark ein Boden versauert. Eine mögliche Aufgabe wäre die Erstellung einer solchen Kartierung in digitaler Form (als GIS-gestützte Fachinformationssystem wünschenswert). Die Untersuchungen können örtlich, regional und Bundesweit durchgeführt werden. Die Anwendung kann für die unterschiedlichen Fachbehörden und Naturschutzverbänden und Industrie (Agrar-, Forstwirtschaft, Aquakultur etc.) von hoher Bedeutung sein.

Zusätzlich kann die Kartierung als ein Planungs- und Überwachungsinstrument eingesetzt werden bzw. es können die Fragen beantwortet werden wie z.B.: hängt die Versauerung einer bestimmter Quelle mit Pufferkapazität zusammen oder wird diese durch nahliegenden Emittenten verursacht?

2. In Bezug zum Punkt 1 muss ein standardisiertes Bewertungs- und Untersuchungsverfahren für Böden entwickelt werden. Dabei können die Böden in unterschiedlichen Entstehungsperioden und charakteristische Merkmale unterteilt werden.

Die Untersuchung kann durch die ständige Zugabe von Säuregemischen und pH-Wertbeobachtung stattfinden. Aussagekräftige Zeitintervalle sind dabei festzulegen. Dadurch kann der Handlungsbedarf für Maßnahmen besser eingeschätzt und geplant werden.

3. Ein weiterer Bearbeitungspunkt kann die Weiterentwicklung eines Bewertungssystems hinsichtlich der Versauerung für die oberirdische und unterirdische Gewässer entwickelt bzw. optimiert werden. Als mögliche Vorlage kann der Ansatz aus dieser Arbeit verwendet werden. Dadurch wird es möglich die Gewässergüte durch die Kombination von chemischen, physikalischen und ggf. biologischen Komponenten zu bewerten. Als Vorteile dieses Verfahrens können der einheitliche Überblick über die Gewässerqualität und eine in sich zusammenführende Darstellung wichtiger Komponenten sein.
4. Die Luftschadstoffe spielen eine wichtige Rolle bei den Versauerungsprozessen. Ein Bearbeitungspunkt kann z.B. die Ermittlung des Säurebildungspotentials für ausgesuchte Luftschadstoffe sein. Untersucht werden soll dabei die Mengenbildung im Übergangsbereich zum Wasser und Boden. Die pH-Wertänderungen sind dabei in Korrelation zur Schadstoffkonzentrationen in der Luft zu setzen. Mögliche Einflussfaktoren sind zu ermitteln. Dadurch kann das tatsächliche Schadenspotential abgeleitet und die Maßnahmen ergriffen werden.
5. Ein weiteres Thema könnte die Untersuchung der Empfindlichkeit von aquatischen und terrestrischen Ökosystemen bei ständigen und schwankenden pH-Werten sein. Die Unterteilung der Untersuchung kann durch die Wahl von Biotopen, ausgesuchten Pflanzenarten, Algen, Mikroorganismen, Fischen etc. erfolgen.
6. Die in dieser Arbeit angeschnittene Problematik der Ozeanversauerung kann näher untersucht werden. Die Bearbeitungspunkte können die globalen Emittenten, Klimamodelle und Auswirkungen auf die aquatische Umwelt umfassen. Mögliche Auswirkungen durch Störungen in Nahrungskette und Bildung von Phytoplankton können wichtige Informationen zur zukünftigen Entwicklung bereitstellen. Die Korrelation der Medien Wasser und Luft kann näher erforscht werden. Dies bezüglich können die Kohlenstoffsенke, Schadstoffverdünnung und weitere physikalische, sowie chemische Änderungen betrachtet werden.

Glossar

Abiotisch:

Einzelne Komponenten der Außenwelt (Umweltfaktoren), die ohne Lebensvorgänge sind und direkt oder indirekt auf Organismen einwirken, werden als abiotisch bezeichnet. Die Umweltfaktoren sind Wasser, Gestein, Luft, Klima etc.¹⁶⁴

Aerosole

Unter Aerosolen versteht man ein Gemisch von festen und/oder flüssigen Partikeln natürlichen oder anthropogenen Ursprungs mit einer Größe zwischen 0,01 und 10 Millimeter¹⁶⁵.

Alkalibasalt

Alkalibasalte sind Ergussgesteine mit dichtem bis feinkörnigen Gefüge. Sie weisen einen hohen Gehalt an Alkalimetallen, vor allem Natrium¹⁶⁶.

Anthropogen

Die vom Menschen verursachten Veränderungen werden als anthropogen bezeichnet. Im Umweltbereich kann das z.B. die Flussbegradigung oder Grundwasserabsenkung sein¹⁶⁷.

Basanit

Basanit ist ein magmatisches Gestein (Vulkanit) mit alkalischer Zusammensetzung¹⁶⁸.

Biotop

Unter Biotop versteht man eine räumliche Einheit (natürlich oder anthropogen entstanden) als Teil eines Ökosystems. Biotope anthropogener Ursprung werden oft als Kulturlandschaft bezeichnet. Ein Ökosystem besteht in der Regel aus mehreren Biotopen¹⁶⁹.

¹⁶⁴ Vgl. Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (o.J.): Wasser Glossar, www.wasserwerk.at, (08.06.2014 – Dokument 107 der CD)

¹⁶⁵ Vgl. Das ENSO-Phänomen (o.J.): Aerosole, <http://enso.info>, (31.07.2014 – Dokument 034 der CD)

¹⁶⁶ Vgl. Dillmann O. (o.J.): Alkalibasalt, www.geodienst.de, (31.07.2014 – Dokument 042 der CD)

¹⁶⁷ Vgl. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.): Anthropogen, www.umweltdatenbank.de, (10.06.2014 – Dokument 111 der CD)

¹⁶⁸ Vgl. Purle T. (o.J.): Basanit, www.steine-und-minerale.de, (31.07.2014 – Dokument 110 der CD)

¹⁶⁹ Vgl. Pleye M (o.J.): Biotop, <http://definition-online.de>, (31.07.2014 – Dokument 109 der CD)

Dispersion

Ist die Abhängige der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen, Wellenlänge bzw. Frequenz in einem Medium¹⁷⁰.

Dissoziation:

Unter Dissoziation versteht man Zerfall und Aufspaltung von Molekülen mittels Aufnahme von thermischer Energie in einfache Atomgruppen. Beim Zerfall von elektrisch neutralen Molekülen in einander entgegengesetzte geladene Ionen spricht man von elektrolytischer Dissoziation. Die dissoziierten Stoffe werden aufgrund deren Fähigkeit elektrischen Strom zu leiten als Elektrolyte bezeichnet¹⁷¹.

Emission

Unter Emission wird die Abgabe von Stoffen /Schadstoffen) oder Energie in die Umwelt (Wasser/Boden/Luft) verstanden¹⁷².

Evapotranspiration

Ist die Summe aus direkter Verdunstung und Abgabe durch Pflanzen und Tiere. Als meteorologische Größe beschreibt diese die Gesamtsumme des Wasserverlustes in die Atmosphäre¹⁷³.

Flora und Fauna

Flora steht für die Pflanzenwelt und Fauna für die Tierwelt innerhalb eines Lebensraums. Je nach Region können diese sich stark unterscheiden. Zusammenfassung zu Floraelementen und Tierarten innerhalb des Lebensraums ist möglich. Ein Beispiel dafür ist Avifauna (Vögel) und Makrofauna (wirbellose Tierwelt)¹⁷⁴.

¹⁷⁰ Vgl. uni-protokolle.de: Dispersion, www.uni-protokolle.de, (31.07.2014 – Dokument 147 der CD)

¹⁷¹ Vgl. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.): Dissoziation, www.umweltdatenbank.de (10.06.2014 – Dokument 112 der CD)

¹⁷² Vgl. quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.): Emission, www.umweltdatenbank.de, (31.07.2014 – Dokument 113 der CD)

¹⁷³ Vgl. pflanzenforschung.de (o.J.): Evapotranspiration, www.pflanzenforschung.de, (31.07.2014 – Dokument 108 der CD)

¹⁷⁴ Vgl. Brosy M. (o.J.): Die Bedeutung der Begriffe Flora und Fauna, <http://umweltlexikon.blogspot.de>, (30.07.2014 – Dokument 010 der CD)

Holozän

Holozän (auch Nacheiszeit genannt) ist eine Periode in der Erdgeschichte, welche vor etwa 10.000 Jahren v.Chr. angefangen hat und sich bis heute vollzieht¹⁷⁵.

Ionenaktivität:

Unter Ionenaktivität wird der Anteil an tatsächlich aktiven Ionen verstanden. Auch bei Reaktionsgleichungen wird nicht immer die Konzentration der Ionen, sondern die Aktivität berücksichtigt. Die Ionenaktivität wird durch pH-Wert, Ionenstärke und Wechselwirkungen untereinander, sowie zwischen anderen Teilchen beeinflusst¹⁷⁶.

Konvektion

Unter Konvektion wird der Wärmetransport (Bewegung) von Teilchen in der Luft und Wasser verstanden¹⁷⁷.

Kreide

Kreide ist erdgeschichtliche Zeitalter, welches vor ca. 135 Mill. Jahren begann und endete vor ca. 65 Mill. Jahren¹⁷⁸.

Nephelinit

Nephelinit ist ein vulkanisches (magmatisches) Gestein mit dichtem bis porösem Gefüge. Besteht im Wesentlichen aus Nephelin ($[\text{Na}, \text{K}]\text{AlSiO}_4$) und Klinopyroxen¹⁷⁹.

Partialdruck

Ist der Druck, welcher in einem Gasgemisch (Luft) einem bestimmten Gas zugeordnet werden kann¹⁸⁰.

¹⁷⁵ Vgl. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (o.J.): Kompaktlexikon der Biologie – Holozän, www.spektrum.de, (30.07.2014 – Dokument 125 der CD)

¹⁷⁶ Vgl. Stolzenberger-Ramirez A. (Universidad Nacional de Jujuy) (o.J.): Ionenaktivität, www.geodz.com (10.06.2014 – Dokument 136 der CD)

¹⁷⁷ Vgl. DocCheck Medical Services GmbH (o.J.): Konvektion, <http://flexikon.doccheck.com>, (30.07.2014 – Dokument 046 der CD)

¹⁷⁸ Vgl. GtV - Bundesverband Geothermie e.V. (o.J.): Kreide, www.geothermie.de, (01.08.2014 – Dokument 067 der CD)

¹⁷⁹ Vgl. Schorn S. (Juli 2014): Nephelinit, www.mineralienatlas.de, (01.08.2014 – Dokument 121 der CD)

¹⁸⁰ Vgl. CHEMIE.DE Information Service GmbH (o.J.): Partialdruck, www.chemie.de, (01.08.2014 – Dokument 031 der CD)

Pedologie

Unter Pedologie wird Bodenkunde (Bodenwissenschaft) verstanden. Darunter fallen die Erforschung der Eigenschaften, Verbreitung und Entstehung von Böden¹⁸¹.

Pleistozän

Pleistozän ist ein zeitlicher Abschnitt, welcher vor ca. 2,3 Mill. Jahren begann und vor ca. 10.300 Jahren endete¹⁸².

Podsol

Ist ein nährstoffarmer und saurer Bodentyp¹⁸³.

Seeder-feeder-effekt

Es handelt sich beim Seeder-feeder-Effekt um zwei unterschiedliche Wolken. Die obere Wolkenschicht steht in Verbindung mit Niederschlagsfeld. Die zweite (tieferliegende) Wolkenschicht bildet sich auf Grund der Hebungen von feuchter Luft auf der Luvseite des Gebirges. Der Niederschlag fällt aus der oberen in die tieferliegende Wolkenschicht, wo sich die die Niederschlagsteilchen anreichern und später zum verstärkten Niederschlag führen¹⁸⁴.

Sorption

Unter Sorption wird die Anreicherung an den Grenzflächen zwischen flüssiger und fester, sowie zwischen gasförmiger und fester Phase verstanden. Sorption ist der Oberbegriff für Absorption, Adsorption und Desorption¹⁸⁵.

Ubiquitär

Ubiquitär bedeutet weite Verbreitung bzw. überall vorkommend¹⁸⁶.

¹⁸¹ Vgl. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (2001): LEXIKON DER GEOGRAPHIE – Pedologie, www.spektrum.de, (01.08.2014 – Dokument 126 der CD)

¹⁸² Vgl. die raum!vergeber GmbH (Dezember 2006): Pleistozän, www.klixs.de, (01.08.2014 – Dokument 044 der CD)

¹⁸³ Vgl. Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet e. V. (Februar 2012): Bodentypen, <http://wikis.zum.de>, (01.08.2014 – Dokument 157 der CD)

¹⁸⁴ Vgl. Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Wastl C. (September 2008): Klimatologische Analyse von orographisch beeinflussten Niederschlagsstrukturen im Alpenraum, S. 20

¹⁸⁵ Vgl. ReeseOnline e.K. (Mai 2014): Sorption, www.fremdwort.de, (01.08.2014 – Dokument 116 der CD)

¹⁸⁶ Vgl. Koops M. (o.J.): ubiquitär, www.biologie-lexikon.de, (01.08.2014 – Dokument 081 der CD)

Anhang

Literaturverzeichnis

Abart-Heriszt L. (1995), *Wirkungsorientierte ökologische Planung – Stellenwert von Schadstoffkonzentration und -depositionen in der Raumplanung*, ORL-Bericht 96, vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich, Zürich

Bastian D. (1999), *Potentielle Grundwassergefährdung durch Versauerung im Hessischen Ried: eine GIS-Modellierung zur Ermittlung von Gefährdungspotentialen*, Band 269 von Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Hessische Landesanstalt für Umwelt

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2008), *Grundwasser in Deutschland*, Silber Druck OHG, Niestetal

Dickerson R.E., Gray H.B., Darensbourg M.Y., Darensbourg D.J. (1998), *Prinzipien der Chemie*, 2. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin-New-York

Deutscher Verein d. Gas- u. Wasserfaches e.V., Klümper, T.H., Waider D. (2000), *Wasserverwendung-Trinkwasser-Installation*, Band 4, Oldenbourg Wissenschaftsverlag

Falbe J., Regitz M. (1998), *RÖMPP Lexikon Chemie, Band 4 M-Pk*, 10. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart

Fellenberg G. (1999), *Umweltbelastungen: eine Einführung*, Teubner Verlag, Stuttgart-Leipzig

Früher W., Nopp U. (2001), *Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden*, Facultas Verlags- und Buchhandels AG Wien

Jansen W., Block A., Knaack J. (1987), *Saurer Regen: Ursachen, Analytik, Beurteilung*, Metzler Verlag, Stuttgart

Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (2009), *Energie aus Biomasse*, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg

Karger R., Hoffmann F. (2013), *Wasserversorgung – Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung*, Springer Vieweg, Wiesbaden

Kämmerer D. (1998), *Hydrogeologische Untersuchungen zur Grundwasser-
versauerung im südlichen Taunus*, Band 103, Hessisches Landesamt für
Bodenforschung

Keitz S. (1994), *Die Versauerung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme in
Hessen: Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen*, Band 169 von Umweltplanung,
Arbeits- und Umweltschutz, Hessische Landesanstalt für Umwelt

Kowal L. (1993), *Messtechnik der Ammoniakemission – Am Beispiel der
Rinderhaltung*, Diplomica Verlag GmbH, München

Kramer M. (2010), *Integratives Umweltmanagement: Systemorientierte
Zusammenhänge zwischen Politik, Recht, Management und Technik*, 1. Auflage, GWV
Fachverlage GmbH, Wiesbaden

Krieter, M. (1991), *Ökosystemare Untersuchungen zur Boden- und Gewässerversauerung im südlichen Taunus und Hunsrück*, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 22, Universität Bremen

Kurzweil P., Scheipers P. (2005), *Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*, 7. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

Landesamt Brandenburg (2003), *Versauerungserscheinungen in quartären Lockergesteinsgrundwasserleitern unter besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Stoffeinträge*, Band 45

Lohmeyer S. (1993), *Wassernutzung und Abwasserreinigung in Betrieb und Kommune I*, expert Verlag

Merkl G. (2008), *Technik der Wasserversorgung – Praxisgrundlagen für Führungskräfte*, Oldenbourg Industrieverlag

Möller D. (2003), *Luft: Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht*, Walter de Gruyter Verlag, New York

Nakayama J; Aoki, S; Takayama, J; Sakamoto, A; Sugihara, Y; Ishii (28 Juli 2014), *Reversible Disulfur Monoxide (S₂O)-Forming Retro-Diels–Alder Reaction. Disproportionation of S₂O to Trithio-Ozone (S₃) and Sulfur Dioxide (SO₂) and Reactivities of S₂O*, Journal of the American Chemical Society 126

Roser M. (2012), *Modellbasierte und positionsgenaue Erkennung von Regentropfen in Bildfolgen zur Verbesserung von videobasierten Fahrerassistenzfunktionen*, Kit Scientific Publishing Verlag

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2010), *Ökologische Belastungsgrenzen unter Einfluss des Klimawandels*, Schriftenreihe, Heft 12/2010

Scholz R.W., Bösch S., Mieg H.A., Stünzi J. (1997), *Zentrum Zürich Nord – Stadt im Aufbruch, Fallstudie '96, Bausteine für eine nachhaltige Stadtentwicklung*, vdf Hochschulverlag an der ETH, Zürich

Statistisches Bundesamt (2013), *Trinkwasser wird überwiegend aus Grundwasser gewonnen*, Pressemitteilung vom 5. Februar 2013 – 43/13, Statistisches Bundesamt Pressestelle

Umweltministerium Baden-Württemberg (1995), *Saurer Regen – Probleme für Wasser, Boden und Organismen*, ECOMED Verlagsgesellschaft AG, Landsberg

Wiedenman M. (1999), *Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Trockendeposition von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH's) und vergleichende Messung der Einträge (trockene und nasse Deposition) an zwei unterschiedlich belasteten Standorten*, Herbert Utz Verlag GmbH, München

Internetquellen und elektronische Dokumente

Aktionsgemeinschaft „Rettet den Burgwald“ e.V. (o.J.), *Moore*,
www.ag-burgwald.de, (25.06.2014 – Dokument 001 der CD)

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (o.J.), *Ozeanversauerung – Der böse Zwilling der Klimaerwärmung*,
www.awi.de, (04.08.2014 – Dokument 002 der CD)

Autonome Provinz Bozen – Südtirol, Abteilung Landesagentur für Umwelt (o.J.),
Jahreszeitliche Schwankungen,
www.provinz.bz.it, (11.05.2014 – Dokument 003 der CD)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (August 2005),
Fortschreibung des Emissionskatasters Bayern für das Jahr 2000,
www.lfu.bayern.de, (14.05.2014 – Dokument 004 der CD)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2004),
Luftschadstoffe – Wirkungen auf Ökosysteme,
www.lfu.bayern.de, (23.06.2014 – Dokument 005 der CD)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013), *Ammoniak und Ammonium*,
www.lfu.bayern.de, (26.06.2014 – Dokument 006 der CD)

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (o.J.), **Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft**, *Bodenzustandserhebung – Macht sauer wirklich lustig?*, www.lwf.bayern.de, (21.07.2014 – Dokument 007 der CD)

Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung, Riedel R. u.a. (o.J.):
Vergleich der wasserchemischen Eigenschaften von Waldquellen der silikatischen Mittelgebirge, www.bayceer.uni-bayreuth.de, (18.07.2014 – Dokument 008 der CD)

Bibliographisches Institut GmbH, Duden Paetec GmbH (o.J.),
pH-Wert - Definition und Berechnung,
www.schuelerlexikon.de, (16.03.2014 – Dokument 009 der CD)

Broßke D. (o.J.), *Ökosysteme*,
www.abiwissen.info, (23.06.2014 – Dokument 009_2 der CD)

Brosy M. (o.J.), *Die Bedeutung der Begriffe Flora und Fauna*,
<http://umweltlexikon.blogspot.de>, (30.07.2014 – Dokument 010 der CD)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Aug. 2008),
Grundwasser in Deutschland,
www.umweltbundesamt.de, (29.07.2014 – Dokument 011 der CD)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (o.J.),
RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik,
www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 012 der CD)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (o.J.),
RICHTLINIE 2006/118/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung, www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 013 der CD)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (o.J.), *RICHTLINIE DES RATES vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen*, www.bmub.bund.de, (25.06.2014 – Dokument 014 der CD)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (2012), *Nitratbericht 2012*, www.bmel.de, (26.04.2014 – Dokument 015 der CD)

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (o.J.), *Grundwasser – Guter Zustand bis 2015!*, www.bund.net, (09.05.2014 – Dokument 016 der CD)

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V., Baumann H.J. (o.J.), *Luftschadstoffe als Belastungsfaktor für die menschliche Gesundheit*, <http://bund-hamburg.bund.net>, (25.06.2014 – Dokument 017 der CD)

Bundesanzeiger Verlag GmbH (2013), *Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 2. August 2013*, *Bundesgesetzblatt Nr. 46*, www.bgbl.de, (25.04.2014 – Dokument 018 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)*, www.gesetze-im-internet.de, (25.06.2014 – Dokument 019 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)*, www.gesetze-im-internet.de, (25.06.2014 – Dokument 020 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 021 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 022 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 023 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Klärschlammverordnung (AbfKlärV)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 024 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 025 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.), *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)*, www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 026 der CD)

Bundesrepublik Deutschland (o.J.),
*Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen,
Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV),*
www.gesetze-im-internet.de, (26.06.2014 – Dokument 027 der CD)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Juni 2011),
Erläuterung zum Web Map Service (WMS) „Hintergrundwerte Grundwasser“,
www.bgr.bund.de, (24.04.2014 – Dokument 028 der CD)

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (2006),
Hoch- und Niedermoore Entstehung und Eigenschaften,
www.hydrologie.uni-oldenburg.de, (23.06.2014 – Dokument 029 der CD)

CHEMIE.DE Information Service GmbH (o.J.), *Oxonium,*
www.chemie.de, (16.03.2014 – Dokument 030 der CD)

CHEMIE.DE Information Service GmbH (o.J.), *Partialdruck,*
www.chemie.de, (01.08.2014 – Dokument 031 der CD)

Chemisches Ingenieurbüro Lapp (o.J.), *Kleines Wasserlexikon,*
www.cil-online.de, (12.06.2014 – Dokument 032 der CD)

Cornelsen Schulerlage GmbH, Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie (o.J.), *Ist
heißes Wasser saurer als kaltes?*
www.chemieunterricht.de, (15.03.2014 – Dokument 033 der CD)

Das ENSO-Phänomen (o.J.), *Aerosole,*
<http://enso.info>, (31.07.2014 – Dokument 034 der CD)

Der Ministerpräsident des Landes Schleswig-Holstein mit der Staatskanzlei (o.J.),
Trend - Langzeitentwicklung 1979 – 2012,
www.schleswig-holstein.de, (20.07.2014 – Dokument 035 der CD)

Der Niedersächsische Bildungsserver, Sachs H. (o.J.), *Zur Bedeutung des pH-Wertes,*
www.nibis.ni.schule.de, (09.05.2014 – Dokument 036 der CD)

Der Niedersächsische Bildungsserver (NiBiS) (o.J.), *Flussanalyse des Laufes,*
www.nibis.ni.schule.de, (23.06.2014 – Dokument 037 der CD)

Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Reiss M., Zaenker S. (2012):
Gewässerversauerung von Quellen im Buntsandstein – Kein Problem für Krenobionte?,
www.researchgate.net, (18.07.2014 – Dokument 038 der CD)

Deutscher Wetterdienst (Juni 2013), *Niederschlag: langjährige Mittelwerte 1981 –
2010,* www.dwd.de, (26.07.2014 – Dokument 039 der CD)

Didaktik der Chemie (Universität Bayreuth) (o.J.),
Der Schwefel und seine Sauerstoffverbindungen,
<http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de>, (11.06.2014 – Dokument 040 der CD)

Didaktik der Chemie (Universität Bayreuth) (o.J.), *saurer Regen – Entstehung,
Auswirkungen, Gegenmaßnahmen,*
<http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de>, (21.06.2014 – Dokument 041 der CD)

Dillmann O. (o.J.), *Alkalibasalt,*
www.geodienst.de, (31.07.2014 – Dokument 042 der CD)

Die multimediale Umweltbibliothek im Web (o.J.),
Pufferung im Austausch-Pufferbereich,
www.ubib-hs-rottenburg.de, (15.06.2014 – Dokument 043 der CD)

die raum!vergeber GmbH (Dezember 2006), *Pleistozän*,
www.klixs.de, (01.08.2014 – Dokument 044 der CD)

Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinland (November 2013),
pH-Wertveränderung,
www.hortipendium.de, (14.05.2014 – Dokument 045 der CD)

DocCheck Medical Services GmbH (o.J.), *Konvektion*,
<http://flexikon.doccheck.com>, (30.07.2014 – Dokument 046 der CD)

Düngekalk-Hauptgemeinschaft (o.J.), *Deutschlands Wälder brauchen Hilfe*,
www.waldkalkung.com, (20.07.2014 – Dokument 047 der CD)

EMSCHERGENOSSENSCHAFT / LIPPEVERBAND (o.J.),
KLIMA / NIEDERSCHLÄGE, www.eglv.de, (21.07.2014 – Dokument 048 der CD)

Engelhardt M. (o.J.), *Prozesse und Eigenschaften*,
<http://markusengelhardt.com>, (15.06.2014 – Dokument 049 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 2008/105/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 050 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 98/83/EG DES RATES vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 051 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 2006/44/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 052 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 2006/113/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 12. Dezember 2006 über die Qualitätsanforderungen an Muschelgewässer*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 053 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 2008/1/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 054 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 96/82/EG DES RATES vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 055 der CD)

EUR-Lex (o.J.), *RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)*,
<http://eur-lex.europa.eu>, (25.06.2014 – Dokument 056 der CD)

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Wastl C. (September 2008), *Klimatologische Analyse von orographisch beeinflussten Niederschlagsstrukturen im Alpenraum*
<http://edoc.ub.uni-muenchen.de>, (01.08.2014 – Dokument 057 der CD)

Fischerzeugerring Niederbayern e.V. (2004), *pH-Wert*,
<http://fischerzeugerring-niederbayern.de>, (24.06.2014 – Dokument 058 der CD)

Fournier R., Weston K.J., Dore A.J., Sutton M.A. (2005),
Modelling the wet deposition of reduced nitrogen over the British Isles using a Lagrangian multi-layer atmospheric transport model,
www.onlinelibrary.wiley.com, (12.05.2014 – Dokument 059 der CD)

Gasteiger J. (o.J.), *Eigendissoziation des Wassers*,
www2.chemie.uni-erlangen.de, (16.03.2014 – Dokument 060 der CD)

Gemeindevorstand des Marktfleckens Mengerskirchen (o.J.), *Geschichte von Mengerskirchen*, www.mengerskirchen.de, (24.07.2014 – Dokument 061 der CD)

Gemeindevorstand des Marktfleckens Mengerskirchen (o.J.), *Herzlich willkommen im Marktflecken Mengerskirchen*,
www.mengerskirchen.de, (25.07.2014 – Dokument 062 der CD)

GGU Zentrale Verwaltung mbH, Civilserve GmbH (September 2008), *Berechnung von Schadstoffausbreitungen in Grundwassersystemen mit Finiten Elementen*,
www.ggu-software.com, (13.05.2014 – Dokument 063 der CD)

GREENPEACE Media GmbH (August 2013), *Fracking verursacht Fischsterben*,
www.greenpeace-magazin.de, (21.07.2014 – Dokument 064 der CD)

Grimm H. (o.J.), *pH-Wert in Wasser und wässrigen Lösungen (Säuren, Basen, Salze, Salzgemische): pH-Berechnung und Ermittlung des pH mit dem Hägg-Diagramm*,
www.wissenschaft-technik-ethik.de, (15.03.2014 – Dokument 065 der CD)

Grimm H. (o.J.),
Wasser und Dampfdruck: Dampfdrucktabelle für Wasser und Eis, Zusammenhang mit Sieden und Siedepunkt, Formel zur Berechnung durch Interpolation,
www.wissenschaft-technik-ethik.de, (15.03.2014 – Dokument 066 der CD)

GtV - Bundesverband Geothermie e.V. (o.J.), *Kreide*,
www.geothermie.de, (01.08.2014 – Dokument 067 der CD)

Hamilton Bonaduz AG (April 2007), *pH-Messung in der Praxis*,
www.hamiltoncompany.com, (09.06.2014 – Dokument 068 der CD)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) (o.J.),
Emissionskataster Hessen – Luft,
www.hlug.de, (14.05.2014 – Dokument 069 der CD)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (o.J.),
Informationen zur Gewässerversauerung in Hessen,
www.hlug.de, (11.05.2014 – Dokument 070 der CD)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (o.J.),
Umweltatlas Hessen - Schwefeldioxid,
<http://atlas.umwelt.hessen.de>, (11.06.2014 – Dokument 071 der CD)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (o.J.),
geologische Übersichtskarte von Hessen (M 1:300.000, Stand: August 2007),
www.hlug.de, (26.07.2014 – Dokument 072 der CD)

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (o.J.), *Ökologische Bewertung eines Baches*,
www.umweltministerium.hessen.de, (27.07.2014 – Dokument 073 der CD)

Hochtaunuskreis (o.J.), *Hausbäume*,
www.hochtaunuskreis.de, (24.07.2014 – Dokument 074 der CD)

Ingenieurbüro Bodenhöfer (o.J.), *Die Bedeutung des pH-Wertes beim Menschen*,
www.bodenhoefer.com, (24.06.2014 – Dokument 075 der CD)

Institut für Anorganische Chemie der Universität Würzburg (April 1985), *Vier- und fünffach koordinierte Schwefelmonoxid-Komplexe des Rhodiums und Iridiums*,
<http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de>, (11.06.2014 – Dokument 076 der CD)

Janicke U., Janicke L. (2008), *Auswaschen von SO₂, NO_x und Staub durch Regen: Modellparameter für Ausbreitungsmodelle nach VDI 3945 Blatt 3*,
www.janicke.de, (13.05.2014 – Dokument 077 der CD)

Kaminski U. und Fricke M. (November 2001), *G AW Brief des Deutschen Wetterdienstes, Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg: die zeitliche Entwicklung des pH-Wertes im Niederschlag*,
www.dwd.de, (17.07.2014 – Dokument 078 der CD)

Karlsruher Institut für Technologie, Bühler W. (2000), *Modellierung des Reaktionsverhaltens von Glycerin in sub- und überkritischem Wasser*,
<http://bibliothek.fzk.de>, (16.03.2014 – Dokument 079 der CD)

Kattwinkel K. (o.J.), *Mein Pferd ist sauer - im doppelten Sinne*,
www.artgerecht-tier.de, (27.07.2014 – Dokument 080 der CD)

Koops M. (o.J.), *ubiquitär*,
www.biologie-lexikon.de, (01.08.2014 – Dokument 081 der CD)

Kreisverwaltung Recklinghausen (o.J.), *Zahlen, Daten, Fakten im Kreis Recklinghausen*,
www.kreis-re.de, (21.07.2014 – Dokument 082 der CD)

KRISTALLKRAFT e. K. (o.J.), *Entgiftung bei Pferden*,
www.kristallkraft-pferdefutter.de, (27.07.2014 – Dokument 083 der CD)

Krüger J. (o.J.), *Unkonventionelle Gasförderung*,
www.unkonventionelle-gasfoerderung.de, (21.07.2014 – Dokument 084 der CD)

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2001), *Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser - Ergebnisse isotopenhydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen im Teilprojekt 6 des Forschungsvorhabens „Konfliktarme Baggerseen (KaBa)“*,
www.lgrb.uni-freiburg.de, (15.05.2014 – Dokument 085 der CD)

Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1996), *Leitfaden zum Altlastenprogramm des Landes Sachsen-Anhalt*, Heft 20,
www.lau.sachsen-anhalt.de, (13.05.2014 – Dokument 086 der CD)

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Januar 2010), *Bericht zur Versauerung der Umwelt*, www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de (15.06.2014 – Dokument 087 der CD)

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (1997), *Bodenversauerung Ursachen – Auswirkungen – Maßnahmen Literaturstudie*, www.lubw.baden-wuerttemberg.de, (26.06.2014 – Dokument 088 der CD)

Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (o.J.), *punktueller Belastungen*, www.wrrl-mv.de, (15.05.2014 – Dokument 089 der CD)

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Mai 2001), *Grundwasserbericht 2000, Auszug: Leit- und Summenparameter*, www.luwg.rlp.de, (18.07.2014 – Dokument 090 der CD)

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA und Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz (Mai 2006), *Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen*, www.lawa.de, (15.05.2014 – Dokument 091 der CD)

Leßmann, D. & Nixdorf, B. (2009), *Konzeption zur Ermittlung des ökologischen Potentials von sauren Bergbauseen anhand der Qualitätskomponente Phytoplankton*, im Auftrag des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, www.umwelt.sachsen.de, (19.06.2014 – Dokument 092 der CD)

Lohninger H. (o.J.), *pT-Phasendiagramm von Reinstoffen*, <http://anorganik.chemie.vias.org>, (16.03.2014 – Dokument 093 der CD)

Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, *Waldzustandsbericht 2002 - Geschädigte Waldfläche auf dem Niveau der Vorjahre*, <http://mlr.baden-wuerttemberg.de>, (20.07.2014 – Dokument 094 der CD)

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (o.J.), *Biologische und chemische Qualitätskomponenten zur Einstufung des ökologischen Zustandes*, www.wrrl.rlp.de, (24.06.2014 – Dokument 095 der CD)

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2004), *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser*, www.lawa.de, (25.04.2014 – Dokument 096 der CD)

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, LAWA Expertenkreis "Stoffe" (März 2010), *Stoffdatenblatt Aluminium-Kation*, www.laenderfinanzierungsprogramm.de, (15.06.2014 – Dokument 097 der CD)

Morin K. A., Hutt N. M. (2006), *Conversion of Minerals into Neutralization Potentials with Units of CaCO₃ Equivalent*, www.mdag.com, (15.06.2014 – Dokument 098 der CD)

NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V. (o.J.), *CO₂-Emissionen durch private Haushalte*, www.nabu.de, (26.06.2014 – Dokument 099 der CD)

Neosmart Consulting AG (Mai 2014), *Trinkwasser*,
www.zentrum-der-gesundheit.de, (29.07.2014 – Dokument 100 der CD)

Netze BW GmbH (Dezember 2010),
Kenndaten zur Stuttgarter Trinkwasserversorgung 2010,
www.netze-bw.de, (15.03.2014 – Dokument 101 der CD)

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (o.J.), *Grundwasserbeschaffenheit*,
www.nlwkn.niedersachsen.de, (13.03.2014 – Dokument 102 der CD)

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2007), *Grundwasserversauerung - Methoden zur Gefährdungsabschätzung und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen*,
www.nlwkn.niedersachsen.de, (26.04.2014 – Dokument 103 der CD)

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (o.J.),
Gegenmaßnahmen,
www.umwelt.niedersachsen.de, (27.06.2014 – Dokument 104 der CD)

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (o.J.),
Versauerung,
www.umwelt.niedersachsen.de, (20.06.2014 – Dokument 105 der CD)

Novotny (Februar 2001), **DGE GmbH**: *NO_x-Entfernung aus Abluft*,
www.x-technik.com, (12.06.2014 – Dokument 106 der CD)

Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (o.J.), *Wasser Glossar*,
www.wasserwerk.at, (08.06.2014 – Dokument 107 der CD)

pflanzenforschung.de (o.J.), *Evapotranspiration*,
www.pflanzenforschung.de, (31.07.2014 – Dokument 108 der CD)

Pleye M. (o.J.), *Biotop*,
<http://definition-online.de>, (31.07.2014 – Dokument 109 der CD)

Purle T. (o.J.), *Basanit*,
www.steine-und-minerale.de, (31.07.2014 – Dokument 110 der CD)

quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.), *Anthropogen*,
www.umweltdatenbank.de, (10.06.2014 – Dokument 111 der CD)

quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.), *Dissoziation*,
www.umweltdatenbank.de, (10.06.2014 – Dokument 112 der CD)

quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K. (o.J.), *Emission*,
www.umweltdatenbank.de, (31.07.2014 – Dokument 113 der CD)

Quaschnig V. (o.J.),
Weltweite Kohlendioxidemissionen und -konzentration in der Atmosphäre
<http://volker-quaschnig.de>, (18.07.2014 – Dokument 114 der CD)

Regionalverband Ruhr (o.J.), *Die Geologie und Oberflächengestalt des Ruhrgebietes*,
www.ruhrgebiet-regionalkunde.de, (21.07.2014 – Dokument 115 der CD)

ReeseOnline e.K. (Mai 2014), *Sorption*,
www.fremdwort.de, (01.08.2014 – Dokument 116 der CD)

Regionalverband Ruhr (o.J.), *Hamm - einfach l(i)ebenswert*,
www.metropoleruhr.de, (21.07.2014 – Dokument 117 der CD)

Rheinkalk KDI GmbH & Co. KG (2009), *Kalkung zur Qualitätssicherung*,
www.rheinkalk-kdi.de, (23.06.2014 – Dokument 118 der CD)

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Dezember 1995), *Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 4: Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Boden*,
www.umwelt.sachsen.de, (13.05.2014 – Dokument 119 der CD)

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (Berlin) (2011),
02.14 Grundwassertemperatur,
www.stadtentwicklung.berlin.de, (15.03.2014 – Dokument 120 der CD)

Schorn S. (Juli 2014), *Nephelinit*,
www.mineralienatlas.de, (01.08.2014 – Dokument 121 der CD)

Schutzgemeinschaft Deutscher Wald, *Waldschäden durch Luftverunreinigungen*,
www.sdw.de, (29.07.2014 – Dokument 122 der CD)

Schutzgemeinschaft Deutscher Wald (o.J.): *Waldzustandsbericht 2012*,
www.sdw.de, (24.07.2014 – Dokument 123 der CD)

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (2001), *Gewässerversauerung*,
www.spektrum.de, (11.05.2014 – Dokument 124 der CD)

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (o.J.),
Kompaktlexikon der Biologie – Holozän,
www.spektrum.de, (30.07.2014 – Dokument 125 der CD)

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (2001),
LEXIKON DER GEOGRAPHIE – Pedologie,
www.spektrum.de, (01.08.2014 – Dokument 126 der CD)

Stadt Duisburg (o.J.), *Vermessung, Kataster und Geoinformationen*,
www.duisburg.de, (21.07.2014 – Dokument 127 der CD)

Stadt Hamm / Landwirtschaftskammer NRW (Dezember 2006),
Die Struktur der Landwirtschaft und ihre Entwicklung in der Stadt Hamm,
www.hamm.de, (21.07.2014 – Dokument 128 der CD)

Stadt Nürnberg (o.J.),
Übersicht über den Jahresverlauf der in der Messstation des Chemischen Untersuchungsamtes gemessenen Luftschadstoffe im Vergleich zu den Vorjahren,
<http://umweltdaten.nuernberg.de>, (20.07.2014 – Dokument 129 der CD)

Stadt Recklinghausen (Juni 2010), *Recklinghausen 2020 Flächennutzungsplan– Entwurf / Begründung*, www.recklinghausen.de, (21.07.2014 – Dokument 130 der CD)

Stadt Wuppertal (o.J.), *Versauerung von Böden – die Bodenreaktion*,
www.wuppertal.de, (23.06.2014 – Dokument 131 der CD)

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Stand 10.04.2014),
Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung,
www.statistik-portal.de, (24.04.2014 – Dokument 132 der CD)

Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention, Tasser E. (o.J.), *Ökosystemleistungen der Berglandwirtschaft*,
www.alpconv.org, (24.06.2014 – Dokument 133 der CD)

STEINEL Normalien AG, Loctite Deutschland GmbH (2010), *Sicherheitsdatenblatt Loctite 603*,
www.steinel.com, (15.05.2014 – Dokument 134 der CD)

Stiftung Unternehmen Wald (o.J.), *Waldzustandsbericht 2013*,
www.wald.de, (29.07.2014 – Dokument 135 der CD)

Stolzenberger-Ramirez A. (Universidad Nacional de Jujuy) (o.J.), *Ionenaktivität*,
www.geodsz.com, (10.06.2014 – Dokument 136 der CD)

Stolzenberger-Ramirez A. (Universidad Nacional de Jujuy) (o.J.), *Metallhydroxide*,
www.geodsz.com, (23.06.2014 – Dokument 137 der CD)

Technisches Büro für Landschaftsökologie, -Planung, -Pfleger, Univ.Lek.DI Hans Unterfrauner (2010), *Vorräte und Mobilisierung von Spurenelementen im Boden und deren Funktionen für Boden und Pflanze*,
www.landschaftsoekologie.at, (23.06.2014 – Dokument 138 der CD)

Technische Universität Dresden, Dittmar T. (o.J.):
Vorlesung Wasserinhaltsstoffe – Schwermetalle,
<http://tu-dresden.de>, (25.06.2014 – Dokument 139 der CD)

Tornau C. (o.J.), *Autoprotolyse des Wassers*,
www.chemieseite.de, (16.03.2014 – Dokument 140 der CD)

Umweltbundesamt (o.J.), *pH-Wert*,
www.umweltprobenbank.de, (09.05.2014 – Dokument 141 der CD)

Umweltbundesamt (September 2013), *Die Treibhausgase*,
www.umweltbundesamt.de, (20.07.2014 – Dokument 142 der CD)

Umweltbundesamt (April 2009), *HINTERGRUNDPAPIER ZU EINER MULTIMEDIALEN STICKSTOFF-EMISSIONSMINDERUNGSSTRATEGIE*,
www.umweltbundesamt.de, (18.07.2014 – Dokument 142_2 der CD)

Umweltbundesamt, veröffentlicht durch Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (o.J.), *Strom aus Gas und Kohle*,
www.bine.info, (18.07.2014 – Dokument 143 der CD)

Umweltbundesamt GmbH (Januar 1998), *Kartierung der nassen Deposition in Österreich*, www.umweltbundesamt.at, (11.05.2014 – Dokument 144 der CD)

Umweltbundesamt GmbH (2004), *Qualität & Quantität von Grundwasser in Europa*,
www.umweltbundesamt.at, (09.05.2014 – Dokument 145 der CD)

Umweltbundesamt GmbH (2005), *VOC-Monitoring 2003/2004 in Illmitz und an zwei Messstellen in Wien*,
www.umweltbundesamt.at, (15.05.2014 – Dokument 146 der CD)

uni-protokolle.de (o.J.), *Dispersion (elektromagnetische Wellen)*,
www.uni-protokolle.de, (31.07.2014 – Dokument 147 der CD)

uni-protokolle.de (o.J.), *pH-Wert*,
www.uni-protokolle.de, (16.03.2014 – Dokument 148 der CD)

- Universität Konstanz** (2010),
Schwermetalle und Pflanzen – eine komplizierte Beziehung (II),
www.uni-konstanz.de, (24.06.2014 – Dokument 149 der CD)
- Universität Stuttgart, Friedrich R.** (Oktober 2007), *Luftschadstoffemissionen-Entwicklung in den letzten Jahrzehnten und Projektion in die Zukunft*,
www2.ier.uni-stuttgart.de, (26.06.2014 – Dokument 150 der CD)
- Universität Duisburg-Essen, Beckmann G., Klopries B.** (1994), *Die Antwort der Evolution - Auswirkungen des atmosphärischen CO₂-Anstiegs auf die Biosphäre*,
www.uni-due.de, (20.07.2014 – Dokument 151 der CD)
- UPI Umwelt- und Prognose – Institut e.V., Teufel D., Bauer P.** (o.J.),
Quellen in Handschuhsheim,
www.upi-institut.de, (18.07.2014 – Dokument 152 der CD)
- Vornehm C.** (2004), *Hydro-geochemische Untersuchungen zum System Niederschlag – Boden – Grundwasser im Grundgebirge des Bayerischen Waldes*,
<http://edoc.ub.uni-muenchen.de>, (14.05.2014 – Dokument 153 der CD)
- Winter M., Schindler H.** (20011/2012),
Waldquellenmonitoring im Naturpark Pfälzerwald,
www.parc-vosges-nord.fr, (18.07.2014 – Dokument 154 der CD)
- W. Neudorff GmbH KG** (o.J.), *pH-Wert*,
www.neudorff.de, (23.06.2014 – Dokument 155 der CD)
- YARA GmbH & Co. KG** (2011),
Niträtdünger - Erträge optimieren, die Umwelt schonen,
www.yara.de, (15.05.2014 – Dokument 156 der CD)
- Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet e. V.** (Februar 2012), *Bodentypen*,
<http://wikis.zum.de>, (01.08.2014 – Dokument 157 der CD)
- Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH** (2013),
Die Nutzung des Energiespeichermediums Ameisensäure für den kontinuierlichen Brennstoffzellenbetrieb,
www.zbt-duisburg.de, (15.05.2014 – Dokument 158 der CD)
- Zühlke K.** (o.J.), *Entsäuerung nach der Trinkwasserverordnung (in Anlehnung an DVGW Arbeitsblatt W214)*,
www.trinkwasserspezi.de, (27.06.2014 – Dokument 159 der CD)
- Zühlke K.** (o.J.), *Berechnungen von Wasserinhaltsstoffen und Umrechnungen*,
www.trinkwasserspezi.de, (26.04.2014 – Dokument 160 der CD)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind oder auf Mitteilungen beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wiesbaden, den.....

.....

Sergej Justus